UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO" (UNESP)
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS (FCAV)
CÂMPUS DE JABOTICABAL

RESPIRAÇÃO SOLO: CONEXÕES ENTRE EMISSÃO DE CO_2 E O INFLUXO DE O_2 DO SOLO COM VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS EM DIFERENTES SISTEMAS AGRÍCOLAS TROPICAIS

WANDERSON BENERVAL DE LUCENA

Engenheiro Agrônomo

JABOTICABAL
2024

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO" (UNESP)

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS

CÂMPUS DE JABOTICABAL (FCAV)

RESPIRAÇÃO SOLO: CONEXÕES ENTRE EMISSÃO DE CO_2 E O INFLUXO DE O_2 DO SOLO COM VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS EM DIFERENTES SISTEMAS AGRÍCOLAS TROPICAIS

Wanderson Benerval De Lucena

Orientador: Prof. Dr. Newton La Scala Júnior

Tese, apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal (FCAV) - UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Agronomia (Ciência do Solo).

JABOTICABAL

20

L935r

Lucena, Wanderson Benerval De
Respiração solo : conexões entre emissão de CO2 e o influxo de O2 do solo com variáveis meteorológicas em diferentes sistemas agrícolas tropicais / Wanderson Benerval De Lucena. -- Jaboticabal, 2024
135 f. : il., tabs., fotos, mapas

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal
Orientador: Newton La Scala Jr

1. Metabolismo do solo. 2. Relação solo-planta-atmosfera. 3. Uso e manejo do solo. 4. Efeito raiz. 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).

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: RESPIRAÇÃO SOLO: CONEXÕES ENTRE EMISSÃO DE CO2 E O INFLUXO DE O2 DO SOLO COM VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS EM DIFERENTES SISTEMAS AGRÍCOLAS TROPICAIS

AUTOR: WANDERSON BENERVAL DE LUCENA
ORIENTADOR: NEWTON LA SCALA JUNIOR

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

Prof. Dr. NEWTON LA SCALA JUNIOR (Participaçao Virtual)
Departamento de Engenharia e Ciencias Exatas / FCAV UNESP Jaboticabal

Dra. MARIA ELISA VICENTINI (Participaçao Virtual)
Autônoma / Jales/SP

Documento assinado digitalmente
gov.br
MARIA ELISA VICENTINI
Data: 17/04/2024 13:03:11-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. GLAUCO DE SOUZA ROLIM (Participaçao Virtual)
Departamento de Engenharia e Ciencias Exatas / FCAV UNESP Jaboticabal

Documento assinado digitalmente
gov.br
ZIGOMAR MENEZES DE SOUZA
Data: 18/04/2024 05:53:50-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. ZIGOMAR MENEZES DE SOUZA (Participaçao Virtual)
Departamento de Água e Solo / Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) - Campinas/SP

Pós-doutoranda MARA REGINA MOITINHO (Participaçao Virtual)
Departamento de Solos e Adubos / FCAV UNESP Jaboticabal

Jaboticabal, 17 de abril de 2024

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

Wanderson Benerval de Lucena – Filho de Benerval Severino Pereira de Lucena e Edileuza Maria do Nascimento, nascido às 10h do dia 08 de novembro de 1995, em Glória do Goitá, Pernambuco. Cursou o ensino infantil e fundamental na então Escola Iva Ferreira de Souza, em Feira Nova, Pernambuco. Os dois primeiros anos do ensino médio na antiga Escola Pontes de Miranda. No período de 2011 a 2012 atuou como coordenador local em Feira Nova, Pernambuco do projeto Cultura Daqui financiado pela Fundação do Patrimônio Histórico e Artístico de Pernambuco (FUNDARPE) ligado ao Grupo de Informática, Comunicação e Ação Local (GIRAL), ainda no ensino médio no período de 2012 a 2013 realizou intercâmbio cultural em Hazlet High School, na cidade de Hazlet, província de Saskatchewan, Canadá, retornando ao Brasil cursou o último ano do ensino médio na Escola de Referência em Ensino Médio Professora Marilene Chaves de Santana, concluindo em 2013. Aprovado no vestibular no final de 2013, iniciou a Graduação em Bacharelado em Agronomia em fevereiro de 2014 no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco (IFPE), campus Vitória de Santo Antão. Ainda em 2014 atuou por um curto período como professor do Programa Ganhe o Mundo (PGM) do governo do estado de Pernambuco, já em meados de 2015 concluiu o curso Técnico em Segurança do Trabalho pelo Centro de Ensino Grau Técnico. Em meados de 2016 retornou ao Canadá, a então cidade de Hazlet, SK para participar do Décimo Encontro de Estudantes do Programa Internacional Chinook. Ao final de 2018 concluiu o curso superior em Bacharelado em agronomia no IFPE, assim, ingressou em março de 2019 no mestrado em Agronomia (Ciência do Solo) da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal (FCAV) da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (Unesp), no interior do Estado de São Paulo. Concluiu o mestrado com êxito em 29 de julho de 2020 e obteve o título mestre em Agronomia (Ciência do Solo) pela FCAV/Unesp. Em 03 de agosto de 2020 iniciou os estudos no curso de doutorado em Agronomia (Ciências do Solo) também pela Unesp/FCAV. Defendeu a tese intitulada de “Respiração solo: Conexões entre emissão de CO_2 e o influxo de O_2 do solo com variáveis meteorológicas em diferentes sistemas agrícolas tropicais” em 17 de abril de 2024, assim obteve o título de doutor em Agronomia (Ciência do Solo).

