

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP  
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**CARACTERIZAÇÃO DA RELAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DA EMISSÃO DE CO<sub>2</sub>  
DO SOLO EM ÁREAS DE EUCALIPTO E SILVIPASTORIL COM O USO DE  
APRENDIZADO DE MÁQUINA**

**Renata Amaral da Silva  
Bióloga**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP  
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**CARACTERIZAÇÃO DA RELAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DA EMISSÃO DE CO<sub>2</sub>  
DO SOLO EM ÁREAS DE EUCALIPTO E SILVIPASTORIL COM O USO DE  
APRENDIZADO DE MÁQUINA**

**Renata Amaral da Silva**

**Orientador: Prof. Dr. Alan Rodrigo Panosso**

**Coorientadora: Dra. Mara Regina Moitinho**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Ciência do Solo).

S586c

Silva, Renata Amaral

Caracterização da relação espaço-temporal da emissão de CO<sub>2</sub> do solo em áreas de eucalipto e silvipastoril com o uso de aprendizado de máquina / Renata Amaral Silva. -- Jaboticabal, 2024

69 p. : il., tabs., fotos, mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: Alan Rodrigo Panosso

1. Dinâmica climática. 2. Gases do efeito estufa. 3. Floresta sustentável. 4. Inteligência artificial. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:** CARACTERIZAÇÃO DA RELAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DA EMISSÃO DE CO<sub>2</sub> DO SOLO EM ÁREAS DE EUCALIPTO E SILVIPASTORIL COM O USO DE APRENDIZADO DE MÁQUINA

**AUTORA:** RENATA AMARAL DA SILVA

**ORIENTADOR:** ALAN RODRIGO PANOSSO

**COORDINADORA:** MARA REGINA MOITINHO

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Agronomia (Ciência do Solo), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. ALAN RODRIGO PANOSSO (Participação Virtual)  
Departamento de Ciências Exatas / FCAV UNESP Jaboticabal



Prof. Dr. DANIEL DE BORTOLI TEIXEIRA (Participação Virtual)  
Grupo São Martinho S.A. / Pradópolis/SP

**gov.br**

Documento assinado digitalmente  
**DANIEL DE BORTOLI TEIXEIRA**  
Data: 02/03/2024 08:58:45-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. GENE TADEU PEREIRA (Participação Virtual)  
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas / FCAV UNESP Jaboticabal



Jaboticabal, 01 de março de 2024

## **DADOS CURRICULARES DA AUTORA**

**Renata Amaral da Silva** - Filha de Regina de Souza Amaral e Raimundo Nonato Oliveira da Silva, nasceu em Belém, Pará, no dia 17 de janeiro de 1994. Ingressou no curso de Ciências Biológicas em março de 2015, pela Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), Câmpus de Capitão Poço, Pará. Em agosto de 2022, ingressou no curso de Mestrado em Agronomia (Ciência do Solo), da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV-UNESP), Câmpus de Jaboticabal-SP, no Departamento de Ciências Exatas, sob a orientação do Prof. Dr. Alan Rodrigo Panosso. Atua principalmente nas áreas de variabilidade da emissão de CO<sub>2</sub> do solo e modelagem.

“O choro pode durar uma noite, mas  
a alegria vem pela manhã.”

**(Salmo 30:5)**

“Quando penso que estou fraco,  
então é que sou forte.”

**(2 Coríntios 12:10)**

## **DEDICO**

À minha mãe e pai, Regina de Souza Amaral e Raimundo Nonato de Oliveira da Silva; meus irmãos, Renato de Souza Amaral; Ruth Amaral Bezerra; e aos meus amados sobrinhos, Rayla e Benício, e ao meu cachorro Billy que tanto amo.

## **OFEREÇO**

A minha amada avó, Joana Raimunda de Oliveira da Silva (*in memoriam*). Que me criou e me ensinou seguir os caminhos com retidão em busca dos meus sonhos.

## **AGRADECIMENTOS**

**DEUS:** Sem a minha fé e relacionamento com ele nada seria possível.

**FAMÍLIA:** À minha família, especialmente à minha mãe e irmã, Regina de Souza Amaral, Ruth Amaral Bezerra e ao meu cachorro Billy por todo o suporte, companheirismo e amor incondicional que me fortaleceram durante a minha jornada no mestrado.

**AMBIENTE UNIVERSITÁRIO:** Agradeço ao meu orientador Alan Rodrigo Panosso pela oportunidade, agradeço a minha coorientadora Mara Regina Moitinho por todo apoio profissional e pessoal e a todos os demais que contribuíram de alguma forma para obtenção desse título.

**FINANCIAMENTO:** O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

.

**Muito obrigada!**

## SUMÁRIO

|                                                                                                                            | Página    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>RESUMO –.....</b>                                                                                                       | <b>II</b> |
| <b>ABSTRACT –.....</b>                                                                                                     | <b>IV</b> |
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>                                                                                                 | <b>1</b>  |
| <b>2. REVISÃO DE LITERATURA.....</b>                                                                                       | <b>5</b>  |
| 2.1. Gases de efeito estufa na agricultura.....                                                                            | 5         |
| 2.2. Carbono em solos de Cerrado e florestas plantadas.....                                                                | 7         |
| 2.3. Principais fatores governantes da emissão de CO <sub>2</sub> do solo .....                                            | 9         |
| 2.4. Aprendizado de Máquinas .....                                                                                         | 11        |
| <b>3. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>                                                                                          | <b>13</b> |
| 3.1. Caracterização da área de estudo .....                                                                                | 13        |
| 3.2. Avaliação da emissão de CO <sub>2</sub> (FCO <sub>2</sub> ), temperatura e umidade do solo .....                      | 15        |
| 3.3. Avaliação dos atributos do solo .....                                                                                 | 16        |
| 3.4. Processamento e análise de dados .....                                                                                | 17        |
| <b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>                                                                                     | <b>18</b> |
| 4.1. Variação temporal da FCO <sub>2</sub> , temperatura e umidade do solo em floresta<br>plantada de eucalipto (EU) ..... | 18        |
| 4.2. Variação temporal da FCO <sub>2</sub> , temperatura e umidade do solo em sistema<br>silvipastoril (SSP).....          | 22        |
| 4.3. Efeito dos sistemas nos atributos do solo .....                                                                       | 26        |
| 4.4. Predição da variabilidade espaço-temporal da emissão de CO <sub>2</sub> do solo<br>por machine learning .....         | 31        |
| 4.5. Uso de machine learning para estimar a emissão de CO <sub>2</sub> e atributos do solo<br>39                           |           |
| <b>5. CONCLUSÕES .....</b>                                                                                                 | <b>40</b> |

## CARACTERIZAÇÃO DA RELAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DA EMISSÃO DE CO<sub>2</sub> DO SOLO EM ÁREAS DE EUCALIPTO E SILVIPASTORIL COM O USO DE APRENDIZADO DE MÁQUINA

**RESUMO** – Embora exista um processo natural que ocorre no solo associado a perda de carbono, a emissão de CO<sub>2</sub> (FCO<sub>2</sub>) e a ciclagem de nutrientes, a conversão da vegetação nativa para áreas agrícolas tende inicialmente a acelerar este processo, alterando o equilíbrio ecossistêmico antes ali existente. Contudo, dependendo do manejo e do tempo de conversão dessas áreas, esses sistemas futuramente podem se tornar mais conservacionista em termos da dinâmica do carbono, apresentando potencial tanto para estocar quanto estabilizar esse carbono no solo, resultando em menores taxas de respiração do solo. Diante deste contexto, com o presente estudo objetivou-se avaliar a relação das variações espaço-temporais dos fatores controladores da FCO<sub>2</sub> em solos de Cerrado em sistemas agrícolas sob reflorestamento. O experimento foi conduzido na Fazenda da UNESP, Campus de Ilha Solteira, no município de Selvíria-MS. Em áreas adjacentes sob solo Latossolo Vermelho (Haplic Acrustox). O estudo foi conduzido em florestas plantadas de *Eucalyptus camaldulensis* (EU) e área de sistema silvipastoril (SSP) (*M. Urundeuva* e *Brachiaria decumbens*), para a avaliação da FCO<sub>2</sub>, temperatura (Ts) e umidade do solo (Us), carbono orgânico, grau de humificação da matéria orgânica (Hlifs) e demais atributos químicos e físicos do solo. Foram cinco dias de avaliação da FCO<sub>2</sub> no manejo EU (17/02, 15/03, 03/06, 10/06 e 17/06) e SSP (22/02, 17/03, 03/06, 10/06 e 17/06) e as relações entre a emissão nesses dias com os atributos do solo coletado ao final dessas avaliações foram previstas por aprendizado de máquina com algoritmo Random Forest (RF). No solo sob plantio de EU as médias diárias da FCO<sub>2</sub> variaram ao longo do tempo, houve baixa variação na umidade do solo (10,7 a 12,8%) ao longo do período. Quando realizada a análise de correlação observou-se efeito significativo ( $p < 0,05$ ) somente entre a FCO<sub>2</sub> e a temperatura do solo ( $r = 0,53$ ;  $p < 0,05$ ). O sistema SSP também apresentou variabilidade nas taxas de emissões, os valores médios diários da FCO<sub>2</sub> no sistema SSP também apresentaram correlação linear positiva com os valores da temperatura do solo ( $r = 0,80$ ;  $p < 0,05$ ). O solo sob sistema EU apresentou maior fertilidade em relação ao solo sob sistema SSP quando observamos as médias de P, Ca, Mg e V%, além de menor acidez do solo (H+Al e Al), consequentemente esse solo apresentou maior teor de matéria orgânica (31,31 g dm<sup>-3</sup>

<sup>3)</sup> e estoque de carbono (21,75 Mg ha<sup>-1</sup>). Os resultados também demonstram que o modelo RF foi eficaz na previsão da variabilidade espaço-temporal da FCO<sub>2</sub>, sugerindo que o manejo do solo e as condições climáticas são fatores determinantes para as emissões de CO<sub>2</sub>. Os melhores atributos para o mapeamento da FCO<sub>2</sub> incluem a Ds, H+Al, Ts e Ca para a área de EU. Para área de SSP foram soma de bases, Ts, estoque de carbono e microporosidade. Esses atributos do solo são essenciais para explicar a FCO<sub>2</sub> e oferecem um caminho promissor para futuras investigações.

**Palavras-chave:** estoque de carbono, mineralização da matéria orgânica, respiração do solo, Random Forest.

## CHARACTERIZATION OF THE SPATIO-TEMPORAL RELATIONSHIP OF SOIL CO<sub>2</sub> EMISSION IN EUCALYPTUS AND FORESTRY AREAS USING MACHINE LEARNING

**ABSTRACT** – Although there is a natural process in the soil associated with carbon loss, CO<sub>2</sub> emission (FCO<sub>2</sub>), and nutrient cycling, converting native vegetation to agricultural areas tends to initially accelerate this process, altering the ecological balance previously existing there. However, depending on the management and the conversion time of these areas, these systems may eventually become more conservative in terms of carbon dynamics, showing potential to both store and stabilize this carbon in the soil, resulting in lower soil respiration rates. Given this context, the present study aimed to evaluate the relationship between the spatio-temporal variations of the controlling factors of FCO<sub>2</sub> in Cerrado soils in agricultural systems under reforestation. The experiment was conducted at the UNESP Farm, Campus of Ilha Solteira, in the municipality of Selvíria-MS, in adjacent areas under Red Latosol (Haplic Acrustox). The study was conducted in planted forests of *Eucalyptus camaldulensis* (EU) and in a silvopastoral system area (SSP) (*M. Urundeuva* and *Brachiaria decumbens*), to assess FCO<sub>2</sub>, soil temperature (Ts), and moisture (Us), organic carbon, degree of humification of organic matter (Hlifs), and other chemical and physical soil attributes. There were five days of FCO<sub>2</sub> assessment in the EU management (17/02, 15/03, 03/06, 10/06, and 17/06) and SSP (22/02, 17/03, 03/06, 10/06, and 17/06), and the relationships between emissions on these days with the soil attributes collected at the end of these evaluations were predicted by machine learning with the Random Forest (RF) algorithm. In the soil under EU planting, daily averages of FCO<sub>2</sub> varied over time, with low variation in soil moisture (10.7 to 12.8%) throughout the period. When correlation analysis was performed, a significant effect ( $p < 0.05$ ) was observed only between FCO<sub>2</sub> and soil temperature ( $r = 0.53$ ;  $p < 0.05$ ). The SSP system also showed variability in emission rates, and the average daily FCO<sub>2</sub> values in the SSP system also showed a positive linear correlation with soil temperature values ( $r = 0.80$ ;  $p < 0.05$ ). The soil under the EU system showed higher fertility compared to the soil under the SSP system when observing the averages of P, Ca, Mg, and V%, in addition to lower soil acidity (H+Al and Al), consequently, this soil presented a higher content of organic matter (31.31 g dm<sup>-3</sup>) and carbon stock (21.75 Mg ha<sup>-1</sup>). The results

also demonstrate that the RF model was effective in predicting the spatio-temporal variability of  $\text{FCO}_2$ , suggesting that soil management and climatic conditions are determining factors for  $\text{CO}_2$  emissions. The best attributes for mapping  $\text{FCO}_2$  include  $\text{Ds}$ ,  $\text{H+Al}$ ,  $\text{Ts}$ , and  $\text{Ca}$  for the EU area. For the SSP area, base sum,  $\text{Ts}$ , carbon stock, and microporosity were included. These soil attributes are essential for explaining  $\text{FCO}_2$  and offer a promising path for future investigations.

**Keywords:** carbon stock, organic matter mineralization, soil respiration, Random Forest.

## 1. INTRODUÇÃO

O efeito estufa é um processo natural, tendo como principais envolvidos, os gases dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) e vapores d'água ( $\text{H}_2\text{O}$ ), esses gases são essenciais para a regulação da temperatura no planeta, entretanto sua concentração tem aumentado de forma significativa na atmosfera contribuindo para o aquecimento global (IPCC, 2022). De acordo com o sexto Painel intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) os principais responsáveis pelas emissões desses gases são os setores que incluem as indústrias, produção de energia e transporte, a agropecuária e as mudança de uso do solo, este último responsável em 2019 por emitir 22% desses gases (IPCC, 2022). No Brasil, a intensificação do aquecimento global com a maior concentração de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera é em decorrência principalmente do aumento do número de desmatamento e queimadas, que vem se agravando devido a expansão das atividades agrícolas, especialmente nas regiões que se situam em biomas como o Cerrado e a Floresta Amazônica (IPCC, 2022). Aproximadamente 50% dos 2 milhões de km originais da área de Cerrado está sob uso agrícola (SANO et al., 2008; BEUCHLE et al., 2010), comprometendo cerca de 80% da sua vegetação primária.

Em adição, com o uso intenso do solo na produção pecuária ocorre a perda da cobertura vegetal e da matéria orgânica (MO) resultando no aumento de emissão de gases para atmosfera, só as atividades de pecuária são responsáveis por 44% das emissões de GEE, em decorrência disso a recuperação de áreas degradadas tem sido alvo de crescente preocupação na área ambiental (BATISTA et al., 2019; TELLES et al., 2021).

As emissões de  $\text{CO}_2$  no Brasil advém de práticas agrícolas não conservacionistas (DERNARDIN, 2009), tendo em vista que a MO está diretamente relacionada com o tipo de preparo da área, que a depender disso pode aumentar ou diminuir o estoque de carbono (C) no local (BAYER et al., 2000; LIU et al., 2003; KHORRAMDEL et al., 2013), a integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e sistemas agroflorestais (SAFs) tem sido alvo de estudos para observar o comportamento da MO e do C dentro desses sistemas.

Esses sistemas fazem parte da estratégia do Governo Federal redigido pelo Plano de Agricultura de Baixo Carbono (ABC) tendo como uma das metas reduzir as emissões de GEE com práticas de manejo mais sustentáveis de acordo com as

características específicas de cada região (SILVA et al., 2021). Além disso, trazem benefícios com o aumento da fertilidade do solo e maior disponibilidade de nutrientes, fornecem melhores condições para MO, melhora dos atributos físicos e maior potencial em sequestrar C (ALVARENGA et al., 2010; SALTON et al., 2014; PULROLNIK et al., 2015). O plano ABC baseia-se em práticas como a recuperação de pastagens degradadas, a integração lavoura-pecuária-floresta, o plantio direto, a fixação biológica de nitrogênio e os sistemas florestais e agroflorestais aliados para manter e aumentar os estoques de carbono nos solos brasileiros (BRAZIL, 2011).

Para direcionar essas ações foram implantados programas de reflorestamento no Brasil, sendo o eucalipto (EU) a principal espécie florestal frequentemente utilizada principalmente no Cerrado brasileiro em solos de baixa fertilidade e déficit hídrico (GAMA-RODRIGUES et al., 2005; SOARES; NUNES, 2013), representando cerca de 70% da área total de florestas plantadas no país (ABRAF, 2012). Nesse contexto, os sistemas silvipastoris (SSP) também são muito utilizados a fim de traçar metas para o desenvolvimento rural sustentável que consiste na criação de animais com espécies arbóreas ou frutíferas no mesmo espaço e manejados de forma integrada promovendo sucessivas interações ecológicas e lucros econômicos, visto que o manejo do solo está diretamente relacionado com o sequestro de C no solo, processo essencial para mitigação da emissão de CO<sub>2</sub> do solo (LÓPEZ-SANTIAGO et al., 2019).

Tanto os animais quanto as espécies arbóreas desempenham papéis cruciais na ciclagem de nutrientes, restauração da fertilidade, mais disponibilidade de sombra para os animais, inserção do nitrogênio, sequestro do C e melhor deposição da serrapilheira (PALUDO; COSTABEBER, 2012). Esse sistema também ajuda no controle das variações de temperatura e na umidade do solo, porque diminui a radiação do sol e velocidade dos ventos (SANTOS et al., 2016). Dessa forma aumentam a taxa de mineralização dos nutrientes decorrentes do aumento da ação dos microrganismos (BERNADINO; GARCIA, 2009).

Entendendo que o solo é um dos recursos naturais essenciais à vida no planeta e ao equilíbrio do ecossistema e que sua funcionalidade está diretamente ligada à capacidade que este tem em conseguir manter suas atividades (ARAÚJO; MONTEIRO, 2007), que estão associadas principalmente a agricultura e seus componentes presentes no solo, como a MO, um ecossistema equilibrado em termos conservacionistas, é aquele que apresenta grande potencial tanto para estabilizar o C no solo, quanto para reduzir a contribuição da agricultura na emissão de GEE,

principalmente o CO<sub>2</sub>. Diante desse panorama, compreender os processos e mecanismos de produção e mineralização da MO é essencial para adoção de manejos agrícolas mais conservacionista que possam incrementar a MO nos sistemas de cultivo. Em contrapartida, o processo de mineralização da MO encontra-se com muitas lacunas em relação a florestas plantadas convertidas de florestas nativas, isso porque as florestas plantadas podem ter grande impacto na evolução do C e a falta de conhecimento limita a previsão de possíveis mudanças no uso da terra e no ciclo do C (HUANG et al., 2019).

Em adição, outro ponto de destaque é a dificuldade em modelar a variação espaço-temporal da emissão de CO<sub>2</sub> do solo nesses sistemas, uma vez que a emissão de CO<sub>2</sub> do solo está intrinsecamente ligada a uma gama de atributos edafoclimáticos e que estes atributos apresentam grande variação no espaço e no tempo, influenciando diretamente a dinâmica do fluxo de CO<sub>2</sub>. Observa-se que as variações nos atributos do solo, como textura, teor de matéria orgânica, e pH, estão correlacionadas com as flutuações nas taxas da respiração do solo. Contudo, a hipótese avança ao considerar a interação temporal, uma vez que a gestão do solo e as condições climáticas podem modificar os fatores limitantes e controladores da emissão de CO<sub>2</sub>.

Notado o número elevado de dados e informações gerados ao analisar os atributos do solo associados à dinâmica da emissão de CO<sub>2</sub>, as técnicas atuais de aprendizado de máquina se tornaram uma grande ferramenta nesse campo de estudo (WADOUX; MCBRATNEY, 2021). Os algoritmos de aprendizado de máquina têm sido utilizados com sucesso na ciência do solo pela capacidade do reconhecimento dos padrões não lineares que são encontrados nos corpos naturais, como o solo (LAGACHERIE et al., 2020; WADOUX; MCBRATNEY, 2021). Tais técnicas não são dependentes de suposições estatísticas tradicionais e possuem o potencial de processar e encontrar relações de inúmeras variáveis usadas como preditores com o atributo alvo, fato que eleva sua aplicação nos últimos anos nos estudos do mapeamento digital do solo (HENGL et al., 2018).

Nesse contexto, postula-se que métodos avançados de inteligência artificial possam ser eficazes na identificação e modelagem dessas inter-relações complexas, permitindo uma compreensão mais precisa das variações temporais e espaciais da emissão de CO<sub>2</sub> do solo. Diante dos expostos com o presente estudo objetivou-se

avaliar a relação das variações espaço-temporais dos fatores controladores da emissão de CO<sub>2</sub> em solos de Cerrado em sistemas agrícolas sob reflorestamento.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1. Gases de efeito estufa na agricultura e estratégias de mitigação**

O efeito estufa é um processo natural em que a terra retém uma parte da radiação solar, garantindo condições térmicas adequadas para a existência da vida. Esse mecanismo é essencial para a estabilidade climática do planeta (KWEKU et al., 2017). Contudo, as ações antrópicas, principalmente após a Revolução Industrial, têm elevado a presença de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, como CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono), CH<sub>4</sub> (metano), N<sub>2</sub>O (óxido nitroso) e CFCs (clorofluorcarboneto) (IPCC, 2021). Essa elevação amplifica o efeito estufa natural, resultando no fenômeno conhecido como aquecimento global, no país aproximadamente 40%, 84% e 76%, respectivamente, das emissões são provenientes de CO<sub>2</sub> tendo relação com uso e mudança do uso da terra e floresta, N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub> oriundos da agropecuária (CARVALHO et al., 2010; FERREIRA et al., 2022). De acordo com o sexto Painel intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) os principais responsáveis pelas emissões de GEE são a indústria, energia, transporte, construções, agropecuária e mudança de uso do solo, este último responsável em 2019 por emitir 22% desses gases (IPCC, 2022).

A conversão de áreas naturais para agricultura perturba o equilíbrio natural estabelecido, resultando em mudanças adversas no desenvolvimento das plantas e no ambiente (ENCK et al., 2020). Além disso, pelo uso intenso do solo com as atividades de pecuária ocorre a perda da cobertura vegetal e da matéria orgânica resultando no aumento de emissão de GEE para atmosfera, somente as atividades de pecuária são responsáveis por 44% das emissões de GEE, com isso a recuperação de áreas degradadas tem sido alvo de crescente preocupação na área ambiental (BATISTA et al., 2019; TELLES et al., 2021). Dias Filho (2014), relata em seu estudo que enquanto em áreas de pastagens degradadas a lotação de animais é de 0,7 animais por hectare, onde há recuperação dessas áreas esse valor aumenta para 2,5 animais por hectare, o que demonstra que o manejo dessas áreas também aumenta a eficiência na produção animal.

Tendo em vista que a MO está diretamente relacionada com o tipo de preparo da área, e que a depender disso pode aumentar ou diminuir o estoque de C no local (BAYER et al., 2000; LIU et al., 2003; KHORRAMDEL et al., 2013), a integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e sistemas agroflorestais (SAFs) tem sido alvo de estudos para observar o comportamento da MO e do C dentro desses sistemas.

Esses sistemas fazem parte da estratégia do Governo Federal redigido pelo Plano de Agricultura de Baixo Carbono (ABC) tendo como uma das metas reduzir as emissões de GEE com práticas de manejo mais sustentáveis de acordo com as características específicas de cada região (SILVA et al., 2021). Além disso, trazem benefícios para o local quanto a fertilidade do solo aumentando a disponibilidade de nutrientes; melhores condições para MO por reduzir a erosão; melhora dos atributos físicos e maior potencial em sequestrar C (ALVARENGA et al., 2010; SALTON et al., 2014; PULROLNIK et al., 2015).

De acordo com o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (2012) (MCTI), no Brasil o uso da terra, mudança no uso da terra e silvicultura (AFOLU), a agropecuária, de 2005 para 2015 apresentou variação das emissões de CO<sub>2</sub>, com valores respectivos de 70% e 14% para 2005; 32% e 27% para 2010 e 24% e 31% para 2015, demonstrando redução nas emissões com o passar dos anos para o setor AFOLU e aumento para agropecuária (BRASIL, 2017). Para 2022, as estimativas anuais de emissões para AFOLU e Agropecuária foram respectivamente, de 38% e 28,5% (BRASIL, 2022).

Sobretudo a grande preocupação é: como continuar mantendo a produção de alimentos e mitigar os problemas ambientais que o mundo vem enfrentando? Diversos planos e metas vem sendo discutidos no mundo todo, um exemplo disso ocorreu durante a COP 15 em 2009, onde o Brasil estabeleceu a Política Nacional sobre Mudanças do Clima (PNMC). Esta política busca implementar instrumentos, incluindo o Plano ABC, um ambicioso programa agrícola tropical de baixo C. Esse plano é reconhecido como o maior projeto de sua natureza e tem como meta impulsionar a transição agrícola no país. Seu objetivo é promover práticas e tecnologias que não apenas aprimorem a eficácia da produção agrícola, mas também otimizem o uso sustentável dos recursos, para minimizar as emissões de GEE (BRASIL, 2012).

Na COP-15 de 2009, o Brasil estabeleceu a Política Nacional sobre Mudanças do Clima (PNMC), seguida por instrumentos como o Plano Setorial de Mitigação e Adaptação. Esse compromisso foi ampliado na COP-21 com a adesão à Contribuição Nacionalmente Determinada (iNDC). O país se comprometeu a diminuir as emissões de GEE entre 37% e 43% até 2030, com base nos níveis de 2005, tendo metas intermediárias para 2025. Para isso, planeja expandir o Plano ABC, visando recuperar 15 milhões de hectares de pastagens degradadas e implementar um sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF) em 5 milhões de hectares adicionais.

## 2.2. Carbono em solos de Cerrado e florestas plantadas

Dado que o solo pode funcionar tanto como fonte quanto como sumidouro de C, sendo um grande reservatório desse elemento, a concentração de C no solo é afetada pela forma de preparo, práticas de gestão e condições ambientais, especialmente aquelas associadas à temperatura e oferta hídrica (LAL, 2015).

A MO funciona como potencial reservatório de C no solo. O esgotamento dos estoques de MO pode provocar impactos significativos em ecossistemas inteiros e, conseqüentemente, no planeta como um todo, por exemplo, a devastação de florestas tropicais, que armazenam vastas quantidades de carbono, intensifica os níveis atmosféricos de CO<sub>2</sub>, amplificando as mudanças climáticas (ONTL; SCHULTE, 2012). Ao alterar o uso da terra, ocorrem transformações na quantidade e no posicionamento da MO ao longo do perfil. O carbono orgânico (CO) originado da vegetação nativa do local se decompõe progressivamente, sendo eventualmente suplantado, em diferentes proporções pelo CO proveniente da nova prática de manejo do solo (ASSUNÇÃO et al., 2019).

A MO possui mais CO do que a combinação da vegetação global e da atmosfera (LEHMANN; KLEBER, 2015). A estimativa dos estoques globais de CO apresenta significativa variabilidade. Conforme Scharlemann et al. (2014), em uma metanálise após revisarem 27 estudos, observaram que os valores de C variam entre 504 e 3.000 Pg C, com uma média de 1.460,5 Pg C a uma profundidade de 1 metro.

O CO que advém da MO é crucial para a saúde do solo e tem um papel essencial na produção de alimentos, bem como na adaptação e mitigação às mudanças climáticas (LORENZ; LAL, 2016). Estimativas recentes sobre o impacto mundial da mudança no uso da terra indicam uma perda de cerca de 133 Pg C dos solos, frequentemente vinculada à exploração de pastagens deterioradas (SANDERMAN et al., 2017; DOS SANTOS et al., 2019), o Brasil ocupa nesse cenário a décima posição entre os países que mais emite CO<sub>2</sub> (SANDERMAN et al., 2017).

Solos bem manejados conseguem reter mais C no solo, apresentando um equilíbrio dinâmico estabelecido entre as entradas, representadas pelo acúmulo de resíduos orgânicos, e as saídas de C resultantes de variações nas taxas de decomposição, mineralização da MO ou erosão do solo, dentro de um contexto edafoclimático específico em sistemas agrícolas (CARDOSO et al., 2015; PAUSTIAN et al., 2016; LAL, 2018). Outro fator que auxilia na capacidade dos solos de reter C

está associada à presença de nitrogênio (N). Aumentar o acúmulo de C no solo sem elevar a fertilização nitrogenada ou sem reter o N no solo, afetando a produtividade vegetal, representa um desafio nas abordagens para o sequestro de C (SCHLESINGER; AMUNDSON, 2018).

Dentre as promissoras formas de manejo em relação ao sequestro do C no solo estão os sistemas de integração de florestas e lavouras, vários estudos indicam um incremento nos estoques de C no solo do bioma Cerrado sob esses sistemas (SÁ et al., 2015; NÓBREGA et al., 2017). O bioma Cerrado é o segundo maior do país, apresentando uma área de extensão de 200 milhões sendo de grande importância ecológica (MAYERS et al., 2000), o que torna esse bioma alvo de ameaças, entretanto não há grandes esforços para mudar este cenário e tendo pouca conservação, o Cerrado tem grandes chances de desaparecer até 2030 (SILVA et al., 2006; BAYER et al., 2010).

Com o avanço agrícola do país a conversão da vegetação de Cerrado continuará sendo um processo dominante de mudança do uso da terra no Brasil (NÓBREGA et al., 2017), o que torna essencial a adoção de práticas de manejos conservacionistas nessas áreas com a menor alteração possível da sua composição, estrutura e biodiversidade natural, mínimo distúrbio do solo, permanente cobertura do solo e diversificada rotação de culturas como estratégia para restaurar e manter o estoque do carbono orgânico (Beuchle et al., 2010).

Outro ponto importante, é que à medida que a urgência em preservar o meio ambiente e a biodiversidade se intensificam, a exploração de florestas nativas tende a torna-se progressivamente mais limitada. Isso enfatiza a relevância e promove o avanço das florestas plantadas. As florestas plantadas desempenham papel crucial em ecologia, como captura de C, revitalização de áreas inativas ou danificadas, e apoio à fauna em certos locais, além de propiciarem vantagens econômicas e sociais, no Brasil as principais florestas plantadas são de eucalipto (71%) e pinus (22%) (ORTIGOZA; SENNA, 2016).

Inkotte et al. (2015) em estudos desenvolvidos em áreas de reflorestamento de eucalipto e mata nativas, observaram que as coberturas florestais se comportaram de forma diferenciada quanto à decomposição da serrapilheira, quantificada por meio do C mineralizável na evolução de CO<sub>2</sub> (C-CO<sub>2</sub>). De acordo com os autores, a serrapilheira do eucalipto apresentou maior velocidade de decomposição e

consequentemente quantidades acumuladas de CO<sub>2</sub> superiores em relação às outras coberturas florestais.

### **2.3.Principais fatores governantes da emissão de CO<sub>2</sub> do solo**

Os solos agrícolas funcionam como um agroecossistema onde houve a inserção da produção agrícola em um sistema natural ocorrendo então uma complexa interação de diversos processos ecológicos em diferentes escalas espaço-temporal acarretando mudanças no ciclo global do C e com isso alterando as emissões de CO<sub>2</sub> do solo e as taxas de absorção do solo (RAY et al., 2020). Com isso, a agricultura é amplamente reconhecida como um fator significativo na emissão de GEE, principalmente o CO<sub>2</sub> (GARCIA; SPERLING, 2010), as devastações de grandes áreas seja pra agricultura, seja pra construções de hidrelétricas, vias urbanas e muitas outras finalidades mudam a naturalidade do planeta, e geram consequências no Brasil, os biomas como a Amazônia e o Pantanal sofrem a seca de remanescentes causados pela diminuição da vazão dos rios e das chuvas, ocorrendo por conta disso El Niños mais intensos (MARENGO; SOARES, 2003), com tudo isso ocorre também o aumento das temperaturas, ocasionando as mudanças climáticas globais, o que afeta o processo de fotossíntese e a produtividade das culturas, levando à modificação dos sistemas hidrológicos e da dinâmica do C nos ecossistemas terrestre e marinho (MENDES, 2017).

Nas áreas agrícolas, a emissão de CO<sub>2</sub> pode variar espacial e temporalmente devido às propriedades do solo, como porosidade e teor de água, além das condições ambientais de temperatura e umidade do solo (La Scala et al., 2009). A conversão de áreas nativas em agrícolas leva a maior perda de C ocorrendo maior emissão de gases para atmosfera (VIANA et al., 2011). A densidade é um importante indicador físico de qualidade ajudando a identificar tipos de manejos prejudiciais ao solo (TUCHTENHAGEM, 2018), espaços porosos quando são preenchidos por água limitam a quantidade de oxigênio, ocorrendo diminuição da FCO<sub>2</sub> (Tavares et al., 2018).

Um solo bem aerado fornece mais disponibilidade de água e espaço para o crescimento de raízes conseguindo nutrir o solo e sequestrar C reduzindo a emissão de CO<sub>2</sub>. As raízes das gramíneas desempenham um papel fundamental na formação dos macroporos, que são cruciais para facilitar a entrada de ar e o fluxo de água no solo. Além disso, a matéria orgânica proveniente da decomposição das raízes

contribui para a criação de agregados menores, o que aumenta a microporosidade do solo (BRADY et al., 2012; SALTON; TOMAZI, 2014).

De modo geral, é possível afirmar que quanto mais alta for a densidade do solo, mais compactado ele estará e mais degradada será sua estrutura. Isso resulta em menor porosidade total e, conseqüentemente, impõe restrições mais significativas ao crescimento do sistema radicular e ao desenvolvimento das plantas (BRAZ, 2013).

Os efeitos antrópicos sobretudo após a Revolução Industrial têm levado a graves mudanças ambientais, as concentrações de CO<sub>2</sub> passaram de 280 ppm (século XVIII) para 416 ppm (século XXI), os principais causadores da elevação na concentração atmosférica desse gás são a queima de combustíveis fósseis e as mudanças no uso da terra (IPCC, 2021).

De acordo com o grupo de trabalho III do IPCC 2021 há uma necessidade crescente em mudanças nos estilos de vida da população bem como dos governantes em gerir estratégias para controle das emissões e fazer com que elas sejam cumpridas, dentre as atividades para conseguir alcançar as metas descritas no relatório estão: mudanças no estilo de vida, mudanças no uso da terra e diminuição da queima de combustíveis fósseis (IPCC, 2021).

Além do IPCC há outros documentos que incentivam mudanças imediatas nas emissões de GEE, como por exemplo, o Acordo de Paris criado em dezembro de 2015, tem o objetivo de prevê metas de redução dos GEE a temperatura abaixo de 2 °C, financiamentos para países subdesenvolvidos para que também alcancem reduções nas emissões e assim todos consigam elaborar metas de ações, esse acordo foi estabelecido durante a 21ª Conferência das Partes (COP 21), o Brasil se comprometeu em reduzir suas emissões em 37% em 2025 e 43% em 2030 e assim atingir metas de reduções (MCTI, 2021).

Diante desse contexto, para reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> em áreas agrícolas, torna-se necessário primeiramente entender os processos associados à produção e ao transporte do gás, uma vez que a emissão é o resultado da associação desses dois fatores (produção e transporte).

A produção de CO<sub>2</sub> no interior do solo é um processo bioquímico diretamente relacionado à atividade biológica, como a respiração de raízes e o metabolismo microbiano por meio da decomposição da matéria orgânica, que por sua vez é influenciado pelas condições de temperatura e umidade do solo (LAL, 2009). Já as trocas de gases entre o solo e a atmosfera são governadas pelos mecanismos de

difusão e fluxo de massa que respondem a um gradiente de pressão e variam com a textura, estrutura e teor de umidade do solo (FILHO et al., 2011; ARTACHO, 2020).

Em adição, o CO<sub>2</sub> emitido dos solos agrícolas é resultante de interações entre o clima e diversos outros atributos do solo, como a MO e seu grau de humificação (Hlifs) (STROSSER, 2010; PANOSSO et al., 2011; XAVIER et al., 2020, SILVA et al., 2021), abundância e diversidade de microrganismos do solo (LAL, 2000; MOITINHO et al., 2020); densidade e porosidade do solo (KLEIN; LIBARDI, 2002; TEIXEIRA et al., 2012; SILVA et al., 2019), fertilidade (FUENTES et al., 2006; SILVA et al., 2019; MOITINHO et al., 2020); temperatura do solo (USSIRI; LAL, 2009; SILVA-OLAYA et al., 2013); umidade do solo (LA SCALA et al., 2006; PANOSSO et al., 2011; XAVIER et al., 2020, SILVA et al., 2021); além do relevo (EPRON et al., 2006; BRITO et al., 2009) são apontados como fatores controladores das taxa de respiração do solo.

Contudo, muitos desses atributos estão relacionadas à emissão de CO<sub>2</sub>, por afetarem de alguma forma direta ou indiretamente a comunidade e a atividade de microrganismos presente no interior do solo e/ou a formação, a estabilização e a decomposição da matéria orgânica do solo (LAL et al., 2009; CARVALHO et al., 2010).