“O importante não é ver o que ninguém nunca viu, mas sim pensar o que ninguém nunca pensou sobre algo que todo mundo vê.”

Arthur Schopenhouer

“O Universo não é uma idéia minha. A minha idéia do Universo é que é uma idéia minha.”

Fernando Pessoa

“É necessário que ao menos uma vez na vida você duvide, tanto quanto possível, de todas as coisas.”

René Descartes

“Não tem vida que continue sem a terra, sem a agricultura.”

Ana Maria Primavesi

DEDICO

In memoriam de Severina Pereira de Lucena, mulher, mãe, avó e agricultora que buscou na simplicidade da vida camponesa os princípios essenciais baseados no amor e na fé cristã... que levou a vida com honestidade e paz de espírito, deixando em nossos corações a esperança de um futuro de felicidades, educação e equidade.

OFEREÇO

Pelas dificuldades que foram superadas todos unidos eu dedico a minha família, em especial aos meus pais Benerval Lucena e Edileuza Nascimento e minha amada irmã Gracielle Lucena Gomes.

AGRADECIMENTOS

Agradecer é lembrar da jornada, dos desafios e das relações que estabelecemos para chegar ao objetivo pretendido. Entender a importância do caminho antes mesmo do destino e, viver a experiência do caminho durante todo o percurso. Meu conterrâneo, o professor Paulo Freire escreveu: "*Ninguém nasce feito, é experimentando-nos no mundo que nós nos fazemos*". Esse processo de descobrimento é essencial ao desenvolvimento humano, e parte desse desenvolvimento passa pelo reconhecimento da incapacidade humana de ser perfeito e assim buscar ajuda. Assim, agradecer é transportar para as palavras o desejo sincero e o reconhecimento da importância de cada pessoa na construção de minha jornada. Dito tudo isso, gostaria de expressar, meus sinceros agradecimentos:

Á Deus, pela obra prima que tem feito em nossas vidas.

Ao meu orientador, o professor doutor Newton La Scala Júnior, pela paciência e sabedoria nas conversas e auxílio nas tomadas de decisões.

Ao professor doutor Alan Rodrigo Panosso pela ajuda oferecida durante os dois semestres de estágio à docência. Além de sua rede interpessoal que auxiliou no processo de instalação e realização do experimento em Selvíria/MS.

Ao professor Glauco de Souza Rolim pelas deliberações que contribuíram na realização do experimento na estação agroclimatologia da Unesp/FCAV.

Aos carismáticos funcionários da estão agroclimatologia, Carlos Alberto Santa Capita e Vanessa Sayury Nakata Corrêa Santa Capita pelo apoio, simpatia e o diálogo durante o cafezinho.

A Fundação de Apoio à Universidade de São Paulo (FUSP) pela obtenção de recursos que financiaram minha estádia para a realização do experimento em Selvíria/MS.

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

Ao centro de pesquisa RCGI/USP (Centro de Pesquisa para Inovação em Gases de Efeito Estufa) pelo projeto e captação de recursos que viabilizaram o experimento em Selvíria/MS.

Ao Programa de Pós-graduação em Agronomia (Ciências do Solo) pela promoção de um programa a nível de excelência nacional.

Ao Daniel Carlos Machado que auxiliou nas avaliações de campo que deram origem ao Capítulo 2 dessa tese.

Ao Kleve Freddy Ferreira Canteral que auxiliou nas avaliações que resultou no Capítulo 3 desse documento.

A Polyana Pereira companheira de sala no departamento, agradeço pelas conversas e auxiliou na resolução das dúvidas.

Ao Professor Doutor Gustavo André de Araújo Santos e a Doutora Maria Elisa Vicentini pelas avaliações e melhorias propostas ao estudo durante o exame geral de qualificação.

Agradecemos especial aos membros que compuseram a banca de defesa da tese: Doutora Maria Elisa Vicentini, Doutora Mara Regina Moitinho, Professor Doutor Zigomar Menezes de Souza e ao Professor Doutor Glauco de Souza Rolim.