Importante destacar nesse contexto, o papel do manejo do solo em relação da dinâmica do fluxo e a grande variação da emissão de CO<sub>2</sub> ao longo do tempo e do espaço, além do fato que as variáveis envolvidas no processo de produção e emissão serem também dependentes das condições edafoclimáticas locais (LA SCALA et al., 2006; VASCONCELOS, 2014; PANOSSO et al., 2011; OLIVEIRA et al., 2018; SILVA et al., 2020; MOITINHO et al., 2020).

## **2.4. Aprendizado de Máquinas**

A inteligência artificial (IA) é compreendida pela realização de funções que se assemelham a humana, como planejamento, aprendizado, raciocínios entres outras, tais funções são possíveis através da assimilação de bases de um algoritmo, de forma que a IA torna-se competente para melhor tomada de decisões em vista da grande quantidade de informações disponíveis e a variadas situações (KUHN; JOHNSON, 2013; CHOLLET; ALLAIRE, 2017).

Com isso, a IA se integrou em diversos setores, incluindo educação, saúde, indústria e meio ambiente, conforme apontam estudos de Ge et al. (2017), Chiavegatto Filho et al. (2018) e Grunwald (2022). Essa tecnologia vem se tornando uma presença constante e cada vez mais comum no dia a dia da sociedade moderna

(DI MININ et al., 2018). Dentre as técnicas de aprendizado de máquinas encontra-se modelos capazes de prever e estimar vários setores dentro de cada área, a exemplo tem-se o Randon Forest (RF) (OLIVEIRA, 2020).

O algoritmo RF foi desenvolvido por Breiman (2001) destaca-se por ser não paramétrico, altamente preciso e capaz de processar milhares de entradas sem necessidade de eliminar variáveis. É eficaz na identificação de variáveis importantes, estimação de dados faltantes mesmo em grandes volumes, e mostra robustez contra ruído e variáveis irrelevantes. Sua versatilidade permite aplicações em regressão, classificação e análise de dados não supervisionada (RODRÍGUES-GALIANO et al., 2012). O RF são modelos organizados em forma de árvore empregados tanto para categorização quanto para previsão, compostos por uma mescla de árvores de predição (floresta) desenvolvidas a partir de um vetor randômico (JAMES et al., 2013; KROESE et al., 2019).

O RF é um método de mineração de dados que permite a classificação de atributos com base na sua importância para explicar a variação em um atributo específico, como o fluxo de CO<sub>2</sub> do solo. Esta abordagem ajuda a ordenar os atributos observados segundo sua relevância para compreender melhor os fatores que influenciam determinado fenômeno (TAVARES et al., 2018). Souza (2020), estudando emissão de CO<sub>2</sub> do solo em pastos degradado, manejado, e consórcio SSP no Cerrado para analisar a emissão em escala espacial e temporal através de atributos químicos utilizando aprendizado de máquinas, concluiu que essa ferramenta consegue auxiliar a explicação desse fluxo em relação as variáveis químicas e físicas como temperatura e umidade.

Gonçalves (2023), em seus estudos usou algoritmo aprendizado de máquina para modelar a produtividade de cana-de-açúcar comparando dois modelos, árvore de decisão e RF, e de acordo com o autor, o segundo mostrou melhor desempenho preditivo para a cultura em comparação ao primeiro modelo. Para RF, o R<sup>2</sup> foi superior à 56% e RMSE inferior a 18,2 t ha<sup>-1</sup>, enquanto para a árvore de decisão, o R<sup>2</sup> foi superior à 43% e RMSE inferior à 23,4 t ha<sup>-1</sup> em termos de números.

Pesquisas recentes aplicando técnicas de aprendizado de máquina para previsão do comportamento das emissões de CO<sub>2</sub> conseguiram obter bons resultados, Vicentini et al. (2023) estimaram as mudanças ao longo do tempo nas emissões de CO<sub>2</sub> relacionadas à absorção de oxigênio pelo solo (O<sub>2</sub>) em uma área do Cerrado brasileiro que foi reflorestada com vegetação nativa. Segundo os autores,

esses estudos ajudaram a entender melhor como ocorre a respiração do solo nesse ecossistema.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Caracterização das áreas de estudo

O experimento foi conduzido em uma área localizada em Selvíria, Mato Grosso do Sul com coordenadas 20° 22' 31" de latitude Sul e 51° 24' 12" de longitude Oeste a 363 m acima do nível do mar, na Faculdade de Engenharia (Unesp). O clima da região foi classificado de acordo com o Sistema Internacional de Köppen, tropical úmido (Aw), com estações chuvosas no verão e seca no inverno. As médias anuais observadas precipitações são de 1.370 mm, temperatura 23,5 °C e umidade relativa do ar entre 70 e 80%. O solo das áreas experimentais foi classificado de acordo com as normas da Embrapa como Latossolo Vermelho distrófico típico argilosa (SANTOS et al., 2013).

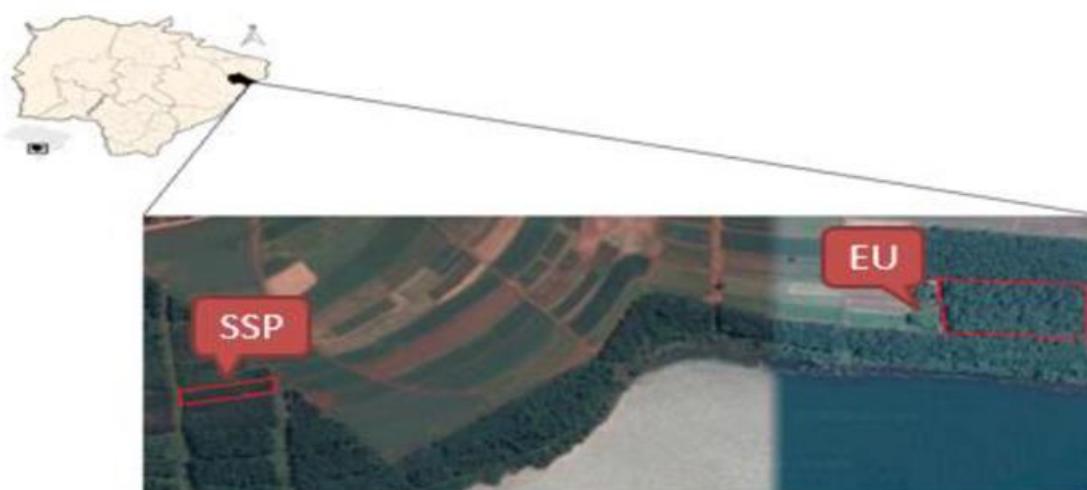


**Figura 1.** Localização geográfica das áreas utilizadas em Selvíria-MS.

Fonte: Oliveira (2018).

Os locais de avaliação foram escolhidos por retratarem as características dos usos do solo típicos da região onde as mudanças de uso ocorreram em áreas próximas, com o mesmo tipo de solo, variações de temperatura e regime de chuvas. As áreas eram constituídas por vegetação nativa do cerrado até a década de 1970, oito anos depois (1978) foram desmatadas para plantação de culturas anuais de milho, algodão e soja até 1986 (CAVENAGE et al., 1999; SOUZA; ALVES, 2003).

Entre 1986 e 1987 as áreas começaram a serem utilizadas para o uso de floresta plantada de eucalipto (EU) e sistema silvipastoril (floresta de aroeira em consórcio com capim braquiária - SSP).

A formação da área de Eucalipto ocorreu em 26 de abril de 1986, na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da Faculdade de Engenharia (FEPE), situada no município de Selvíria-MS (Figura 1a). Esta área foi estabelecida com uma população inicial de *Eucalyptus camaldulensis*, plantadas em um espaçamento de 4,0 × 4,0 metros, abrangendo uma extensão total de 3 hectares. Desde então, não foram aplicadas práticas de adubação e calagem. Na época da formação, as mudas-matrizes de *Eucalyptus camaldulensis* foram produzidas no viveiro da Companhia Energética de São Paulo (CESP), localizado em Ilha Solteira – SP. As sementes utilizadas para a produção das mudas foram fornecidas pelo Centro Nacional de Pesquisa de Florestas (CNPQ) da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) (SILVA, 2010).

A população de aroeira (*M. urundeuva*), proveniente de testes de progênies, foi implantada em dezembro de 1987 na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da Faculdade de Engenharia em Ilha Solteira/UNESP, localizada em Selvíria – MS. Essa plantação foi estabelecida com um espaçamento de 3,0 × 3,0 m, cobrindo uma área total de 1 hectare. Ao longo do tempo, esse sistema evoluiu naturalmente para um sistema silvipastoril, com a proliferação espontânea do capim braquiária (*Brachiaria decumbens*), cujas sementes já estavam presentes na área como parte do banco de sementes (Figura 1b). Notavelmente, até o momento atual, não foram aplicados quaisquer tratos culturais específicos na condução dessa gramínea.

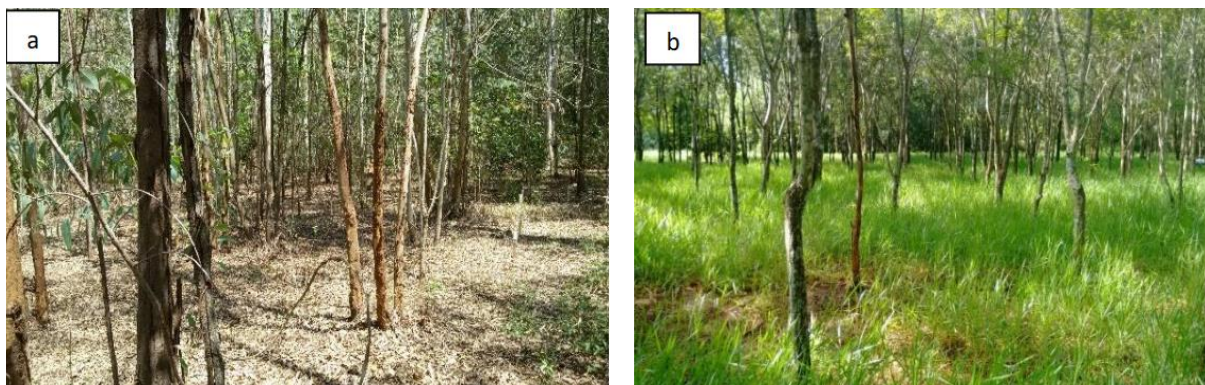


**Figura 2.** Foto das áreas de estudo, localizada em Selvíria-MS. a) *Eucalyptus camaldulensis*; b) sistema silvipastoril (*M. urundeuva* e *B. decumbens*). Fonte: Oliveira (2017).

### 3.2. Avaliação da emissão de CO<sub>2</sub> (FCO<sub>2</sub>), temperatura e umidade do solo

Foram instaladas duas malhas amostrais, uma de 100 × 100 m contendo 102 pontos na área de EU (Figura 5a) e outra com 86 pontos amostrais no SSP, com regiões de adensamento de distâncias mínimas entre pontos de 5 m. Em cada ponto foi registrada a FCO<sub>2</sub> por meio do sistema LI-COR (LI-8100), originário de Nebraska, EUA. Em sua modalidade de medição, o sistema monitorizou as variações na concentração de CO<sub>2</sub> dentro da câmara utilizando a técnica de espectroscopia no infravermelho. A câmara destinada a amostras de solo possui um volume interno de 854,2 cm<sup>3</sup>, apresentando uma área de contato circular de 83,7 cm<sup>2</sup>. Esta câmara foi posicionada sobre colares de PVC com diâmetro de 0,10 m, previamente inseridos no solo em cada ponto amostral, a uma profundidade de 0,03 m. Uma vez que a câmara estava fechada, o processo de medição levou 1 minuto e 30 segundos em cada ponto para a determinação da FCO<sub>2</sub>. Dentro da câmara, a concentração de CO<sub>2</sub> foi analisada a cada intervalo de 2,5 segundos.

O sensor de temperatura de haste foi utilizado para registrar a temperatura do solo (Ts). Este sensor foi inserido no solo a uma profundidade de 0,05 m, próxima ao local onde os colares de PVC foram anteriormente instalados. Para medir a umidade do solo (Us), empregou-se um equipamento de TDR (Reflectometria no Domínio do Tempo - Hydrosense TM, Campbell Scientific, Austrália). Esse dispositivo avaliou a umidade disponível do solo em termos percentuais de volume na camada de 0,00 a 0,12 m de profundidade.

As avaliações de FCO<sub>2</sub>, Ts e Us foram realizadas no período de 17 de fevereiro a 17 de junho de 2017, durante o período da manhã entre 7 e 10h, totalizando cinco períodos de leituras (17 de fevereiro, 15 de março e 03, 10 e 17 de junho) para o EU e cinco períodos (22 de fevereiro, 17 de março e 03, 10 e 17 de junho) para o SSP.

### **3.3. Avaliação dos atributos do solo**

Ao término do período de monitoramento e avaliação da FCO<sub>2</sub>, temperatura e umidade, compreendido entre os meses de setembro a novembro de 2017, procedeu-se à coleta de amostras de solo em cada ponto das malhas amostrais, nas profundidades de 0,00 a 0,10 m. Estas amostras foram submetidas à secagem ao ar antes de qualquer análise adicional. Após o processo de secagem, as amostras foram desagregadas e passaram por uma peneira de malha 2 mm.

Para a caracterização química foram conduzidas análises de rotina, incluindo a determinação dos seguintes atributos: teor de matéria orgânica (MO), quantidade de fósforo (P) disponível, potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e acidez potencial (H+Al). Além disso, foram calculados a soma de bases (SB), a saturação por base (V%) e a capacidade de troca de cátions (CTC). A extração de Ca, e K trocáveis, assim como o P disponível, foi realizada por meio do método de resina trocadora de íons (RAIJ et al., 2001).

Para a avaliação das características físicas do solo, foram conduzidas as seguintes análises: densidade do solo (Ds), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e porosidade total (PT). A Ds foi determinada em amostras indeformadas coletadas utilizando um amostrador adaptado a cilindros com dimensões médias de 0,05 m de diâmetro interno e 0,04 m de altura (EMBRAPA, 1997). O estoque de carbono (Mg ha<sup>-1</sup>) foi calculado multiplicando a concentração de carbono (g kg<sup>-1</sup>) pela densidade do solo Ds (g dm<sup>-3</sup>) e pela espessura da camada de solo equivalente (m), o EstC foi calculado com base na massa equivalente do solo (Carvalho et al., 2009).

A análise da distribuição de poros por tamanho, macroporosidade (Ma) e microporosidade (Mi) foi realizada empregando um funil de placa porosa sob uma tensão equivalente a 0,6 metros de coluna d'água em amostras que foram previamente saturadas. Nessa condição, o volume de água retido na amostra corresponde aos microporos, enquanto os macroporos foram calculados por diferença (EMBRAPA, 1997). A porosidade total (PT) foi obtida pela soma dos valores de Ma e Mi.

Para avaliar o grau de humificação da matéria orgânica (HLIFS) foram realizadas análises de fluorescência induzida por laser (LIFS) em setembro de 2017. Essa técnica (LIFS) fundamenta-se na excitação das amostras de solo por meio de um laser na região ultravioleta/azul, resultando na fluorescência de grupos funcionais da matéria orgânica, correlacionados ao processo de humificação (Milori et al., 2006).

A equação para a determinação do HLIFS foi proposta por Milori et al. (2006), apresentada a seguir:

$$HFII = \frac{fA}{tC} \quad (1)$$

Em que fA corresponde a área de fluorescência sob o espectro e tC é o teor de carbono total.

Inicialmente, foram confeccionadas duas pastilhas por amostra de solo, cada uma com dimensões de 10 mm de diâmetro e 2 mm de espessura. Estas pastilhas, com massa aproximada de 0,5 g, foram produzidas mediante o uso de uma prensa hidráulica, aplicando-se uma carga de 12 toneladas por um período de 3 minutos. A captura dos espectros LIFS foi conduzida por um sistema montado pela Embrapa Instrumentação Agropecuária.

Cada espectro LIFS obtido para uma amostra de solo teve sua área dividida pelo correspondente teor de carbono, determinado por meio do método de combustão úmida ou análise por dicromato. Este procedimento resultou nos sinais de fluorescência normalizada, os quais foram então definidos como indicadores do grau de humificação da matéria orgânica do solo (HLIFS).

### 3.4. Processamento e análise de dados

Inicialmente foi investigada a variabilidade temporal da FCO<sub>2</sub>, temperatura, umidade por meio da análise da variância. Posteriormente, as médias dos atributos químicos e físicos do solo nos manejos EU e SSP foram comparados por meio do teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Foram cinco dias de avaliação da FCO<sub>2</sub> no manejo EU (17/02, 15/03, 03/06, 10/06 e 17/06) e SSP (22/02, 17/03, 03/06, 10/06 e 17/06) e as relações entre a emissão nesses dias com os atributos do solo coletado ao final dessas avaliações foram previstas por aprendizado de máquina com algoritmo Random Forest. O banco de dados foi dividido em treinamento e teste para realizar a predição. Assim, 75% dos dados foram utilizados para treinar o modelo e 25% para testá-lo. O algoritmo Random

Forest ajustou múltiplas árvores de decisão de várias subamostras do conjunto de dados e usou uma árvore média para melhorar a precisão preditiva e controlar o *overfitting*. A eficiência das predições foi avaliada pelo coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

Foi empregada a análise geoestatística para caracterizar o padrão de variabilidade espacial dos valores observados e preditos. A variabilidade espacial foi analisada utilizando a modelagem do semivariograma experimental, tendo em vista a teoria das variáveis regionalizadas (VIEIRA, 2000).

Para o ajuste dos modelos aos semivariogramas experimentais foram utilizados os modelos teóricos: exponencial, esférico e gaussiano. Estes modelos derivados dos semivariogramas experimentais foram, então, empregados na previsão dos atributos em locais não amostrados por meio da técnica de krigagem ordinária (KO).

Os semivariogramas foram modelados utilizando o programa GS+ (ROBERTSON, 1998). Os mapas de isolinhas foram gerados no software Surfer versão 9.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1. Variação temporal da FCO<sub>2</sub>, temperatura e umidade do solo em floresta plantada de eucalipto (EU)**

No solo sob plantio de EU as médias diárias da FCO<sub>2</sub> variaram ao longo do tempo (Tabela 1 e Figura 2a). A maior média de emissão foi observada no mês de fevereiro (7,22  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) e a menor no mês de junho (3,31  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), em relação a temperatura as maiores médias diárias também foram observadas nos meses de fevereiro (27,8 °C) e março (27,9 °C) diminuindo consideravelmente nos meses de junho (20,1 a 22,8 °C) (Figura 2b) (Tabela 1 e Figura 2b).

Houve baixa variação na umidade do solo (10,7 a 12,8%) ao longo do período, com exceção do último dia de avaliação (6,9%) (Tabela 1 e Figura 2c), indicando um efeito sazonal, embora não tenha ocorrido eventos de precipitação nesse período.

Outros autores também identificaram o efeito de elevações da temperatura do solo e do ar na maior emissão de CO<sub>2</sub> do solo (ACRECHE et al., 2014; KARHU et al., 2014; XAVIER et al., 2020; MOITINHO et al., 2021). Shrestha et al. (2013) destacaram a importância de avaliar cuidadosamente a temperatura do solo ao estudar a emissão de CO<sub>2</sub>, uma vez que a temperatura do solo desempenha um papel crucial na modulação da dinâmica de CO<sub>2</sub> em sistemas agrícolas. Quando as temperaturas são

mais altas e os solos estão mais oxigenados, há um estímulo à atividade microbiana. Esse aumento na atividade microbiana leva a uma maior liberação de CO<sub>2</sub> para a atmosfera (LAL, 2009).

Outro ponto importante a ser destacado é o papel dos sistemas agrícolas associados a essa relação, ou seja, as características do material vegetal depositado no solo e a fisiologia de raízes, uma vez que a temperatura do solo é um dos principais fatores climáticos que influenciam a taxa de decomposição da cobertura vegetal, atuando também na velocidade das reações químicas, como um fator controlador associado a degradação rápida ou lenta da matéria orgânica (TULLIO, 2019) e consequentemente as taxas de respiração do solo.

Isso se deve, muito provavelmente, ao fato de que os processos de respiração e decomposição estão associados às atividades de microrganismos e raízes, que dependem da temperatura e da disponibilidade de água no solo (DAVIDSON; JANSSENS, 2006; DING et al., 2010). A distribuição das raízes das plantas de EU sobre o perfil do solo pode estar contribuindo para alterações nas taxas de CO<sub>2</sub>, ou seja, pode estar havendo uma predominância de respiração autotrófica no sistema EU, a menor disponibilidade de água geralmente leva a adaptação das plantas, investindo mais no desenvolvimento de suas raízes, especialmente de forma mais vertical (REIS et al., 2006).

O sistema sob plantio de EU apresentou baixos valores de umidade do solo (Tabela 1 e Figura 2c), isso possivelmente decorre em função dos sistemas radiculares característicos da espécie, a dinâmica das raízes finas para manutenção das raízes de sustentação, ocasiona maior taxa de renovação das raízes finas, influenciando diretamente na maior necessidade de absorção de água do solo (MARTINS et al., 2004).

Estudo realizado na China indicam que o crescimento e a renovação contínua de raízes finas também contribuem para o aumento de C e nutrientes no solo. Contudo, uma maior quantidade e massa dessas raízes não garantem, por si só, um incremento significativo nos estoques de C do solo, uma explicação plausível para isso é que a dinâmica de ciclagem das raízes finas desempenha um papel fundamental além de sua simples acumulação (ASAYE; ZEWDIE, 2013). O aumento de carbono no solo oriundo de raízes finas é influenciado pela sua velocidade de decomposição, a qual é determinada por características genéticas das plantas e condições ambientais (HOBBIE et al., 2010; SOLLY et al., 2014).

Esta adaptação resulta em maiores emissões de CO<sub>2</sub>. De acordo com Gonçalves e Passos (2000); Gonçalves et al. (2006), um aumento na alocação de C para as raízes, resultando em uma maior proporção de raiz em relação à parte aérea é frequentemente associado a um sistema radicular mais profundo, o que permite às plantas acessarem água em camadas mais profundas do solo. Como resposta à escassez de água, as plantas adotam várias estratégias.

Estas incluem a perda de folhas ou a redução da sua área, diminuição da transpiração, descarte de raízes superficiais e um aumento nas raízes mais profundas (REIS et al., 2006). A menor cobertura vegetal origina temperaturas mais elevadas, aumentando também a atividade microbiana e em decorrência disso maior FCO<sub>2</sub> (Costa et al., 2008). A deposição da cobertura vegetal no solo é um fator controlador das emissões, conforme já discutido, a ação microbiana é acelerada pela Ts elevada acelerando também a taxa de mineralização do C (USSIRI; LAL, 2009).

**Tabela 1** - Análise descritiva para a emissão de CO<sub>2</sub>, umidade e temperatura do solo nos dias estudados de fevereiro a junho na área de eucalipto.

| Dia                                                             | Média   | EP   | CV    |
|-----------------------------------------------------------------|---------|------|-------|
| Emissão CO <sub>2</sub> (μmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ) |         |      |       |
| 17/02                                                           | 7,22 A  | 0,25 | 35,55 |
| 15/03                                                           | 4,47 B  | 0,21 | 48,52 |
| 03/06                                                           | 4,04 BC | 0,15 | 36,40 |
| 10/06                                                           | 3,31 C  | 0,15 | 46,92 |
| 17/06                                                           | 4,24 B  | 0,15 | 34,65 |
| Dia                                                             | Média   | EP   | CV    |
| Temperatura (°C)                                                |         |      |       |
| 17/02                                                           | 27,82 A | 0,07 | 2,54  |
| 15/02                                                           | 27,96 A | 0,03 | 1,04  |
| 03/06                                                           | 21,34 D | 0,06 | 2,81  |
| 10/06                                                           | 22,02 C | 0,06 | 2,90  |
| 17/06                                                           | 22,87 B | 0,05 | 2,01  |
| Dia                                                             | Média   | EP   | CV    |
| Umidade (%)                                                     |         |      |       |
| 17/02                                                           | 11,39 B | 0,19 | 16,67 |
| 15/02                                                           | 11,46 A | 0,21 | 18,76 |
| 03/06                                                           | 12,74 A | 0,25 | 19,64 |
| 10/06                                                           | 10,72 B | 0,26 | 24,68 |
| 17/06                                                           | 6,87 C  | 0,21 | 31,15 |

EP= Erro-padrão da média; CV= Coeficiente de variação (%). Fonte: Oliveira (2018).

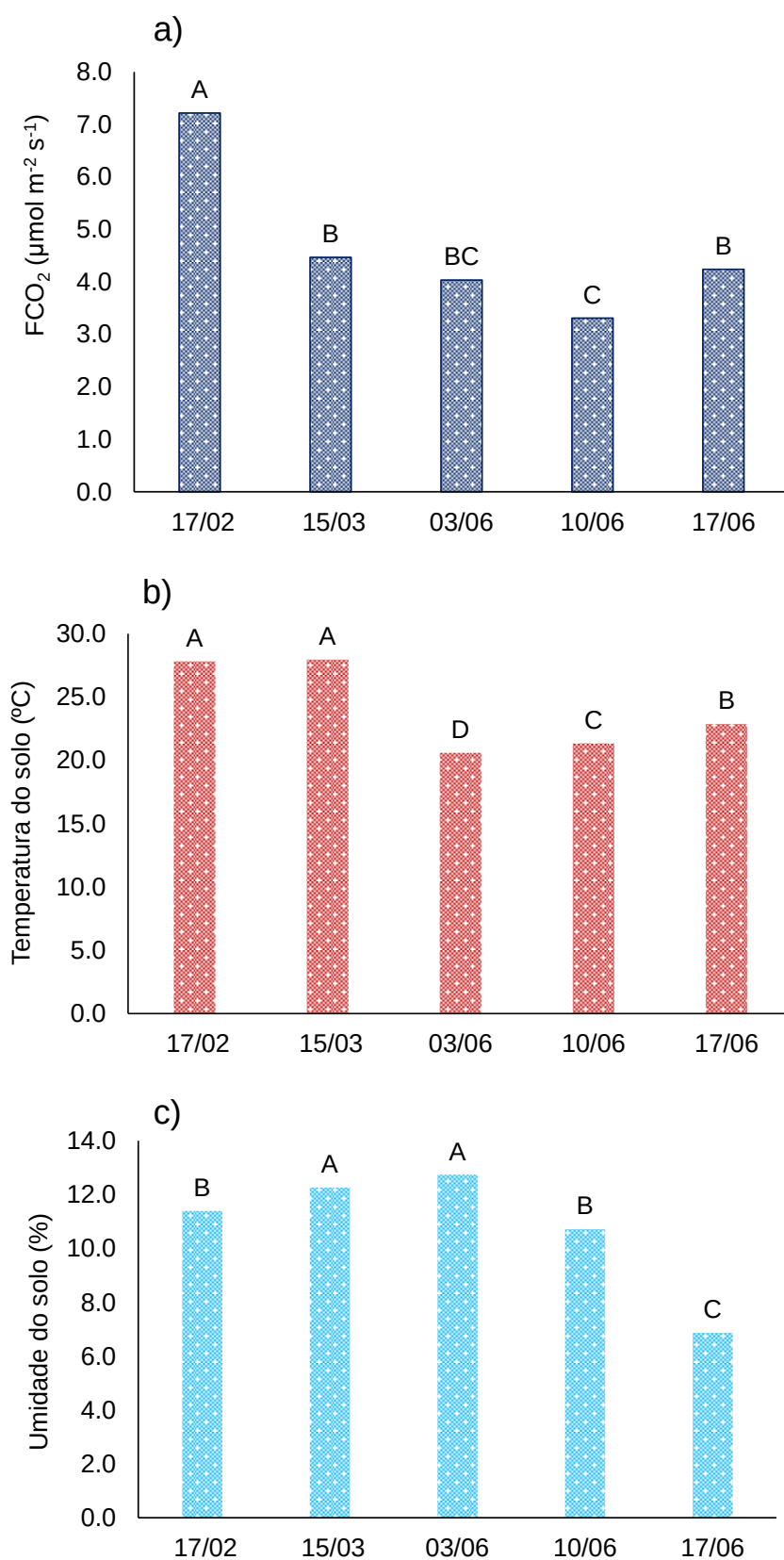


**Figura 2.** Médias diárias da emissão de CO<sub>2</sub> (a), temperatura (b) e umidade do solo (c) ao longo dos períodos de avaliação. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

#### 4.2. Variação temporal da FCO<sub>2</sub>, temperatura e umidade do solo em sistema silvipastoril (SSP)

O sistema SSP também apresentou variabilidade para as emissões de CO<sub>2</sub>, com as maiores médias observadas em 22/02 (4,90  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) e 17/03 (4,53  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) e as menores em 10/06 (2,56  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) e 17/06 (2,97  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) (Tabela 2 e Figura 3a). Efeito similar à FCO<sub>2</sub> foi observado também para a temperatura do solo, apresentando as maiores médias nos dias 22/02 (28,6 °C) e 17/03 (23,5 °C) e a menor no dia 10/06 (19,5 °C) (Tabela 2 e Figura 3b). Para a umidade do solo observou-se maior variação entre as médias diárias, com a maior média em 17/03 (30,05%) e a menor em 03/06 (8,52%) (Tabela 2 e Figura 3c).

De acordo com Lopes et al. (2013), os ecossistemas equilibrados tendem a apresentar menores taxas de respiração do solo, uma vez que a cobertura vegetal do solo, característica desses sistemas, fornece material em diferentes níveis de decomposição e complexidade dos resíduos vegetais, resultando em menores taxas de respiração do solo, sem, contudo, limitar a atividade microbiológica. Inicialmente, os microrganismos decompõem os resíduos mais facilmente decomponíveis, aumentando as taxas de respiração do solo. Com o tempo, essa decomposição torna-se mais lenta e diminui a liberação de CO<sub>2</sub>, tornando o processo mais eficiente e estável (AZAR et al., 2013; DARENOVA et al., 2021; HARTMANN et al., 2023). Esse efeito propiciado pela cobertura vegetal é característico de sistemas que adotam a integração de árvores com outras culturas e, acredita-se que pode elucidar o fato de o sistema SSP apresentar menores valores de FCO<sub>2</sub> (Figura 3a), uma vez que o sistema SSP pode estar nesse estágio no qual a decomposição dos resíduos e a atividade microbiológica é mais lenta. Geralmente as agroflorestas que associam diferentes culturas em consórcio ao exemplo do sistema SSP, tendem a apresentar menor FCO<sub>2</sub> (TORRES et al., 2017; FREITAS et al., 2020).

As condicionantes climáticas avaliadas nesse estudo, como a temperatura e a umidade do solo também apresentaram variação temporal (Figura 3b e 3c). Os valores médios diários da FCO<sub>2</sub> foram positivamente correlacionados aos valores da temperatura do solo ( $r = 0,80$ ;  $p < 0,05$ ). Em contrapartida, para a umidade do solo a análise de correlação foi não significativa ( $p > 0,05$ ).

Quando ocorre a substituição das árvores pelas lavouras, não somente a temperatura e a umidade do solo são prejudicadas mas também, a temperatura de toda uma região, Lapola et al. (2014) discutem que a expansão das terras agrícolas,

no bioma Cerrado sobre a vegetação nativa influencia drasticamente no albedo e na evapotranspiração causando um aquecimento regional médio de  $\sim 1,6$  °C impulsionado principalmente pela substituição dessa vegetação natural por terras agrícolas com pastagens em monocultivo e esse aumento acentuado do albedo é causado pela diminuição do índice de área foliar. No Cerrado, enfrenta-se um desafio maior devido ao breve período chuvoso e às culturas que produzem pouca palha para cobertura do solo, além da rápida decomposição das palhadas existentes (ANDRADE et al., 2018).

Por isso a associação de árvores com pastagens é promissora para áreas de Cerrado, uma vez que em sistemas agroflorestais observa-se um aporte constante de material orgânico ao solo, impulsionado pela variedade de espécies arbóreas e pela cobertura vegetal, o que contribui para a melhoria dos atributos químicos e físicos do solo (LOSS et al., 2014), além de favorecer o armazenamento de carbono e menores perdas de C na forma de  $\text{CO}_2$  (C- $\text{CO}_2$ ).

Em relação à umidade do solo nesse sistema, todavia os valores médios de  $U_s$  foram mais elevados (Figura 3c). Com base nesses achados, conclui-se que a combinação da interceptação solar no dossel da aroeira com a proteção proporcionada pela biomassa da braquiária pode criar um microambiente que favorece a conservação da umidade do solo.

Altos níveis de umidade podem tanto reduzir quanto aumentar a  $\text{FCO}_2$  do solo, sendo que em sistemas convencionais, esse aumento na emissão é mais notável que em sistemas conservacionistas (LA SCALA et al., 2009). Partindo do pressuposto que a  $U_s$  pode inibir ou potencializar a produção de  $\text{CO}_2$ , pois melhora as condições de  $T_s$  oferecendo suporte para a atividade microbiana, no consumo de  $\text{O}_2$  e consequentemente na produção de  $\text{CO}_2$  (XU et al., 2004; GRITSCH et al., 2015; MACCARTHY et al., 2018), compreende-se, por exemplo, a maior  $\text{FCO}_2$  para fevereiro, associado a maior temperatura com consequente redução na umidade do solo (Figura 3), porém ressalta-se a importância de análises mais minuciosas para a compreensão da relação entre essas variáveis, uma vez que são covariantes.

**Tabela 2** - Análise descritiva para a emissão de CO<sub>2</sub>, umidade e temperatura do solo nos dias estudados de fevereiro a junho na área silvipastoril.

| Dia                                                             | Média    | EP   | CV    |
|-----------------------------------------------------------------|----------|------|-------|
| Emissão CO <sub>2</sub> (μmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ) |          |      |       |
| 22/02                                                           | 4,90 A   | 0,12 | 23,35 |
| 17/02                                                           | 4,53 B   | 0,09 | 17,82 |
| 03/06                                                           | 3,36 C   | 0,12 | 32,71 |
| 10/06                                                           | 2,56 E   | 0,06 | 23,38 |
| 17/06                                                           | 2,97 D   | 0,07 | 20,51 |
| Dia                                                             | Média    | EP   | CV    |
| Temperatura (°C)                                                |          |      |       |
| 22/02                                                           | 28,70 A  | 0,05 | 1,52  |
| 17/02                                                           | 23,46 B  | 0,03 | 1,05  |
| 03/06                                                           | 20,74 D  | 0,19 | 8,63  |
| 10/06                                                           | 19,63 E  | 0,13 | 6,16  |
| 17/06                                                           | 21,62 C  | 0,05 | 2,20  |
| Dia                                                             | Média    | EP   | CV    |
| Umidade (%)                                                     |          |      |       |
| 22/02                                                           | 20,81 B  | 0,52 | 23,33 |
| 17/02                                                           | 30,05 A  | 0,06 | 1,77  |
| 03/06                                                           | 8,52 D   | 0,29 | 31,26 |
| 10/06                                                           | 20,52 BC | 0,29 | 12,98 |
| 17/06                                                           | 19,52 C  | 0,29 | 13,65 |

EP= Erro padrão da média; CV= Coeficiente de variação (%). Fonte: Oliveira (2018).

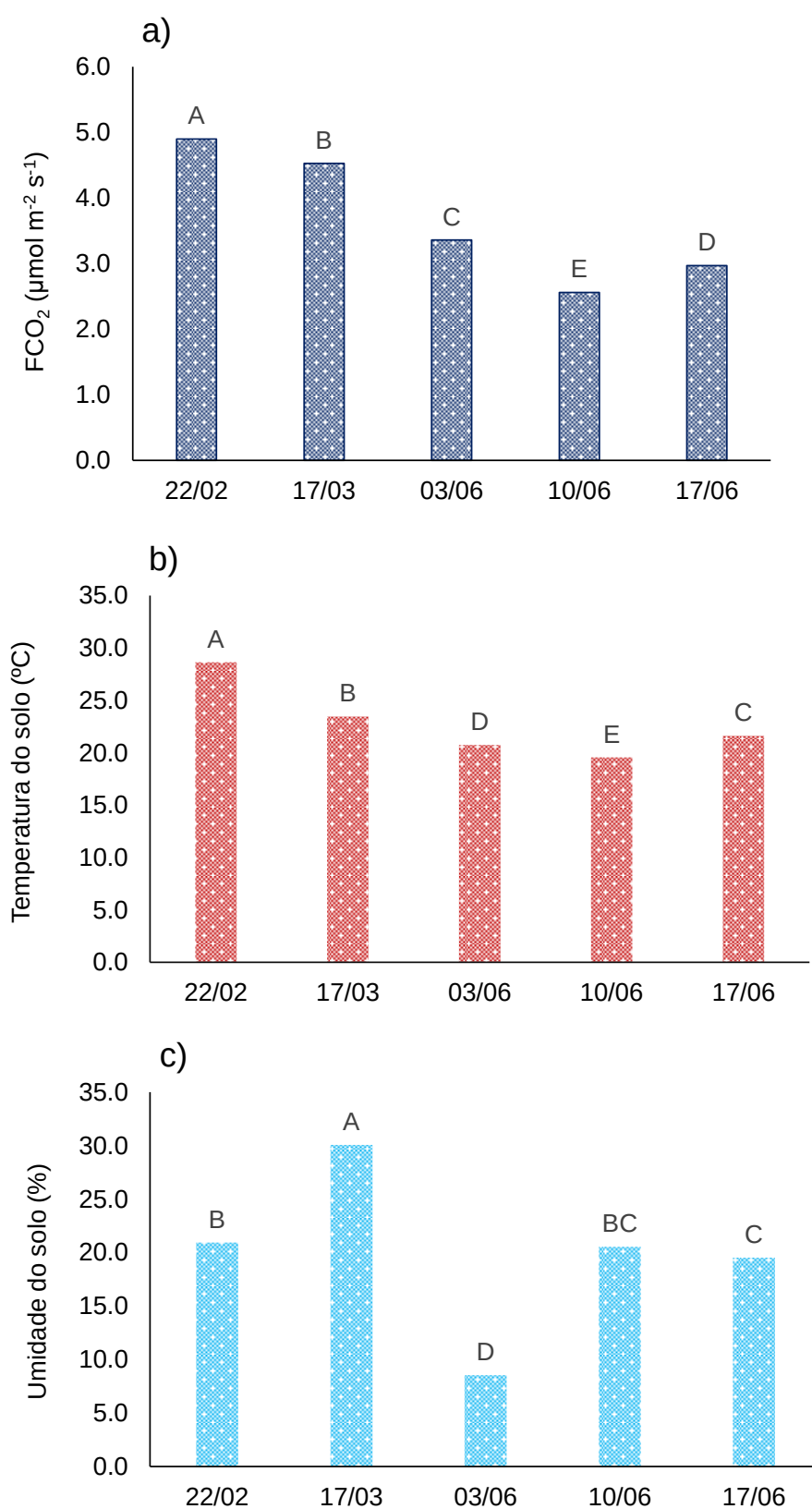


**Figura 3.** Médias diárias da emissão de  $\text{CO}_2$  (a), temperatura (b) e umidade do solo (c) ao longo dos períodos de avaliação. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

#### 4.3. Efeito dos sistemas nos atributos do solo

Todos os atributos químicos e físicos investigados no estudo apresentaram diferenças significativas ( $p < 0,05$ ) quando avaliados os diferentes sistemas de manejo, com exceção da macroporosidade do solo (Ma) (Tabela 3 e Figura 4).