SUMÁRIO:

CAPÍTULO I - CONSIDERAÇÕES GERAIS: INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS NA DINÂMICA RESPIRATÓRIA DO SOLO EM SISTEMAS AGRÍCOLAS TROPICAIS 13
Resumo: 13
1 INTRODUÇÃO 15
2 REVISÃO DE LITERATURA 17
2.1 Entendendo o solo: composição e a importância 17
2.2 Dinâmica de transferência de massas de ar 18
2.3 Matéria orgânica do solo: tendências globais para manutenção do carbono do solo 19
2.5 Estudos em respiração solo: descobertas e perspectivas futuras 23
3 CONTEXTUALIZANDO AS CONEXÕES 27
REFERÊNCIAS 30
CAPÍTULO II - EMISSÃO DE CO_2 E INFLUXO DE O_2 EM SOLOS COM E SEM VEGETAÇÃO: ACESSANDO A RESPIRAÇÃO DE RAÍZES A PARTIR DA RESPIRAÇÃO DO SOLO E SUA RELAÇÃO COM VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS 36
1 INTRODUÇÃO 38
2 MATERIAL E METÓDOS 40
2.1 Localização e caracterização da área experimental 40
2.2 Design experimental 41
2.3 Emissão de CO_2, temperatura e umidade do solo 45
2.4 Influxo de O_2 do solo 47
2.5 Análise dos dados 47
2.7.1 Análise da variabilidade temporal 47
2.7.2 Relação dinâmica de gases com o ambiente 48
3. RESULTADOS 50
3.1 Variabilidade temporal diurna e contribuição da respiração de raiz 50
3.2 Relação entre a dinâmica de gases no solo e as condições ambientais 55
3.3 Regressão linear simples para emissão de CO_2 do solo e o influxo de oxigênio do solo aplicando a validação cruzada de repetição 60
4 DISCUSSÃO 63
4.1 Variabilidade diurna, efeito da raiz e das condições meteorológicas 63
4.2 Relação entre a dinâmica respiratória do solo e dados climáticos 66
4.3 Modelos de predição linear da respiração do solo 68
5 CONCLUSÃO 70
REFERÊNCIAS 71

CAPÍTULO III - EXPLORANDO A VARIABILIDADE TEMPORAL DE CURTO PRAZO DA EMISSÃO DE CO_2 E DO INFLUXO DE O_2 DO SOLO EM AGROECOSSISTEMAS TROPICAIS 80
RESUMO: 80
1 INTRODUÇÃO 82
2 MATERIAL E METÓDOS 85
2.1 Localização da área de estudo 85
2.2 Descrição dos usos do solo 88
2.3 Emissão de CO_2, temperatura e umidade do solo 89
2.4 Influxo de O_2 do solo 91
2.5 Cálculos do Quociente Respiratório do Solo 92
2.6 Caracterização dos atributos do solo nos agroecossistemas 92
2.7 Análise dos dados 92
2.7.1 Análise da variabilidade temporal da emissão de CO_2, influxo de O_2, temperatura e umidade do solo e quociente respiratório do solo 92
2.7.2 Análise dos atributos do solo sob diferentes usos 93
2.7.3 Análise de componentes principais com agrupamentos 93
Todas as análises estatísticas foram performadas em linguagem R (..... 94
3.1 Variabilidade temporal da emissão de CO_2, influxo de O_2, temperatura e umidade do solo 95
3.2 Análise do quociente respiratório do solo (QRS) 99
3.3 Atributos dos solos nos agroecossistemas 100
3.4 Análise de componentes principais para os diferentes usos do solo 102
4 DISCUSSÃO 105
4.1 Análise da variabilidade temporal de FCO2, iO2, Usolo e Tsolo 105
4.2 Quociente respiratório do solo 107
4.3 Efeito dos diferentes agroecossistemas nos atributos do solo 109
4.4 Análise de componentes principais e dos agrupamentos 110
5 CONCLUSÕES 112
REFERÊNCIAS 113
CAPÍTULO IV – CONSIDER:AÇÕES FINAIS: Quais os próximos passos para os estudos em respiração do solo? 125
APÊNDICES 127

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

CAPÍTULO I - CONSIDERAÇÕES GERAIS: INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS NA DINÂMICA RESPIRATÓRIA DO SOLO EM SISTEMAS AGRÍCOLAS TROPICAIS