O solo sob plantio de EU apresentou maior fertilidade em relação ao solo sob SSP quando observamos as médias de P, Ca, Mg e V%, associados a menor acidez do solo (H+Al e Al), consequentemente esse solo apresentou maior teor de MO ( $31,31 \text{ g dm}^{-3}$ ) e EstC ( $21,75 \text{ Mg ha}^{-1}$ ). Entretanto o grau de mineralização da MO (Hlifs) também é maior nesse sistema ( $36.657,95 \text{ u.a.}$ ) em relação ao SSP ( $30.853,08 \text{ u.a.}$ ), indicando a presença de microrganismos mais ativos. Essas características do sistema EU certamente são cruciais para entender a dinâmica do fluxo de  $\text{CO}_2$  nesse sistema. Entretanto ao se considerar que esse sistema também apresenta maior potencial de EstC, entende-se que o mesmo ao longo do tempo pode tender a estabilizar essa dinâmica em relação ao fluxo mais elevado.

A relação entre a  $\text{FCO}_2$ , EstC, MO e Hlifs é discutida em vários estudos (PANOSSO et al., 2011; XAVIER et al., 2020; SILVA et al., 2020; MOITINHO et al., 2021), podendo ser explicado pelos maiores teores de MO nesse sistema que possivelmente ocorreram pela presença de resíduo na superfície em diferentes níveis de recalcitrância e estágio de decomposição, além de condições ideais de Ts e Us para a ciclagem de nutrientes nesse sistema, para Strosser (2010), a MO eleva os níveis de Hlifs, em estudo realizado por Xavier et al. (2020), os autores verificaram relação inversa entre a  $\text{FCO}_2$  e a Hlifs do solo, fato esse que pode estar relacionado com o C lábil, fração mais estável da MO este por sua vez tem maior degradação pela atividade dos microrganismos em consequência disso ocorre o aumento da emissão e a diminuição da Hlifs. Panosso et al. (2011) em seu estudo indicaram que o C originado da MO em decomposição não foi a principal contribuição para o fluxo de  $\text{CO}_2$  do solo.

Entendendo que a Hlifs mede a forma da MO morta no solo convertida em húmus (C mais ou menos lábil) pela ação de decompositores tais como bactérias e fungos, no presente estudo a relação da maior Hlifs com maior  $\text{FCO}_2$  no sistema EU pode ser indicativo de maior atividade metabólica de microrganismos nesse solo em função do acesso ao C mais lábil (Tabela 3 e Figura 4).

**Tabela 3** - Análise descritiva para as propriedades química e física do solo na profundidade de 0,00–0,10 m nas áreas de silvipastoril e eucalipto.

|                                      | Média                | EP   | CV    | Média            | EP     | CV    |
|--------------------------------------|----------------------|------|-------|------------------|--------|-------|
|                                      | <b>Silvipastoril</b> |      |       | <b>Eucalipto</b> |        |       |
| P (mg dm <sup>-3</sup> )             | 3,71 b               | 0,16 | 39,42 | 6,07 a           | 0,24   | 40,71 |
| MO (g dm <sup>-3</sup> )             | 29,16 b              | 0,36 | 11,45 | 31,31 a          | 0,58   | 18,82 |
| pH (CaCl <sub>2</sub> )              | 3,99 b               | 0,01 | 2,57  | 4,29 a           | 0,04   | 10,17 |
| K (mmolc dm <sup>-3</sup> )          | 3,12 a               | 0,17 | 49,37 | 1,33 b           | 0,05   | 34,19 |
| Ca (mmolc dm <sup>-3</sup> )         | 5,91 b               | 0,17 | 26,56 | 15,34 a          | 0,85   | 55,67 |
| Mg (mmolc dm <sup>-3</sup> )         | 7,87 b               | 0,25 | 29,98 | 13,78 a          | 0,49   | 35,55 |
| H+Al (mmolc dm <sup>-3</sup> )       | 85,99 a              | 1,75 | 18,87 | 59,70 b          | 1,76   | 29,82 |
| Al (mmolc dm <sup>-3</sup> )         | 15,24 a              | 0,36 | 21,98 | 6,22 b           | 0,45   | 72,82 |
| SB (mmolc dm <sup>-3</sup> )         | 16,90 b              | 0,48 | 26,29 | 34,23 a          | 1,89   | 55,75 |
| CTC (mmolc dm <sup>-3</sup> )        | 102,88 a             | 1,72 | 15,51 | 93,93 b          | 1,80   | 19,37 |
| V (%)                                | 16,22 b              | 0,49 | 27,74 | 35,63 a          | 1,52   | 43,14 |
| Ma (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) | 0,11 a               | 0,01 | 39,86 | 0,10 a           | 0,01   | 38,91 |
| Mi (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) | 0,42 a               | 0,01 | 8,09  | 0,34 b           | 0,01   | 14,10 |
| PT (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) | 0,53 a               | 0,01 | 5,64  | 0,44 b           | 0,01   | 14,73 |
| DS (g dm <sup>-3</sup> )             | 1,23 b               | 0,01 | 5,64  | 1,31 a           | 0,02   | 12,89 |
| EstC (Mg ha <sup>-1</sup> )          | 20,26 b              | 0,25 | 11,45 | 21,75 a          | 0,41   | 18,82 |
| HLIFS (u.a.)                         | 30853,08 b           | 386  | 11,60 | 36657,95 a       | 770,47 | 21,23 |

Médias seguidas por letras minúsculas iguais na mesma linha não diferem ao teste t-Student à 5% de probabilidade. EP = erro-padrão da média; CV = coeficiente de variação; P = fósforo disponível; MO = teor de matéria orgânica; K = potássio; Ca = cálcio; Mg = magnésio; H+Al = acidez potencial; Al = alumínio; SB = soma de bases; CTC = capacidade de troca de cátions; V(%) = saturação por base; Ma = macroporosidade; Mi = microporosidade; PT = porosidade total; DS = densidade do solo; EstC = estoque de carbono; HLIFS = grau de humificação da matéria orgânica do solo; u.a. = unidade arbitrária. Fonte: Oliveira (2018).

Os níveis de C e N no solo são afetados por fatores climáticos, tipos de vegetação, textura e manejo do solo, a forma como o solo é utilizado pode elevar ou reduzir seus EstC e N, sendo que cada tipo de solo possui uma capacidade específica para reter esses elementos (MARINHO et al., 2020). Assim, as florestas plantadas podem representar uma técnica de gestão capaz de otimizar a eficácia dos solos tanto no curto quanto no longo prazo, ao mesmo tempo em que limita as

perdas de C e os efeitos das condições climáticas (CASTAÑON et al., 2014; SILVA, 2022). Com isso, inverter as tendências de degradação das terras agrícolas, tomando medidas determinantes para recuperar ecossistemas deteriorados, representa um dos desafios ambientais mais importantes deste século (METZGER et al., 2017).

Ao verificar as características físicas, o sistema com o plantio de EU apresentou maior  $D_s$  ( $1,31 \text{ g dm}^{-3}$ ) quando comparado ao SSP ( $1,23 \text{ g dm}^{-3}$ ), e consequentemente pelo menor percentual de microporos ( $0,34 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ ) em relação ao SSP ( $0,42 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ ) (Tabela 3 e Figura 4). Embora o sistema EU apresente estas características que podem comprometer tanto a produção quanto o fluxo de gases do interior dos solos até a atmosfera (KLEIN; LIBARDI, 2002; SILVA et al., 2019), uma vez que, maiores valores de  $D_s$  e menor percentual de porosidade são indicativos de áreas compactadas; e que a compactação do solo afeta diretamente o fluxo de gases dentro dele, influenciando tanto a infiltração de oxigênio, crucial para os processos metabólicos de microrganismos aeróbicos, quanto a liberação de dióxido de carbono, resultado desses processos (TEIXEIRA et al., 2012), dentro desse cenário no sistema EU, conclui-se que a estrutura física do solo não interferiu ou está limitando a  $\text{FCO}_2$ .

A criação de camadas densas em solos submetidos a cultivo intenso ou em pastagens deterioradas provoca restrições ao desenvolvimento das raízes em profundidade, com a diminuição significativa dos macroporos e o incremento na compactação do solo, as raízes passam por alterações morfológicas e fisiológicas para se ajustarem às condições do ambiente (TAVARES et al., 2020).

Os efeitos negativos da compactação do solo no crescimento das plantas foram atribuídos principalmente à restrição do crescimento das raízes, no entanto, existem algumas evidências de que a compactação do solo também altera o tamanho, a diversidade e a atividade da comunidade microbiana (SILVA et al., 2011). Estudos indicam que a compactação do solo tem um papel crucial na atividade dos microrganismos, pois o aumento da compactação altera o tamanho e a distribuição dos poros, reduz a difusão de  $\text{O}_2$  e  $\text{CO}_2$ , aumenta os locais anaeróbios e, por consequência, diminui a atividade de microrganismos que dependem de oxigênio (TAN et al., 2005).

A menor densidade do solo associada a maior porosidade total (macro e microporosidade) encontrada no SSP (Tabela 3 e Figura 4) estão certamente

associadas à menor compactação do solo pela melhor penetração e distribuição do sistema radicular, quando comparadas ao sistema EU, as raízes das gramíneas criam macroporos que são essenciais para entrada de ar e conteúdo de água, além disso a MO fornecida pelas raízes em decomposição fornece agregados menores aumentando a microporosidade (BRADY et al., 2012; SALTON; TOMAZI, 2014).

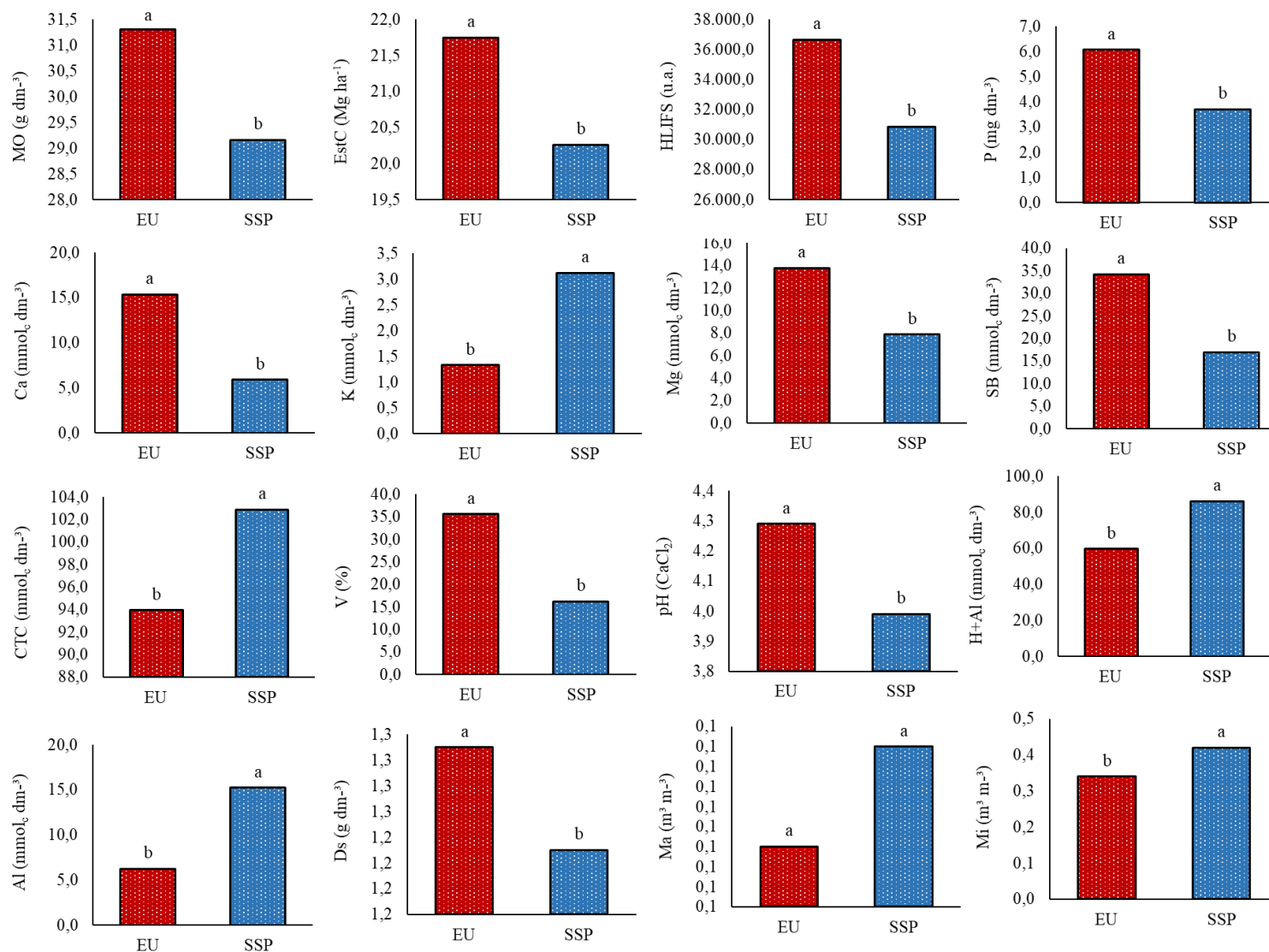


**Figura 4.** Médias dos atributos do solo nos manejos EU e SSP. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

#### **4.4 Predição da variabilidade espaço-temporal da emissão de CO<sub>2</sub> do solo por *machine learning***

Em relação aos mapas de padrões espaciais foram utilizados os mapas de krigagem ordinária (KO) para estimar a variação espaço-temporal da FCO<sub>2</sub> em EU e SSP a partir dos atributos físicos e químicos do solo, por meio do algoritmo Random Forest (Figuras 5 e 6). A partir dos mapas, pode-se observar que no sistema EU nas datas de 17/02, 15/03, 10/06, 03/06 e 17/06 não houve diferença da KO para o observado.

Em relação aos atributos do solo para a área de EU os melhores estimadores para o dia 17/02 foram a acidez potencial do solo (H+Al), o P, o EstC e a Us, para o dia 15/03 os atributos que mais se destacaram foram Ds e micro. No dia 03/06 foram Ts, H+Al, cálcio (Ca) e EstC, em 10/06 foram Ca, Hlifis, H+Al e soma de bases (SB), e em 17/06 foram Ts, Ca, H+Al e EstC. Em contrapartida, para as mesmas datas os atributos com menor poder de predição foram: Al, K, Ts, Ca, Hlifis e pH (17/02); pH, Hlifis, P, Ca, SB e K (15/03); Hlifis, P, K, Ds, pH e Al (03/06); pH, Ds, Ts, Mg, Us e P (10/06) e pH, Mg, Hlifis, P, SB e Al (17/06) (Figura 5).

Na área de SSP os melhores preditores para a data de 22/02 foram: SB, Ca, Ds e EstC, em 17/03 foram: Ca, Ts, Ds e EstC, em 03/06 foram: Us, K, Al e micro, em 10/06 foram: H+Al, K, P e Ts, e em 17/06 foram: K, H+Al, P e Ts. Os atributos de menor destaque foram: Mg, H+Al, Us, Micro, P e Ts (22/02); SB, H+Al, P, Hlifis, K e Us (17/03); Ts, SB, H+Al, P, EstC e Ds (03/06), EstC, Micro, Ds, Us, SB e Al e Ds (10/06), Micro, Al, EstC, SB e Mg (17/06) (Figura 6).

Para as datas de 22/02 e 17/06 observou-se pequenas diferenças em relação aos mapas observados e KO em função das escalas. Em contrapartida, não se observou diferenças visuais e em relação as escalas para as demais datas (Figura 6).

Uma possível explicação para atributos mais significativos para predizer a emissão em alguns dias e menos em outros dias seria as diversas interações entre o clima e a dinâmica da atividade de microrganismos tendo como resposta diferentes taxas de emissão de CO<sub>2</sub> associadas as diferentes características físico-químicas do solo ao longo do tempo (ARAÚJO et al., 2011).