Resumo:
O solo é um ambiente rico em microrganismos que frequentemente associado a dinâmica global da reciclagem de nutrientes. A demanda por carbono faz com que esses organismos utilizem uma via metabólica dependente de oxigênio, como a respiração celular para obtenção de energia ou por meio da respiração celular. As raízes também realizam respiração mitocondrial e, portanto, podem ser associadas a respiração global do solo. Objetivou-se investigar a dinâmica das trocas gasosas no solo em conjunto com variáveis meteorológicas em diferentes sistemas agrícolas tropicais. Para isso foram realizadas avaliações das emissões de CO_2 do solo usando o sistema portátil LI-8100; o influxo de oxigênio do solo foi obtido pela interpolação linear do decaimento de O_2 no interior da câmara usando o sensor de oxigênio UVFLUX 25%. Paralelamente foram avaliadas a temperatura e umidade do solo. Os dados meteorológicos foram obtidos de estações agroclimáticas próximas aos locais onde os experimentos ocorreram. No primeiro experimento localizado em Jaboticabal/SP as medidas ocorreram em duas condições, sendo solo nu e solo vegetado. No segundo experimento locado em Selvíria/MS, as comparações se deram em diferentes agroecossistemas, como, pastagens e reflorestamentos com espécies nativas e eucalipto. Os resultados apontam uma relação entre a emissão de CO_2 com o influxo de O_2 do solo em solos vegetados (valores de 30 a 70% superiores, em média) e em reflorestamentos (quocientes respiratórios de 0,52 e 0,59 mol mol^{-1}). No primeiro estudo observou-se uma relação do influxo de O_2 em solos tropicais com a radiação fotossinteticamente ativa ($r = 079$; $p < 0,05$), enquanto, no segundo experimento a dinâmica temporal do O_2 foi explicada pela variabilidade da temperatura do solo, em especial, nas pastagens. Modelos que descrevem o comportamento linear da emissão de CO_2 em função da umidade do solo e a dinâmica do influxo de O_2 em função da radiação fotossinteticamente ativa foram propostos. Foi concluído que a respiração de raízes possui relação com o influxo de O_2 no ecossistema solo, assim, a respiração radicular pode representar de 27 a 48% da respiração do solo. A emissão de CO_2, sob condições, com ou sem vegetação, podem ser preditas usando um modelo linear com base na umidade do solo. A pastagem, ao longo do tempo, apresenta as menores taxas de emissão de CO_2. Tais resultados foram relacionados com melhorias nos atributos do solo, como MOS, SB e pH que foram alterados pelo manejo quando comparados aos demais usos do solo.

Palavras-chaves: Metabolismo do solo; Relação solo-planta-atmosfera; Uso e manejo do solo; Efeito raiz.

CHAPTER I - GENERAL CONSIDERATIONS: CARBON DYNAMICS IN THE SOIL ECOSYSTEM AND NECESSARY CONNECTIONS FOR AGRICULTURAL ACTIVITIES IN THE TROPICS

Abstract:

Soil is an environment rich in microorganisms that is often associated with the global dynamics of nutrient recycling. The demand for carbon causes these organisms to use an oxygen-dependent metabolic pathway, such as cellular respiration to obtain energy or through cellular respiration. Roots also perform mitochondrial respiration and, therefore, can be associated with global soil respiration. The objective was to investigate the dynamics of gas exchange in the soil in conjunction with meteorological variables in different tropical agricultural systems. To this end, assessments of CO_2 emissions from the soil were carried out using the LI-8100 portable system; soil oxygen influx was obtained by linear interpolation of O_2 decay inside the chamber using the UVFLUX 25% oxygen sensor. At the same time, soil temperature and humidity were evaluated. Meteorological data were obtained from agroclimatic stations close to the locations where the experiments took place. In the first experiment located in Jaboticabal/SP, measurements took place in two conditions, bare soil and vegetated soil. In the second experiment located in Selvíria/MS, comparisons took place in different agroecosystems, such as pastures and reforestations with native species and eucalyptus. The results point to a relationship between CO_2 emissions and the influx of O_2 from the soil in vegetated soils (values of 30 to 70% higher, on average) and in reforestation (respiratory quotients of 0.52 and 0.59 mol mol^{-1}). In the first study, a relationship was observed between the influx of O_2 in tropical soils and photosynthetically active radiation ($r = 079$; $p < 0.05$), while in the second experiment the temporal dynamics of O_2 were explained by the variability of soil temperature, especially in pastures. Models that describe the linear behavior of CO_2 emission as a function of soil moisture and the dynamics of O_2 influx as a function of photosynthetically active radiation have been proposed. It was concluded that root respiration is related to the influx of O_2 into the soil ecosystem, thus root respiration can represent 27 to 48% of soil respiration. CO_2 emissions under conditions, with or without vegetation, can be predicted using a linear model based on soil moisture. Pasture, over time, has the lowest CO_2 emission rates. Such results were related to improvements in soil attributes, such as SOM, SB and pH that were altered by management when compared to other soil uses.

Key-words: Soil metabolism; Soil-plant-atmosphere relationship; Land use and management; Root effect.

1 INTRODUÇÃO

Os solos contêm os maiores reservatórios ativos de carbono no planeta Terra. O ciclo do carbono na biosfera inclui a respiração do solo, sendo esse processo oriundo da biodegradação da matéria orgânica para obtenção de carbono organismos heterotróficos no solo (Andrews et al., 1999; Jensen et al., 2018).

Respiração ou metabolismo do solo é o nome dado ao processo de oxidação da matéria orgânica por microorganismos aeróbicos, e, portanto, ocorre em ambiente oxigenado (Luo e Zhuo, 2006; Bini et al., 2016). O oxigênio requerido no processo respiratório é fonte importante tanto para a atividade microbiana como a respiração celular nas raízes das plantas (Romagnoli e Andreote, 2016; Bini et al., 2016). Contudo, poucos estudos ao longo do tempo demostraram preocupação com o influxo de O_2 da atmosfera terrestre para a atmosfera do solo (Vicentini et al., 2019; De Lucena et al., 2023; Vicentini et al. 2023).

No solo, a respiração pode acontecer em diferentes compartimentos, isto é, pode vir da atividade microbiana na matéria orgânica ou de raízes, mais especificamente da rizosfera (Atkin et al., 2000). Entende-se por rizosfera, a região do solo que é diretamente influenciada pela raiz da planta (Romagnoli e Andreote, 2016). A taxa de respiração de raízes em condições naturais depende do grau de adaptação as condições impostas pelo clima e ambiente (Atkin et al., 2000).

Formas de manejo pouco conservacionistas ou sem manutenção da palhada na superfície do solo ou ainda técnicas de revolvimento do solo de forma intensa demostraram atuar como potencializadoras da oxidação da matéria orgânica do solo o que acelera a perda de carbono do solo através da emissão de CO_2 do solo (Moitinho et al., 2013; Bini et al., 2016).

Os efeitos da mudança do uso do solo também foram reportados em perdas na capacidade produtiva e diminuição da biodiversidade associada aos processos microbianos no solo (Bini et al., 2013). A intensificação do uso da Terra demonstrou afetar a comunidade microbiana edáfica, além da perda da capacidade dos serviços ecossistêmicos oferecidos pela biomassa microbiana do solo (BMS) (Briedis et al., 2012; Bini et al., 2013). Entre os serviços oferecidos pela BMS, destacam-se a reciclagem de nutrientes via imobilização e mineralização de nutrientes no ecossistema solo (Singh e Gupta, 2018).

No tempo, a respiração do solo em florestas tropicais demostrou responder aos efeitos da umidade do solo (Cusack et al., 2023). No entanto, diferentemente dos sistemas de cultivo tradicionais, os sistemas florestais são mais dependentes de nutrientes oriundos da reciclagem de nutrientes a partir de materiais orgânicos depositados na superfície do solo (ex.: serrapilheira) (Kutsch et al., 2002). Assim condições ambientais e climáticas atuam como influenciadores dos processos respiratórios no solo (Kutsch et al., 2002; Davidson e Janssens, 2006).

Davidson e Janssens (2006) demostraram o efeito da temperatura, em condições tropicais como gerenciador da atividade microbiana de decomposição e mineralização da matéria orgânica. Assim, assumem como fatores diretos que influenciam na respiração global do solo a temperatura e a umidade do solo (Lal, 2022). Respiração global do solo ou respiração total do solo são terminologias usadas para designar o somatório da respiração oriunda da atividade microbiana mais a respiração de raízes no ecossistema solo (Andrews et al., 1999; Hanson et al., 2000).

Apesar da importância da respiração do solo para o ciclo global do carbono e a sustentabilidade dos ecossistemas (Jensen et al., 2018), há uma lacuna significativa na compreensão de sua dinâmica com variáveis meteorológicas em diversos sistemas agrícolas em condições tropicais (Davidson e Janssens, 2006; De Lucena et al., 2013). A falta de estudos aprofundados sobre as trocas gasosas que englobam a emissão de dióxido de carbono e o influxo de oxigênio no solo, juntamente com a escassez de investigações sobre a resposta da respiração do solo às condições climáticas pode limitar a compreensão da respiração do solo e a influência da atividade microbiana e respiração radicular.

A hipótese é que as condições ambientais governam a dinâmica respiratória do solo, uma vez que, as relações bióticas que consomem O_2 e produzem CO_2 apresentam fortes dependência de condições ambientais, como, temperatura do ar, umidade relativa, radiação e pressão atmosférica.

O objetivo foi investigar a dinâmica das trocas gasosas no solo em conjunto com a temperatura do ar, umidade relativa, radiação fotossinteticamente ativa e pressão atmosférica em diferentes sistemas agrícolas tropicais para avançar na compreensão da respiração do solo. Assim focou-se em análise da variabilidade temporal da respiração do solo, visando suprir a escassez de informações sobre a dinâmica respiratória do solo e seus compartimentos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Entendendo o solo: composição e a importância

O solo é um sistema aberto e dinâmico (Mendonça, 2010). Por outro lado, o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) apresenta uma definição complexa, que considera o solo uma composição tridimensional e dinâmica distribuídas em partes sólidas, líquidas e gasosas (Santos et al., 2018). A ideia do solo trifásico é amplamente conhecida no campo científico, entre outros fatores, o solo ideal para o desenvolvimento das plantas deve apresentar profundidade adequada ao armazenamento de água e ao crescimento das raízes além de ter suprimento adequado de nutrientes, baixo nível de elementos tóxicos; textura adequada, boa estrutura para facilitar o movimento de ar, água e raízes, e boa atividade biológica e drenagem (Giongo e Cunha, 2010).