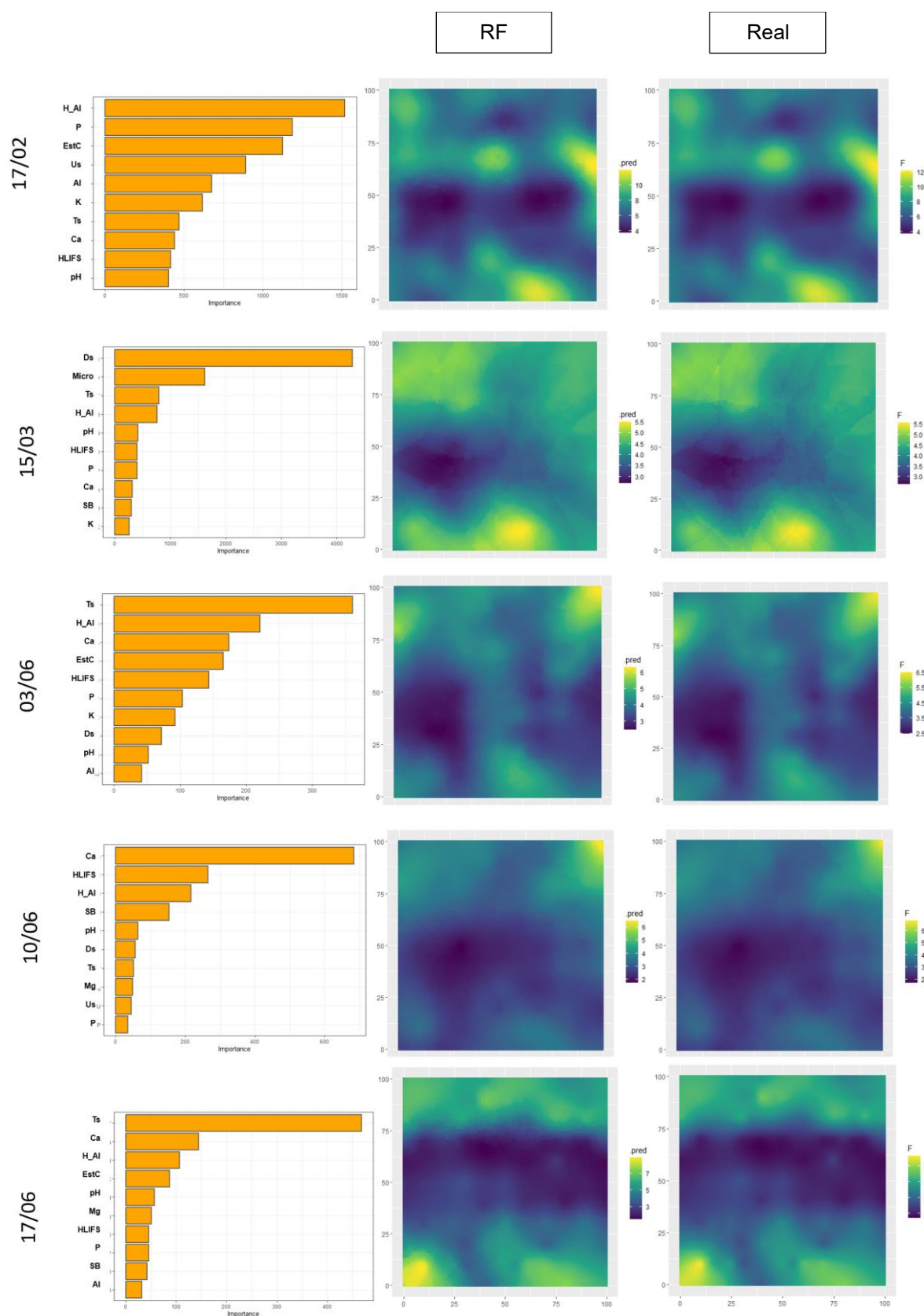


**Figura 5.** Importância de variáveis dos melhores modelos ajustados para o algoritmo de *Random Forest*, uso do solo Eucalipto (EU), para o estudo conduzido ano de 2017, Fazenda Experimental da UNESP de Ilha Solteira – Selvíria-MS.

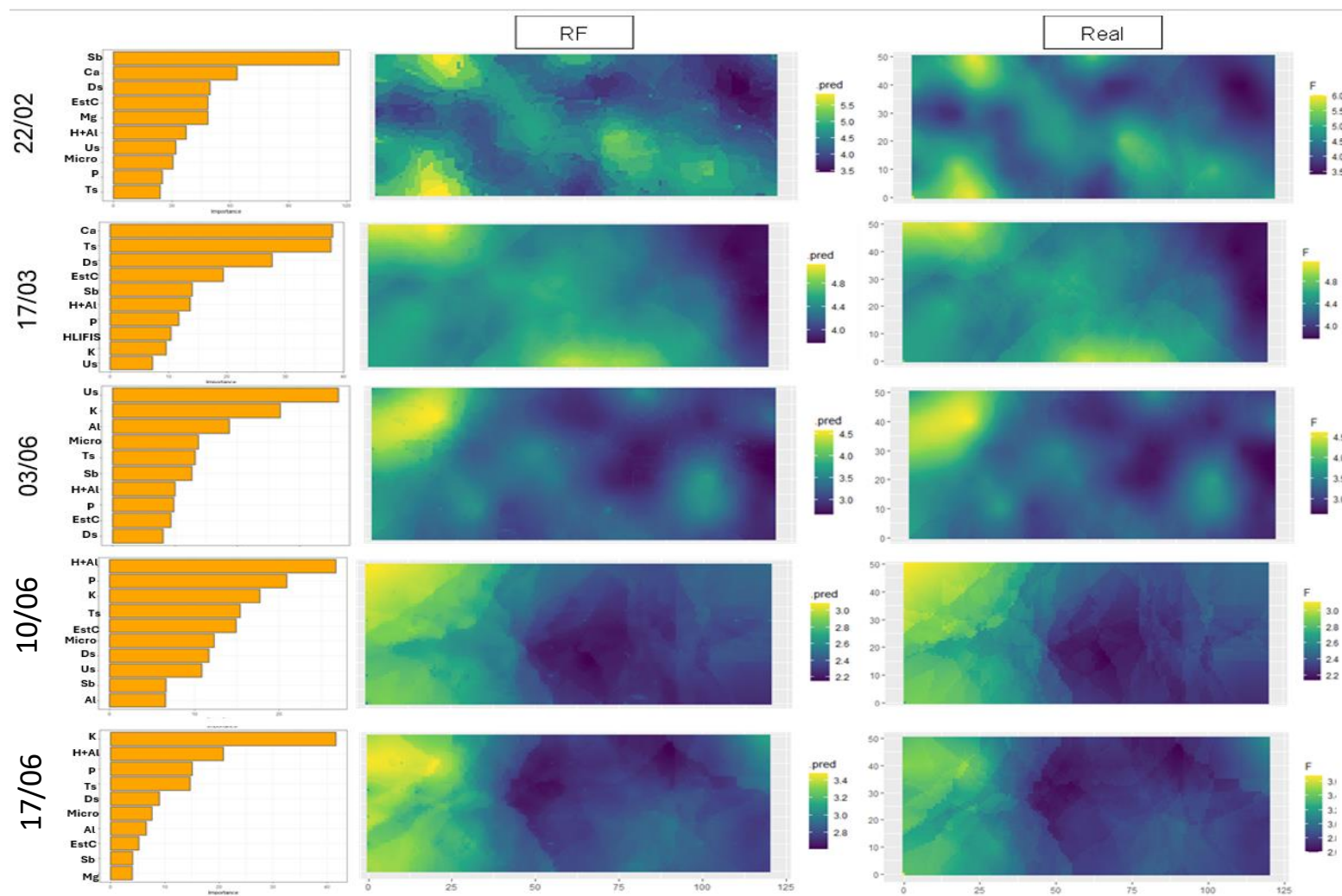


**Figura 6.** Importância de variáveis dos melhores modelos ajustados para o algoritmo de Random Forest, uso do solo Silvopastoril (SSP), para o estudo conduzido ano de 2017, Fazenda Experimental da UNESP de Ilha Solteira – Selvíria-MG

Para compreender o comportamento da média da  $\text{FCO}_2$  ( $\text{FCO}_{2\text{média}}$ ) ao longo do período de avaliação em função dos melhores estimadores foram confeccionados os mapas abaixo para EU (Figura 7) e SSP (Figura 8). Ao analisar os mapas de  $\text{FCO}_{2\text{média}}$  de forma visual, para ambos (KO e observado) não houve diferença para as escalas e os mapas apresentaram um padrão espacial muito similar nos dois sistemas. Porém quando foi analisado os mapas em relação a importância das variáveis (atributos do solo) observou-se que no sistema EU a Ds, H+Al, Ts e Ca foram os melhores estimadores para a  $\text{FCO}_{2\text{média}}$  e em SSP os melhores estimadores foram SB, Ts, EstC e macro.

Ao analisar também os mapas de padrões espaciais em função dos dias (Figuras 5 e 7) com os mapas das médias de  $\text{FCO}_2$  (Figura 8) observa-se que os atributos que mais se repetem nos dias de coleta também são os que aparecem quando feita a média, evidenciando a importância de estudar esses atributos para modelagem e mitigação da emissão de  $\text{CO}_2$  sob os sistemas EU e SSP.

Ao observarmos a associação desses atributos que foram os melhores estimadores para a  $\text{FCO}_{2\text{média}}$  nos sistemas EU e SSP, surgiu a hipótese que a inteligência artificial poderia ser capaz de identificar um possível predomínio de respiração autotrófica e heterotrófica, e indicar em qual sistema a respiração do solo pode estar mais associada ao metabolismo microbiano ou à respiração de raízes. Se a hipótese for verdadeira, pode-se dizer que há predominância de ação autotrófica em EU e heterotrófica em SSP.

Nos estudos de Panosso (2023) abordado a variação da emissão de  $\text{CO}_2$  em áreas agrícolas usando aprendizado de máquina, o autor também reporta que em área sob plantação de SSP houve maior predomínio de respiração heterotrófica e em área de EU a respiração de maior destaque foi autotrófica, e também apresentaram relação direta com o aumento da temperatura do solo. Além disso, estudo realizado em florestas indicam que a temperatura age sobre a respiração autotrófica deixando-a mais elevada do que a respiração heterotrófica (Chen et al., 2017).

A liberação de  $\text{CO}_2$  do solo para a atmosfera resulta de atividades biológicas, tais como a decomposição de substâncias orgânicas e a respiração das raízes das plantas, geralmente, a concentração de  $\text{CO}_2$  nos espaços porosos do solo é superior à encontrada na atmosfera, devido à existência de raízes e microrganismos, a temperatura eleva a emissão de  $\text{CO}_2$  tanto pela respiração autotrófica quanto a heterotrófica (D'ANDREA, 2004; SCHWARTZ et al., 2010). Nos estudos de

Vasconcelos (2014) realizado em sistema EU considerando a variação da emissão de CO<sub>2</sub> no solo, o autor observou que a liberação de CO<sub>2</sub> nessa área apesar de estar associado a presença de microrganismos mais próximos das raízes em busca de nutrientes para suas atividades metabólicas, a maior contribuinte da liberação desse gás para a atmosfera pode estar mais associada a respiração autotrófica do que a heterotrófica.

Em vista disso, compreende-se que no presente estudo, as características físicas do solo como a Ds, as químicas como H+Al e Ca associadas a fatores climáticos, como a Ts podem estar favorecendo maior respiração de raiz no sistema EU e esses são os fatores que podem explicar as maiores variações nas taxas diárias da FCO<sub>2</sub>, corroborando, a correlação observada anteriormente para as médias diárias da FCO<sub>2</sub> com as médias diárias da temperatura do solo ( $r = 0,53$ ;  $p < 0,05$ ) quando analisada a variação temporal da FCO<sub>2</sub>, temperatura e umidade do solo.

Na pesquisa de Oliveira et al. (2018) com variabilidade espacial da emissão de CO<sub>2</sub> e estoque de carbono do solo em áreas de EU e sistema SSP, os autores discutem que uma das causas para a variações na respiração dos microrganismos está ligada a concentrações de H+Al presentes no solo. Para Silva (2021), a liberação de CO<sub>2</sub>, a temperatura e a compactação do solo estão diretamente interligados e possuem uma relação inversa com a acidez potencial, o carbono orgânico, o cálcio, a capacidade de troca de cátions e os microporos.

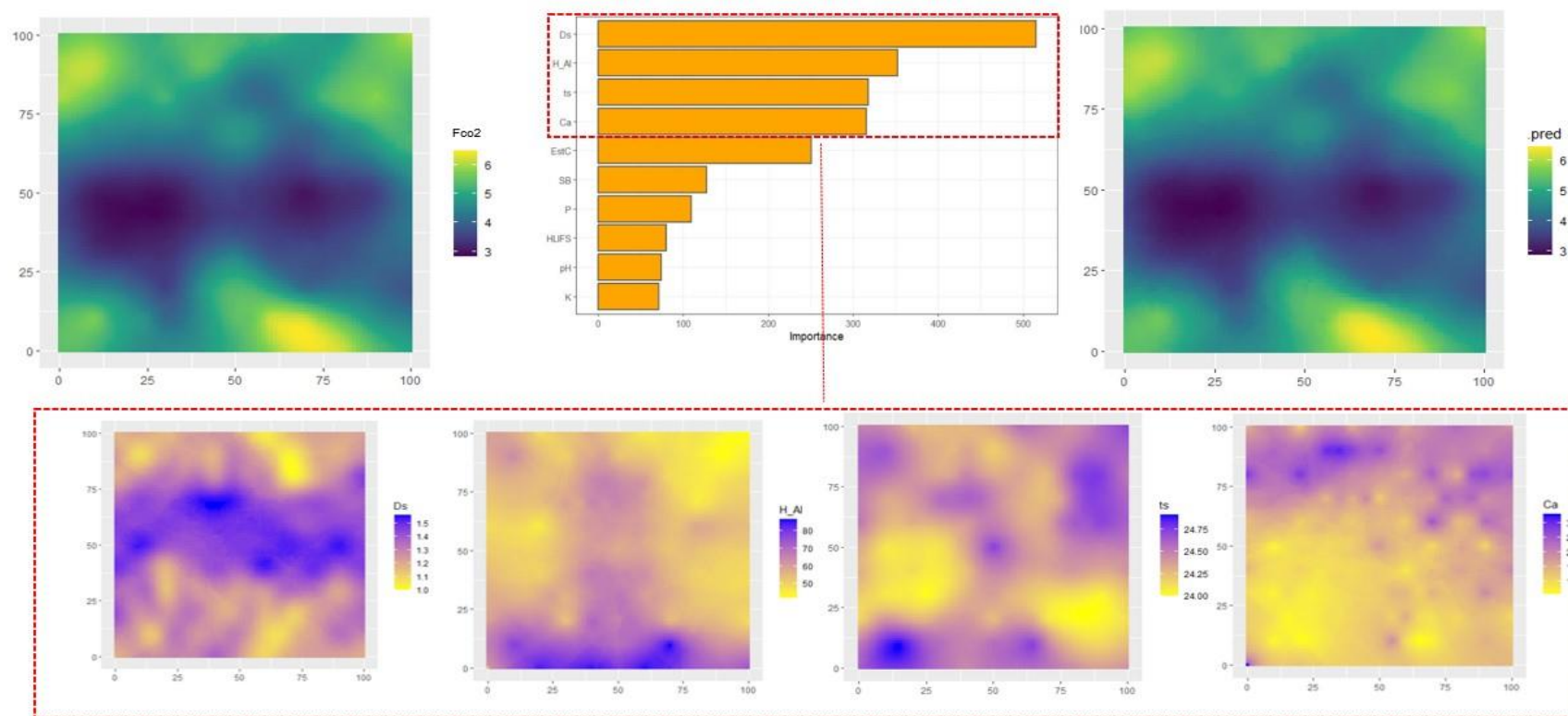


**Figura 7.** Mapa espacial da média da FCO<sub>2</sub> ao longo do período e dos melhores estimadores ajustados para o algoritmo de Random Forest, uso do solo Eucalipto (EU).

Na sequência observando os atributos que melhor estimaram a  $FCO_{2m\acute{e}dia}$  do solo sob SSP (SB, Ts, EstC e macro) por meio de aprendizado de máquina (Figura 8), há indícios de predominância de respiração heterotrófica, ou seja, o processo bioquímico de produção de  $CO_2$  está mais associado ao metabolismo microbiano aeróbio, que é diretamente influenciado pelas condições de temperatura, estado nutricional do solo (SB e C), além de maior porosidade do solo (aeração).

Os sistemas agroflorestais mostram maior eficácia de MO nas camadas iniciais do solo (0-10 cm e 10-20 cm), aumentando a reserva de C no subsolo, quando contrastados com o sistema de pastoreio livre. Isso pode ser comprovado pelo maior conteúdo de material mineral e orgânico sob as árvores, em relação à área de pasto não coberta (CASALS et al., 2014), para Vallejo et al. (2012), os SSP apresentam atividade microbiana mais intensa pelo teor de nutrientes disponível quando comparado as pastagens de monocultivo, dessa forma a atividade dos microrganismos conseguem exercer melhorias nas qualidades físicas dos solos.

A comunidade de microrganismos no solo é diretamente influenciada pela qualidade do material orgânico disponível, impactada positivamente pelos sistemas agroflorestais devido à maior variedade de resíduos orgânicos incorporados. Desta forma, a deposição desse material favorece a proteção do solo, por incrementar a biodiversidade edáfica e fornecer maior equilíbrio ao ecossistema (SILVA et al., 2011; RAMOS et al., 2018).

Provavelmente a plantação de aroeira com a proliferação do capim braquiária forneceu condições físicas e químicas mais adequadas aos microrganismos do solo, servindo de fonte de energia para atividade microbiana, podendo explicar o possível predomínio de respiração heterotrófica nesse manejo com a prevalência de materiais orgânicos em diferentes estágios de mineralização.

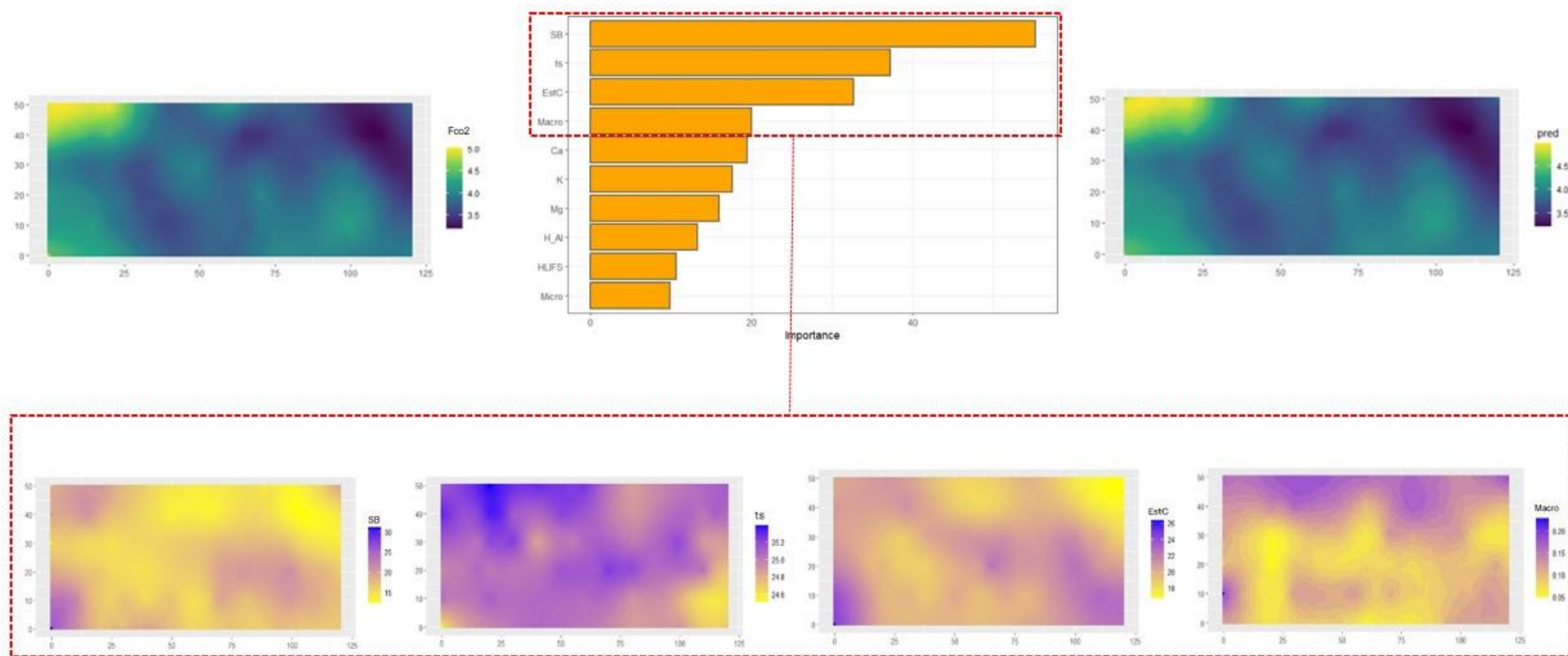


**Figura 8.** Mapa espacial da média da FCO<sub>2</sub> ao longo do período e dos melhores estimadores ajustados para o algoritmo de Random Forest, uso do solo Silvipastoril (SSP).