Embora seja um compartimento muito pequeno, cerca de 5%, o conteúdo de matéria orgânica é um componente importante a ser considerado nos solos tropicais, em que, as condições climáticas favorecem a decomposição mais acerelada da matéria orgânica do solo devido às condições ambientais associada a elevada atividade biológica (Bini et al., 2016; Briedis et al., 2016). No entanto, essa atividade biológica depende da atmosfera do solo (parte gasosa) e as interações com a fração liquida que possibilita as condições necessárias para a manutenção da atividade biológica (Bini et al., 2013; Inagaki et. al, 2016).

Dentre as condições ambientais destacam-se variáveis importantes como a temperatura e umidade do solo. Em uma revisão, Davidson e Janssens (2006), apresentaram a importância do estudo da temperatura do solo ao relacionar a sensibilidade que o carbono do solo tem aos aumentos da temperatura, uma vez que, aumenta a influência nos organismos que atuam na decomposição do carbono e funcionam como mecanismos de retroalimentação às mudanças do clima (Dusenge et al., 2018).

Outro aspecto, é que não existe uma dependência única da temperatura do solo, esses microrganismos para serem ativados necessitam de condições de umidade que favorecem à vida, denotando assim, a umidade do solo. No entanto, a matéria orgânica no solo é constituída por diferentes compostos que apresentam

diferentes graus de estabilidade e complexidade molecular, o que aumenta significavelmente a importância dessa fração pequena, porém de extremamente necessária no entendimento da dinâmica e interações com o solo na biosfera.

2.2 Dinâmica de transferência de massas de ar

O processo de movimento ou transporte de gases no solo ocorrem fundamentalmente por difusão. Os gases, incluindo o oxigênio e o dióxido de carbono se movimentam seguindo as leis da difusão descrita pela primeira lei de Fick. Fisicamente, a difusão pode ser definida como o movimento de partículas, em meio líquido ou gasoso de uma concentração mais elevada para uma mais baixa (Reichardt, 1975; Neira et al., 2015).

As principais características que afetam o processo de difusão dos gases no solo são as propriedades físicas, com destaque para a porosidade, em especial, a porosidade livre de água. No entanto, ainda outros fatores como, a umidade do solo podem oferecer ressistência ao transporte de oxigênio do solo ao mesmo tempo que água no solo é um fator crucial que controla os processos de biodegradação e reações de oxidação da matéria orgânica do solo, além de elevar produção de CO_2 no solo com aumento da atividade biológica (Neira et al., 2015; Franklin et al., 2021).

O influxo de oxigênio da atmosfera para o solo é demandado para suprir diversos processos biológicos do metabolismo do solo e respiração aeróbica de raízes de plantas e microorganismos que utilizam o oxigênio para obtenção de energia via cadeia respiratória (glicólise, ciclo de krebs, fosforilação oxidativa), assim efeitos na limitação do oxigênio podem atuar direta ou indiretamente na atividade respiratória do solo e nos processos vegetais que incluem a respiração radicular (ou da rizosfera) (Atkin et al., 2000; Neira et al., 2015; Romagnoli e Andreote, 2016).

Apesar do fluxo preferencial na dinâmica do carbono do solo ser descrito por processos físicos (difusão), sua produção e dinâmica é controlada por processos bioquímicos (Franklin et al., 2021). Isso explica o controle exercido pela umidade e temperatura do solo ao longo do tempo nas emissões de CO_2 do solo (Davidson e Janssens, 2006; Lal, 2009; Lal, 2022). A umidade atua frequentemente nos fenômenos de mobilidade e atividade da biomassa microbiana, além que, a água é importante nos processos de mineralização do carbono o que também conecta-se

com a biodiversidade de organismos (Bini et al., 2013; Bini et al., 2016; Franklin et al., 2021).

2.3 Matéria orgânica do solo: tendências globais para manutenção do carbono do solo

A importância da matéria orgânica do solo está intimamente ligada a fertilidade e sua relação com as melhorias dessas propriedades que pode representar cerca de 75 a 90% da capacidade de troca de cátions nas regiões tropicais (Briedis et al., 2012). A matéria orgânica é apresentada com elevado grau de complexidade no entendimento de suas dinâmicas, porém, Brady e Weil (2013) apresentaram uma divisão didática dos compartimentos da matéria orgânica, que estão divididas em: biomassa (tecidos intactos de plantas e animais e microrganismos), detritos (raízes mortas e outros resíduos que são reconhecíveis) e húmus. Notadamente, a matéria orgânica do solo tem sido associada como fator de equilíbrio global do carbono no solo (Briedis et al., 2016; Cerri et al., 2023).