#### 4.4. Uso de *machine learning* para estimar a emissão de CO<sub>2</sub> e atributos do solo

Os mapas espaço-temporais para predição da FCO<sub>2</sub> a partir dos atributos do solo foram realizados com o auxílio do aprendizado de máquinas, conseguindo expressar resultados significativos para as análises observadas, mostrando ser promissor o uso de IA para predição com precisão e acurácia ótimas (Figuras 5 a 8). O algoritmo RF é conhecido pela sua robustez e eficácia no tratamento de conjuntos de dados complexos, o que é essencial quando se lida com a natureza multifacetada das propriedades do solo e o seu impacto nas emissões de CO<sub>2</sub> (MASCARO et al., 2014; TAVARES et al., 2018; ARAZA et al., 2023).

O uso do algoritmo RF em estudos anteriores demonstrou a eficácia do modelo em capturar a complexidade dos fatores que influenciam as emissões de CO<sub>2</sub>. Por exemplo, a seleção de elementos de governança urbana e fatores de emissão de carbono em estudos na China, ressalta a capacidade do RF em lidar com variáveis múltiplas e interdependentes (ZHANG et al., 2023; YANG et al., 2023).

Além do uso de *machine learning*, outros estudos também avaliaram as relações da FCO<sub>2</sub> com os atributos do solo utilizando-se de outras formas de modelagens. No estudo de Bicalho et al. (2017) que investigaram a emissão de GEE em relação aos atributos do solo, verificou-se que a emissão de CO<sub>2</sub> está diretamente ligada à porosidade do solo, um importante fator regulador. Tavares et al. (2018) observaram que a disponibilidade de fósforo, um macronutriente vital para o crescimento das plantas e sua abundância ou deficiência pode afetar diretamente as taxas de emissões de CO<sub>2</sub>. Além do P, outros atributos químicos como o pH e a soma de bases também influenciam a atividade microbiana, resultando em aumentos na emissão de GEE; em estudo realizado por Moitinho et al. (2021) analisando distintos métodos de manejo da cana, incluindo corte com queima e cana verde, os autores identificaram essas relações acima citadas e outras características dos atributos físicos e climáticos que impactam nas variações da FCO<sub>2</sub>, como o espaço poroso, a temperatura e a umidade do solo, além do conteúdo de carbono e a relação C/N do solo, sendo esses muito importantes para dimensionar a FCO<sub>2</sub>. Tavares et al. (2018) analisando atributos físicos e químicos do solo em relação ao CO<sub>2</sub> em área sob plantio de cana-de-açúcar utilizando RF conseguiram obter resultados promissores através deste algoritmo.

Dentre os atributos que mais se destacaram no modelo para a área de EU e SSP para a previsão da  $FCO_2$  estão H+Al, EstC, Us, Ts e Ds, P, Ca, SB e micro (Figuras 5 e 6). Outros estudos utilizando aprendizado de máquinas para prever o comportamento da  $FCO_2$  também conseguiram chegar a resultados satisfatórios ao estimar a variabilidade temporal da  $FCO_2$  proveniente do influxo de  $O_2$  no solo ( $FO_2$ ) em uma área reflorestada com vegetação nativa no Cerrado brasileiro, bem como compreender a dinâmica da respiração do solo neste ecossistema (VICENTINI et al., 2023). Canteral et al. (2023) em estudo conduzido em florestas tropicais do Cerrado brasileiro, analisando cinco modelos de aprendizado de máquinas (rede neural de regressão generalizada (GRNN), rede neural de função de base radial (RBFNN), rede neural perceptron multicamadas (MLPNN), sistema de inferência neuro-fuzzy adaptativo (ANFIS) e floresta aleatória (RF) conseguiram através do RF resultados positivos para prever o  $FO_2$  e compreender a dinâmica da  $FCO_2$  analisando também, os mesmos atributos do solo, e suas respectivas contribuições para a variação da respiração do solo nas áreas avaliadas.

## 5. CONCLUSÕES

A emissão de  $CO_2$  foi maior no sistema de eucalipto possivelmente este fato está associado principalmente ao maior teor de matéria orgânica, maior temperatura e condições do solo mais favoráveis à respiração de raízes e atividade microbiana. O sistema SSP, por outro lado, apresenta menores emissões de  $CO_2$ , o que pode estar associado a um estágio mais avançado e equilibrado de decomposição da matéria orgânica e atividade microbiana menos intensa.

Os resultados também demonstram que o modelo Random Forest é eficaz na previsão da variabilidade espaço-temporal da emissão de  $CO_2$ , sugerindo que o manejo do solo e as condições climáticas são fatores determinantes para as emissões de  $CO_2$ . A integração dessas variáveis em modelos de *machine learning* permite uma compreensão mais profunda e um gerenciamento mais eficiente dos sistemas de uso do solo em relação ao ciclo do C.

Os melhores atributos estimadores para o mapeamento da emissão de  $CO_2$  incluem a densidade do solo, H+Al, temperatura e Ca para o sistema de eucalipto e para o sistema silvipastoril são: soma de bases, temperatura, estoque de C e microporos. Esses atributos do solo são essenciais para explicar a emissão de  $CO_2$

do solo e oferecem um caminho promissor para futuras investigações, visto também que a temperatura tem essa correlação direta com as emissões em escala temporal.

Para avançar no entendimento da emissão de CO<sub>2</sub> do solo e de sua predição em sistemas agrícolas reflorestados, seria interessante realizar experimentos adicionais que examinem mais profundamente a interação entre os atributos físicos, químicos e biológicos do solo. Adicionalmente, testar outros modelos de *machine learning* e realizar análises mais robustas a fim de conseguir identificar quando a respiração é predominantemente autotrófica ou heterotrófica, bem como investigar o impacto de diferentes práticas de manejo do solo e variações climáticas ao longo de períodos mais extensos para validar a eficiência dos modelos em diferentes cenários e escalas temporais.

## 6 REFERÊNCIA

ALVARENGA, R. C.; PORFÍRIO-DA-SILVA, V.; GONTIJO NETO, M. M.; VIANA, M.C.M.; VILELA, L. Sistema integração lavoura-pecuária-floresta: condicionamento do solo e intensificação da produção de lavouras. **Informe Agropecuário**, v.31, p.59-67, 2010.

ANDRADE, A. T.; TORRES, J. L. R.; PAES, J. M. V.; TEIXEIRA, C. M.; CONDÉ, A. B. T. Desafios do Sistema Plantio Direto no Cerrado. **Informe Agropecuário**, v.39, n.302, p.18-26, 2018.

ARAÚJO, Edson Alves de et al. Impacto da conversão floresta-pastagem nos estoques e na dinâmica do carbono e substâncias húmicas do solo no bioma Amazônico. **Acta amazônica**, v. 41, p. 103-114, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672011000100012>

ARAÚJO, A. S. F.; MONTEIRO, R. T. R. Indicadores biológicos de qualidade do solo. *Bioscience Journal*, v. 23, n. 3, 2007. <https://seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/issue/view/401>

ARAZA, A.; de Bruin, S.; Hein, L.; Herold, M. Spatial predictions and uncertainties of forest carbon fluxes for carbon accounting. *Scientific Reports*, v. 13, n. 1, p. 12704, 2023.

ASAYE Z, Z. S. Fine root dynamics and soil carbon accretion under thinned and unthinned *Cupressus lusitanica* stands in, Southern Ethiopia. **Plant and Soil**, v. 366, p. 261–271, 2013.

ASSUNÇÃO, S. A.; PEREIRA, M. G.; ROSSET, J. S.; BERBARA, R. L. L.; GARCIA, A. C. Carbon input and the structural quality of soil organic matter as a function of agricultural management in a tropical climate region of Brazil. **Science of the Total Environment**, v. 658, p. 901-911, 2019.

AZAR, G. S. al. Soil microbial biomass and activity under pasture monoculture and silvopastoral systems. **Semina: Ciências Agrárias (Londrina)**, v. 34, n. 6, p. 2727-2736, 2013. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2013v34n6p2727>

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; MARTIN-NETO, L. Efeito de sistemas de preparo e de cultura na dinâmica da matéria orgânica e na mitigação das emissões de CO<sub>2</sub>. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.599-607, 2000.

BEUCHLE R.; GRECCHI R. C.; SHIMABUKURO Y. E.; SELIGER, R.; EVA, H. D.; SANO E. Land cover changes in the Brazilian Cerrado and Caatinga biomes from 1990 to 2010 based on a systematic remote sensing sampling approach. *Appl Geogr.* 2015; 58: 116–127.

BICALHO, E. S.; MOITINHO, M. R.; TEIXEIRA, D. B.; PANOSSO, A. R.; SPOKAS, K. A.; LA SCALA, N. Soil Greenhouse Gases: Relations to Soil Attributes in a Sugarcane Production Area. *Soil & Water Management & Conservation*, v. 81, n. 5 p. 1168 – 1178, 2017.

BRASIL. (2015). *Pretendida contribuição nacionalmente determinada* Brasília. Recuperado em 17 de julho de 2017, de [http://www.itamaraty.gov.br/images/ed\\_desenvsust/BRASIL-iNDC-portugues.pdf](http://www.itamaraty.gov.br/images/ed_desenvsust/BRASIL-iNDC-portugues.pdf)  
[http://www.itamaraty.gov.br/images/ed\\_desenvsust/BRASIL-iNDC-portugues.pdf](http://www.itamaraty.gov.br/images/ed_desenvsust/BRASIL-iNDC-portugues.pdf)

BRASIL. Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura. (2011). <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/planoabc-abcmais/publicacoes/download.pdf>

BRAZ, RÉGIS DOS SANTOS; DE CAJU, COM APLICAÇÃO DE RESÍDUO. NUTRIÇÃO DE PLANTAS.

BREIMAN, L. Statistical modeling: The two cultures. *Statistical Science*, v. 16, n. 3, p. 199-215, 2001.

CANTERL, Kleve Freddy Ferreira et al. Machine learning for prediction of soil CO<sub>2</sub> emission in tropical forests in the Brazilian Cerrado. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 21, p. 61052-61071, 2023.

CARDOSO, J. A. F.; LIMA, A. M. N.; CUNHA, T. J. F.; RODRIGUES, M. S.; HERNANI, L. C.; AMARAL, A. J.; OLIVEIRA NETO, M. B. Organic matter fractions in a Quartzipsamment under cultivation of irrigated mango in the lower São Francisco

valley region, Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.39, n.4, p.1068-1078, 2015.

CARVALHO, J. L. N.; AVANZI, J. C.; SILVA, M. L. N.; MELLO, C. R. D.; CERRI, C. E. P. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 277-290, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000200001>

CARVALHO, J. L. N.; CERRI, C. E. P.; FEIGL, B. J.; PÍCCOLO, M. D. C.; GODINHO, V. P.; CERRI, C. C. Carbon sequestration in agricultural soils in the Cerrado region of the Brazilian Amazon. *Soil and Tillage Research*, v. 103, n. 2, p. 342-349, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.10.022>

CASTAÑON, T. H. F. M.; MACHADO FILHO, A.; NEMOTO, L. R. P.; OLIVEIRA FILHO, J. S.; CUNHA, C. S. M. Fitomassa de plantas de cobertura em diferentes densidades de plantio no cerrado de Mato Grosso. **Agropecuária Científica no Semiárido**, v. 10, n. 4, p. 53 14-18, 2014

CAVENAGE, A.; MORAES, M. L. T.; ALVES, M. C.; CARVALHO, M. A. C.; FREITAS, M. L. M.; BUZETTI, S. Alterações nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro sob diferentes culturas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, MG, v. 23, n. 4, p. 997-1003, 1999.

CHEN, Y. B.; XU, P.; CHU, Y. Y.; LI, W. L.; WU, Y. T.; NI, L. Z.; BAO, Y.; WANG, K. Short-term electrical load forecasting using the Support Vector Regression (SVR) model to calculate the demand response baseline for office buildings. *Applied Energy*, v. 195, n., p. 659-670, 2017.

CHIAVEGATTO FILHO, A. D. P.; DOS SANTOS, H. G.; DO NASCIMENTO, C. F.; MASSA, K.; KAWACHI, I. Overachieving Municipalities in Public Health: A Machinelearning Approach. **Epidemiology**, v. 29, n. 6, p. 836-840, 2018.

CHOLLET, F.; ALLAIRE, J. J. Deep Learning with R. 2017. 341 p.

COSTA FDS, BAYER C, ZANATTA JA, MIELNICZUK J. Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, v. 32, n. 1, p. 323–332, 2008.

DARENOVA, Eva et al. Effect of tree harvest, silvopastoral practices, and microclimate conditions on forest floor CO<sub>2</sub> efflux in a sessile oak (*Quercus petraea* agg.[Matt.] Liebl.) forest. **Annals of Forest Science**, v. 78, n. 3, p. 1-12, 2021. <https://annforsci.biomedcentral.com/articles/10.1007/s13595-021-01101-z#:~:text=Soil%20respiration%20is%20a%20large,forest%20management%20practices%20and%20weather>

DAVIDSON, E. A.; JANSSENS, I. A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. **Nature**, v. 440, n. March, p. 165–173, 2006.

DI MININ, E.; FINK, C.; TENKANEN, H.; HIIPPALA, T. Machine learning for tracking illegal wildlife trade on social media. **Nature Ecology & Evolution**, v. 2, n. 3, p. 406–407, 2018.

DING, W.; YU, H.; CAI, Z.; HAN, F.; XU, Z. Responses of soil respiration to N fertilization in a loamy soil under maize cultivation. **Geoderma**, v. 155, n. 3-4, p. 381–389, 2010.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA- EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. 2. ed. Brasília: Ministério da Agricultura e do Abastecimento /EMBRAPA-CNPQ, 1997. 212 p.

ENCK, Bruna Firmino et al. Impacto nos atributos do solo sob conversão de floresta para áreas cultivadas na região sul do Amazonas, Brasil. **Geografia Ensino & Pesquisa**, v. 24, p. e54, 2020.

FERREIRA, D. As plantações de eucalipto como sumidouro de carbono em Portugal. **Título: AS PLANTAÇÕES DE EUCALIPTO E OS RECURSOS NATURAIS EM PORTUGAL: AVANÇOS RECENTES E DESAFIOS**, p. 85.

FREITAS, I. C.; RIBEIRO, J. M.; ARAÚJO, N. C. A.; SANTOS, M. V.; SAMPAIO, R. A.; FERNANDES, L. A.; FRAZÃO, L. A. Agrosilvopastoral systems and well-managed pastures increase soil carbon stocks in the Brazilian Cerrado. **Rangeland Ecology & Management**, v. 73, n. 6, p. 776-785, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rama.2020.08.001>

GONÇALVES, Maria Rosa; PASSOS, Carlos Alberto Moraes. Crescimento de cinco espécies de eucalipto submetidas a déficit hídrico em dois níveis de fósforo. **Ciência Florestal**, v. 10, p. 145-161, 2000. <https://doi.org/10.5902/19805098488>

GONÇALVES, W. G.; JIMENEZ, R. L.; ARAÚJO FILHO, J. V. D.; ASSIS, R. L. D.; SILVA, G. P.; PIRES, F. R. Sistema radicular de plantas de cobertura sob compactação do solo. *Engenharia Agrícola*, 26, 67-75, 2006.

GRITSCH C.; ZIMMERMANN, M.; ZECHMEISTER-BOLTENSTERN, S. Interdependencies between temperature and moisture sensitivities of CO<sub>2</sub> emissions in European land ecosystems. *Biogeosciences*, v. 12, n. 20, p. 5981-5993. 2015

GRUNWALD, S. Artificial intelligence and soil carbon modeling demystified: power, potentials, and perils. *Artificial intelligence and soil carbon modeling demystified: power, potentials, and perils*, v. 1, n. 1, p. 5, 2022.

HARTMANN, M.; SIX, J. Soil structure and microbiome functions in agroecosystems. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 4, n. 1, p. 4-18, 2023. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00366-w>

HOBBIE, S. E.; OLEKSYN, J.; EISSENSTAT, D. M.; REICH, P. B. Fine root decomposition rates do not mirror those of leaf litter among temperate tree species. **Oecologia**, v. 162, n. 2, p. 505– 60 513, 2010.

HUANG, J., LIN, T. C., XIONG, D., YANG, Z., LIU, X., CHEN, G., ... & YANG, Y. Organic carbon mineralization in soils of a natural forest and a forest plantation of southeastern China. **Geoderma**, v. 344, p. 119-126, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.03.012>

INKOTTE, Jonas et al. Deposição de serapilheira em reflorestamentos de eucalipto e florestas nativas nas regiões Planalto e Oeste do Estado de Santa Catarina. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 106, p. 261-270, 2015

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Sixth Assessment Report. Geneva: IPCC, 2022. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-3/>. Acesso em 08 de dez. 2023. Ver se ta certo

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [MASSON-DELMOTTE, V., P. ZHAI, A. PIRANI, S. L. CONNORS, C. PÉAN, S. BERGER, N. CAUD, Y. CHEN, L. GOLDFARB, M. I. GOMIS, M. HUANG, K. LEITZELL, E. LONNOY, J. B. R. MATTHEWS, T. K. MAYCOCK, T. WATERFIELD, O. YELEKÇI, R. YU AND B. ZHOU (eds.)]. Cambridge University Press. In Press. 2021.