As estratégias atuam de maneria diferente de cada compartimentos da matéria orgânica do solo, ora elevando a biomassa, ora aumentando os detritos (fornecimento de material orgânico), ora, contribuindo para formação do húmus, um componente mais complexo é percebido ao longo do tempo, o que pode contribuir na incorporação do carbono no solo. Assim, dado papel e importância dos manejos do solo que priorizam o armazenamento do carbono do solo frequentemente associados aos sistemas de produção orgânica favorecem esse armazenamento com uso de técnicas, como, uso de adubos orgânicos que beneficiam o enriquecimento da microbiota edáfica (Feistauer et al., 2017).

Contudo, outras estratégias de manejo têm sido crucial na manutenção do carbono do solo, são classificadas como práticas agrícolas atenuadoras do aquecimento global, o que inclui, os diferentes sistemas integração (lavoura-pecuária, lavoura-pecuária-floresta), as agroflorestas, as pastagens bem manejadas, além dos sistemas de cana-de-açúcar com colheita mecanizada, desde que priorizam a cobertura do solo (palhada da cana) associada ao uso racional de insumos (Cerri et al., 2023). Além da diversidade de cultivos (policultivos, rotação de cultura) auxilia na manutenção da biodiversidade dos solos (Feistauer et al., 2017), em especial, na

região da rizosfera influenciada pela liberação de exsudatos das raízes das plantas (Moreira e Siqueira, 2006).

O solo é o sistema terrestre que possui o maior reservatório de carbono (Jensen et al., 2018). Globalmente, estima-se que cerca de 12% desse carbono está em áreas agrícolas, o que corresponde a aproximadamente 1,87 bilhão de hectares (Cerri et al., 2023). Logo, a agricultura pode atuar em duas vertentes: potencializar as ações antrópicas que pressionam o efeito estuda adicional aumentando a emissão de gases de efeito estufa ou contribuir na redução de dióxido de carbono da atmosfera, auxiliando na incorporação desse carbono no solo.

O ambiente está sob ameça é o que foi apresentado na síntese do sexto relatório sobre o clima (IPCC, 2023), logo, estudos que avancem no entendimento das conexões que envolvem a matéria orgânica do solo, o ciclo do carbono e o carbono no solo, são tendências globais para intensificação de formas de agriculturas menos danosas ao planeta. Essas práticas incluem desde o manejo ecológico do solo (Privavesi, 2009), passando pelo os reflorestamentos (Vicentini et al., 2023) até o plantio direto na palha (Moitinho et al., 2013) ou a manutenção da palha na cana-de-açúcar (Pimentel et al., 2024).

Os estudos de Pimentel et al. (2024) sugerem uma taxa de manutenção da palhada no solo da ordem de 10 Mg ha^{-1}, onde observaram a conservação e proteção física do carbono no solo. Essas medidas quando adotadas auxiliam na promoção de sustentabilidade agrícola-ambiental. Esses benefícios vão além do equilíbrio ambiental, pois promovem também benefícios socioeconômicos e são essenciais para contribuir com a agenda do climática e os objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS/ONU).

2.4 Agricultura tropical: influência do manejo e do uso da terra na sensibilidade do carbono da biomassa

Os ecossistemas tropicais são diversos e apresentam importâncias econômicas e ambientais de forma global. Entre as importâncias econômicas destaca-se a produção de alimentos. Em 2023 o Brasil registrou recordes nas exportações de carnes, frutas, soja e cereais (MAPA, 2024). Por outro lado, a importância ambiental está mais associada à dinâmica do carbono, uma vez que, os solos tropicais são fontes significativas de emissões do dióxido de carbono do solo para a atmosfera

devido a processos de decomposição da serrapilheira e da matéria orgânica, embora sejam processos naturais, no tempo, a variabilidade dessas emissões pode ser influenciada por fatores como temperatura, umidade, disponibilidade de carbono orgânico, manejo agrícola e o uso da terra (Briedis et al., 2016; Lal, 2022).

Existem diversas dificuldades associadas ao manejo do solo nos trópicos, entre elas, algumas técnicas podem potencializar a biodegradação da matéria orgânica do solo (Bini et al., 2016), como, o preparo do solo mecanizado que expõe a superfície do solo á solarização (Bini et al., 2013). No entanto, existem praticam que visam a manutenção do carbono orgânico, como, o plantio direto na palha, que reduz as dificuldades associada ao preparo do solo e também usa a palha para incorporação ao solo como fonte de material orgânico (Moitinho et al., 2013; Pimentel et al., 2024).