JAMES, G.; WITTEN, D.; HASTIE, T.; TIBSHIRANI, R. An Introduction to Statistical Learning -- with Applications in R. **New York: Springer**, 2013. p.

KHORRAMDEL, S.; KOOCHEKI, A.; MAHALLATI, M.N.; KHORASANI, R.; GHORBANI, R. Evaluation of carbon sequestration potential in corn fields with different management systems. **Soil & Tillage Research**, v.133, p.25-31, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.04.008>

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Rev. Bras. Cienc. Solo* 26, 857-867. 2002

KROESE, D. P.; BOTEV, Z. I.; TAIMRE, T.; VAISMAN, R. Data Science and Machine Learning: Mathematical and Statistical Methods. **Boca Raton: Chapman and Hall/CRC**, p.5, 2019.

KUHN, M.; JOHNSON, K., 2013. Applied predictive modeling.

KWEKU, D. W.; BISMARCK, O.; MAXWELL, A.; DESMOND, K. A.; DANSO, K. B.; OTIMENSAH, E. A.; QUACHIE, A. T.; ADORMAA, B. B. Greenhouse Effect: GreenhouseGases and Their Impact on Global Warming. *Journal of Scientific Research & Reports*. v.17, 2017.

LA SCALA J. N et al. Fractal dimension and anisotropy of soil CO<sub>2</sub>emission in an agricultural field during fallow. **International Agrophysics** V.23, p. 353-358, 2009.

LA SCALA, N.; BOLONHEZI, D.; PEREIRA, G. T. Short-term soil CO<sub>2</sub> emission after conventional and reduced tillage of a no-till sugar cane area in southern Brazil. *Soil & Tillage Research*, v. 91, p. 244-248, 2006.

LA SCALA, N.; MARQUES, J.; PEREIRA, G. T.; CORA, J. E. Short-term temporal changes in the spatial variability model of CO<sub>2</sub> emissions from a Brazilian bare soil. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 32, n. 10, p. 1459-1462, 2000b.

LAL, R. Challenges and opportunities in soil organic matter research. **European Journal of Soil Science**, v.60, p.158-169, 2009.

LAL, R. Digging deeper: A holistic perspective of factors affecting soil organic carbon

LAL, R. Sequestering carbon and increasing productivity by conservation agriculture. **Journal of soil and water conservation**, v. 70, n. 3, p. 55A-62A, 2015. <https://doi.org/10.2489/jswc.70.3.55A>

LEHMANN, F.; KLEBER, M. The contentious nature of soil organic matter. *Nature*. v. 528, p. 60-68, 2015.

LI, YANG et al. Simulation analysis of carbon peak path in China from a multi-scenario perspective: Evidence from random forest and back propagation neural network models. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 16, p. 46711-46726, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25544-1>

LIU, X. B.; HAN, X. Z.; HERBERT, S. J.; XING, B. Dynamics of soil organic carbon under different agricultural management system in the black soil of China. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.34, p.973-984, 2003.

LOPES, A. A. C.; SOUSA, D. M. G.; CHAER, G.; REIS JÚNIOR, F. B.; GOEDERT, W. J.; MENDES, I. C. Interpretation of microbial soil indicators as a function of crop yield and organic carbon. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, J. v. 77, n. 2, p. 461–472, 2013.

LÓPEZ-SANTIAGO, J. G.; CASANOVA-LUGO, F.; VILLANUEVA-LÓPEZ, G.; DÍAZ-ECHEVERRÍA, V. F.; SOLORIO-SÁNCHEZ, F. J; MARTÍNEZ-ZURIMENDI, P.; CHAY-CANUL, A. J. Carbon storage in a silvopastoral system compared to that in a

deciduous dry forest in Michoacán, Mexico. **Agroforestry Systems**, v. 93, p. 199-211, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0259-x>

LORENZ, K.; LAL, R. Soil organic carbon — an appropriate indicator to monitor trends of land and soil degradation within the SDG Framework? Dessau-Roßlau, Germany: Umweltbundesamt. p. 52, 2016.

LOSS, A.; RIBEIRO, E. C.; PEREIRA, M. G.; COSTA, E. M. Atributos físicos e químicos do solo em sistemas de consórcio e sucessão de lavoura, pastagem e silvipastoril em Santa Teresa, ES. *Bioscience J.* 30. 2014.

MACCARTHY, D. S.; ZOUGMORÉ, R. B.; AKPONIKPÈ, P. B. I.; KOOMSON, E.; SAVADOGO, P.; ADIKU, S. G. Assessment of Greenhouse Gas Emissions from Different Land-Use Systems: A Case Study of CO<sub>2</sub> in the Southern Zone of Ghana. *Applied and Environmental Soil Science* v. 2018.

MARENGO, J. A.; SOARES, W. R. Impacto das mudanças climáticas no Brasil e possíveis futuros cenários climáticos: síntese do terceiro relatório do IPCC 2001. **Clima e Recursos Hídricos**, p. 209-233, 2003.

MARTINS, L. F. S., POGGIANI, F., DE OLIVEIRA, R. F., GUEDES, M. C., & DE MORAES GONÇALVES, J. L. Características do sistema radicular das árvores de *Eucalyptus grandis* em resposta à aplicação de doses crescentes de bio sólido. *Scientia Florestalis*, n.65, p. 207-209, 2004.

MASCARO, J.; ASNER, G. P.; KNAPP, D. E.; KENNEDY-BOWDOIN, T.; MARTIN, R. E.; ANDERSON, C.; CHADWICK, K. D. A tale of two “forests”: Random Forest machine learning aids tropical forest carbon mapping. *PloS one*, v. 9, n. 1, p. e85993, 2014.

MENDES, R.; TAKETANI, N. F.; TAKETANI, R. G. Efeito do aquecimento global sobre a comunidade microbiana do solo. **Aquecimento Global e Problemas Fitossanitários**, p. 177, 2017.

METZGER, J. P.; ESLER, K.; KRUG, C.; ARIAS, M.; TAMBOSI, L.; CROUZEILLES, R.; ACOSTA, A. L.; BRANCALION, P. H. S.; D'ALBERTAS, F.; DUARTE, G. T.; GARCIA, L. C.; GRYTNES, J. A.; HAGEN, D.; JARDIM, A. V. F.; KAMIYAMA, C.;

LATAWIEC, A. E.; RODRIGUES, R. R.; RUGGIERO, P. G. C.; SPAROVEK, G.; STRASSBURG, B.; SARAIVA, A. M.; JOLY, C. Melhores práticas para o uso de cenários para planejamento de restauração. **Curr Opin Env Sust** 29, 14-25. 2017.

MILORI, D. M. B. P.; GALETI, H. V. A.; MARTIN-NETO, L.; DIECKOW, J.; GONZÁLEZ-PÉREZ, M.; BAYER, C.; SALTON, J. Organic matter study of whole soil samples using laser-induced fluorescence spectroscopy. **Soil Science Society of America Journal, Madison**, v. 70, n. 1, p. 57-63, 2006.

Ministério da Ciência, Tecnologia e inovação (MCTI). **Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa**. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/estimativas-anuais-de-emissoes-gee>.

Acesso em: 29 out. 2023.

MOITINHO, Mara Regina et al. Arbuscular mycorrhizal fungi and soil aggregation in a no-tillage system with crop rotation. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 183, n. 4, p. 482-491, 2020.

MOITINHO, M. R.; FERRAUDO, A. S.; PANOSSO, A. R.; BICALHO, E. S.; TEIXEIRA, D. B.; BARBOSA, M. A.; TSAI, S. M.; BORGES, B. M. F.; CANNAVAN, F. S.; SOUZA, J. A. M.; LA SCALA, N. Effects of burned and unburned sugarcane harvesting systems on soil CO<sub>2</sub> emission and soil physical, chemical, and microbiological attributes. *Catena*, v. 196, p. xx, 2021.

OLIVEIRA, C. F. Variabilidade espacial da emissão de CO<sub>2</sub> e estoque de carbono do solo em áreas de eucalipto e sistema silvipastoril. 2018.

ONTL, Todd A.; SCHULTE, Lisa A. Soil carbon storage. **Nature Education Knowledge**, v. 3, n. 10, 2012.

ORTIGOZA, F. S. S.; SENNA, R. J. Caracterização do segmento de florestas plantadas de eucalipto em Mato Grosso do Sul. **Revista de Política Agrícola**, v. 25, n. 2, p. 74-89, 2016.

PALUDO, R.; COSTABEBER, J. A. Sistemas agroflorestais como estratégia de desenvolvimento rural em diferentes biomas brasileiros. **Revista Brasileira de**

**Agroecologia**, v. 7, n. 2, p. 63-76, 2012. [http://www.abagroecologia.org.br/ojs2/index.php/rbagroecologia/article/view/10050/pdf\\_2](http://www.abagroecologia.org.br/ojs2/index.php/rbagroecologia/article/view/10050/pdf_2)

PANOSSO, A. R. et al. Emissão de CO<sub>2</sub> do solo e sua relação com as propriedades do solo em áreas de cana-de-açúcar sob corte e queima e colheita verde. **Pesquisa de Solo e Cultivo**, v. 2, pág. 190-196, 2011.

PAUSTIAN, K.; LEHMANN, J.; OGLE, S. M.; REAY, D.; ROBERTSON, G. P.; SMITH, P. Climate-smart soils. **Nature Climate Change**, v.532, p.49-57, 2016.

PLANO, A. B. C. Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**, 2012.

PULROLNIK, K.; VILELA, L.; MARCHÃO, R. L.; LEMOS, R. L.; SOUZA, K. W. Soil carbon stocks in integrated crop-livestock-forest and integrated crop-livestock systems in the Cerrado region. In: WORLD CONGRESS ON INTEGRATED CROP-LIVESTOCK-FOREST SYSTEM, 1.; INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INTEGRATED CROP-LIVESTOCK SYSTEMS, 3., 2015, Brasília, DF. Proceedings... Brasília, DF: Embrapa, 2015. p. 314.

RAY, R. L. et al. Soil CO<sub>2</sub> emission in response to organic amendments, temperature, and rainfall. **Scientific reports**, v. 10, n. 1, p. 5849, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62267-6>

REIS G. G.; REIS, M. G. F.; FONTAN, I. C. I.; MONTE, M. A.; GOMES, A. N.; OLIVEIRA, C. H. R. Crescimento de raízes e da parte aérea de clones de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e de *Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus* spp submetidos a dois regimes de irrigação no campo. **Revista Árvore**, v. 30, n. 6, p. 921–931, 2006.

SALTON, J. C.; MERCANTE, F.M.; TOMAZI, M.; ZANATTA, J. A.; CONCENCO, G.; SILVA, W. M.; RETORE, M. Integrated crop-livestock system in tropical Brazil: toward a sustainable production system. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 190, p. 70-79, June 2014.

SANDERMAN, J., HENGL, T., FISKE, G.J. Soil carbon debt of 12,000 years of human landuse. PNAS. Early Edition, 2017.

SANO E. E.; ROSA, R.; BRITO J. L. S.; FERREIRA L. G. Mapeamento semidetalhado do uso da terra do Bioma Cerrado. **Pesqui Agropecuária Bras.** 2008;43: 153–156.

SANTOS, C. A.; REZENDE, C. P.; PINHEIRO, E. F. M.; PEREIRA, J. M.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Changes in soil carbon stocks after land-use change from native vegetation to pastures in the Atlantic forest region of Brazil. **Geoderma**. v. 337, p. 394-401, 2019.

SANTOS, H.G. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2013. 353 p.

SCHARLEMANN, J. P.; TANNER, E. V.; HIEDERER, R.; KAPOV, V. Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. **Carbon Management**. v. 5, p. 81-91, 2014.

SCHLESINGER, W. H.; AMUNDSON, R. Managing for soil carbon sequestration: let's get realistic. **Global Change Biology**. v. 25, p. 386–389, 2018. sequestration in agroecosystems. *Global Change Biology*, v.24, p.1-17, 2018.

SCHWARTZ, R.C.; BAUMHARDT, R.L.; EVETT, S.R. Tillage effects on soil water redistribution and bare soil evaporation throughout a season. *Soil & Tillage Research*, Amsterdam, v.110, n.2, p.221–229, 2010.

SHRESTHA, P. M. et al. Syntrophic growth with direct interspecies electron transfer as the primary mechanism for energy exchange. **Environmental microbiology reports**, v. 5, n. 6, p. 904-910, 2013.

SILVA, A. R.; RODRIGUES FILHO, J. A.; CARVALHO, E. J. M.; SANTIAGO, A. V.; VELOSO, C. A. C; MARTINEZ, G. B. Estoque de carbono e mitigação de metano produzido por bovinos em sistema integração pecuária-floresta (IPF) com eucalipto no Sudeste Paraense. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 4, p. 39997-40016, 2021. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n4-457>

SILVA, B. O. Emissão de CO<sub>2</sub>, estoque e humificação do carbono do solo em áreas convertidas do Bioma Cerrado, Brasil Central. 2021.

SILVA, B. O. T. Carbono e macroagregados do solo como indicador de qualidade em áreas sob diferentes manejos de cultivo de cana-de-açúcar. 2021. 78 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

SILVA, B. O. T. et al. Carbono e macroagregados do solo como indicador de qualidade em áreas sob diferentes manejos de cultivo de cana-de-açúcar. 2021.

SILVA, B. O.; MOITINHO, M. R.; ARAUJO SANTOS, G. A.; TEIXEIRA, D. D. B.; FERNANDES, C.; LA SCALA, N. Emissão de CO<sub>2</sub> do solo e distribuição de classes de poros do solo em curto prazo após as operações de cultivo. *Soil Till Res* 186, 224-232. 2019.

SILVA, J. F. Cultivo de milho verde em sistemas de manejo convencional e conservacionistas em experimento de longa duração. 2022.

SILVA, J. F. et al. Spatial heterogeneity, land use and conservation in the cerrado region of Brazil. **Journal of biogeography**, v. 33, n. 3, p. 536-548, 2006.

SILVA, S. R. et al. Effect of compaction on microbial activity and carbon and nitrogen transformations in two oxisols with different mineralogy. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 1141-1149, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000400007>

SOLLY EF, SCHÖNING I, BOCH S, KANDELER E, MARHAN S, MICHALZIK B, MÜLLER J, ZSCHEISCHLER J, TRUMBORE SE, SCHRUMPF M. Factors controlling decomposition rates of fine root litter in temperate forests and grasslands. *Plant and Soil*, v. 382, n. 1-2, p. 203–218, 2014.

SOUZA, Z. M.; ALVES, M. C. Propriedades químicas de um latossolo vermelho distrófico de cerrado sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.27, p. 133-139, 2003.

SOUZA, Luciano Duarte. Emissão de CO<sub>2</sub> do solo em pastos degradado, manejado e consórcio silvipastoril no Cerrado. 2020.

STROSSER, E. Methods for determination of labile soil organic matter: an overview. **Journal of Agrobiology** 27:49-60, 2010.

TAN, X.; CHANG, SX & KABZEMS, R. Efeitos da compactação do solo e remoção do solo da floresta nas propriedades microbianas do solo e nas transformações de N em um estudo de produtividade do solo de longo prazo na floresta boreal. *Para. Eco. Gerente*, 217:158-170, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.05.061>

TAVARES, R. L. M.; FARHATE, C. V. V.; ASSIS, R. L. PLANTAS DE COBERTURA E SEUS BENEFÍCIOS AO SOLO. **ANUÁRIO DE PESQUISAS AGRICULTURA-RESULTADOS 2020**, p. 40.

TAVARES, R. L. M.; OLIVEIRA, S. R. D. M.; BARROS, F. M. M. D.; FARHATE, C. V. V.; SOUZA, Z. M. D.; SCALA JUNIOR, N. L. Prediction of soil CO<sub>2</sub> flux in sugarcane management systems using the random forest approach. **Scientia Agricola**, v. 75, p. 281-287, 2018.

TAVARES, R. L. M.; OLIVEIRA, S. R. D. M.; BARROS, F. M. M. D.; FARHATE, C. V. V.; SOUZA, Z. M. D.; SCALA JUNIOR, N. L. Prediction of soil CO<sub>2</sub> flux in sugarcane management systems using the random forest approach. *Scientia Agricola*, v. 75, p. 281-287, 2018.

TEIXEIRA, D. D. B.; BICALHO, E. S.; PANOSSO, A. R.; PERILLO, L. I.; IAMAGUTI, J. L.; PEREIRA, G. T.; LA SCALA, N. Incertezas na previsão da variabilidade espacial das emissões de CO<sub>2</sub> do solo e propriedades relacionadas. *Rev. Bras. Cienc. Solo* 36. 2012

TELLES, T. S. **Desenvolvimento da agricultura de baixo carbono no Brasil**. Texto para Discussão, 2021.

TORRES, C. M. M. E. et al. Emissões de gases de efeito estufa e sequestro de carbono por sistemas agroflorestais no sudeste do Brasil. **Relatórios Científicos** , v. 7, n. 1, pág. 16738, 2017. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-16821-4>

USSIRI A. N.; LAL, R. Long-term tillage effects on soil carbon storage and carbon dioxide emissions in continuous corn cropping system from an alfisol in Ohio. *Soil Till. Res.*, 104:39-47. 2009.

VALLEJO, V. E. et al. Effect of land management and *Prosopis juliflora* (Sw.) DC trees on soil microbial community and enzymatic activities in intensive silvopastoral systems of Colombia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. v. 150, p. 139-148, 2012. Disponível em:< <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2012.01.022>>

VASCONCELOS, A. A. Emissões de CO<sub>2</sub>, particionamento da respiração e qualidade da matéria orgânica em solos sob cultivo de eucalipto no Cerrado [tese]. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2014. 64p

VIANA, E. T.; BATISTA, M. A.; TORMENA, C. A.; COSTA, A. C. S.; INOUE, T. T. Atributos físicos e carbono orgânico em Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n.6, p. 2105-2114, 2011.

VICENTINI, Maria Elisa et al. Artificial neural networks and adaptive neuro-fuzzy inference systems for prediction of soil respiration in forested areas southern Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 195, n. 9, p. 1074, 2023.

XAVIER, C. V. et al. Crop rotation and sequence effects on temporal variation of CO<sub>2</sub> emissions after long-term no-till application. **Science of the total environment**, v. 709, p. 136107, 2020.

XU, X.; SONG, C.; MILLER, B. G.; SCARONI, A. W. Influence of moisture on carbon dioxide separation from simulated flue gas by a novel molecular basket adsorbent. Preprint Papers. **American Chemical Society, Division of Fuel Chemistry**, 49(1), 300. 2004.

ZHANG, ELE et al. Uso de florestas aleatórias com base nos efeitos dos elementos de governança urbana para prever as emissões de CO<sub>2</sub> nas cidades chinesas. **Helião**, 2023. <https://di.org/10.1016%2Fj.heliyon2023.e16693>.