O uso do solo tem causado uma preocupação global, pois as mudanças do uso do solo que alavancam as emissões de dióxido de carbono, nesse sentido, estima-se que cerca de 20% das emissões brasileiras seja oriundas de processos de mudança do uso do solo (La Scala Jr et al., 2023). A mundança do uso do solo que anteriormente eram florestados e modificados por meio de queimadas promove a destruição da biomassa microbiana do solo, além de jogar na atmosfera terrestre toneladas de CO_2, gás potencializador das mudanças climáticas e uma forçante do aquecimento global de origem antrópica. (Andrews et al., 1999; Bini et al., 2016; La Scala Jr et al., 2023).

A biomassa microbiana do solo representa a maioria da biomassa viva do planeta e assim regula o funcionamento dos ecossistemas na biosfera (He et al., 2018). Esses organismos são os responsáveis pela ciclagem do carbono na superfcie terrestre (Bini et al., 2013; He et al., 2018), além de servir como indicador da qualidade agrícola e ambiental dos solos (De Lucena et al., 2018). A diversidade e variabilidade da biomassa microbiana no solo é governada pelo tipo de vegetação (ou a ausência) e o uso do solo (Zhang et al., 2016), por outro lado, sazonalidade imposta pelas condições climáticas são reguladoras da quantidade de biomassa microbiana (Singh e Gupta, 2018).

Entre os principais mecanismos de regulação exercido pela biomassa microbina do solo, destacam-se, os microorganismos fixadores de nitrogênio, solubilizadores de fósforo (P) e os promotores de crescimento (Singh e Gupta, 2018). A atividade exercida pela biomassa microbiana é essencial a fertilidade dos solo

agrícolas (De Lucena et al., 2018), no entanto, alterações no uso da terra (Bini et al.,2013) ou na cobertura vegetal (De Lucena et al., 2023) modificam o ecossistema e o equilibrio na ciclagem de nutrientes.

Outras alterações impostam pelas mudanças climáticas, como, mudança na temperatura do ar e quantidade de CO_2 atmosférico também foram relacionadas a perda da qualidade e quantidade microbiana nos solos, pois esses organismos são muito sensíveis a mesmo pequenas alterações ambientais, além que, no solo, a concentração de CO_2 é cerca de 17 vezes superior que na atmosfera, assim as emissões CO_2 afetam facilmente a quantidade de C na atmosfera (Andrews et al., 1999; Davidson e Janssens, 2006; Lal, 2022).

Em condições tropicais a perda de carbono nos solos podem ser potencializada pelas condições ambientais impostas aos agroecossistemas (Davidson e Janssens, 2006; Briedis et al., 2016), assim não apenas o manejo ou o uso do solo são questões de restrita importância, mas também as condições impostas pelo aumento da temperatura e o aumento das concentrações de CO_2 atmosférico ao longo do tempo (Zhang et al., 2016; Lal, 2022), isto é, a mudança do clima atua também como um potencializador de mais mudanças no clima o que resulta no aceleração das perdas de C do solo para atmosfera (Singh e Gupta, 2018).

Um mecanismo para frear a reação em cadeia das mudanças climáticas é a recuperação de áreas degradas por meio do reflorestamento, por isso diversos estudos têm avaliado a dinâmica da respiração do solo em florestas plantadas (Canteral el. al., 2023; Vicentini et al., 2023). No entanto, no processo de recuperação uma estratégia a ser utilizada é o cultivo de uma espécie agrícola como pioneira e assim haverá uma recuperação gradual dos serviços ecossistêmicos da biomassa microbiana edáfica (Singh e Gupta, 2018).

As florestas tropicais e subtropicais possuem os maiores reservatórios de carbono na fitomassa aérea (Kutsch et al., 2002) e assim podem contribuir para descarbonização da atmosfera. Em adição, o grande volume de raízes produzido pelo cultivo agrícola estimula o acúmulo e a recuperação da biomassa microbiana em solos degradados (Ramagnoli e Andreote, 2016). Portanto, espécies que tem maior capacidade volumosa de raízes, assim como, espécies que realizam associações simbióticas são requeridas nesse estágio, a saber, pastagens, milho e soja (Hanson et al., 2000; Ramagnoli e Andreote, 2016).

Os serviços ecossistêmicos de imobilização e mineralização de nutrientes oferecido pela biomassa microbina do solo (Singh e Gupta, 2018) fornecem as condições necessárias ao desenvolvimento das culturas agrícolas ao tempo que melhoram o equilíbrio na ciclagem de nutrientes do solo o que levará as condições edáficas apropriadas ao cultivo de florestas (reflorestamento) (Ramagnoli e Andreote, 2016; Bini et al., 2016). Um modelo esquemático baseado nessa dinâmica é apresentado na Figura 1.

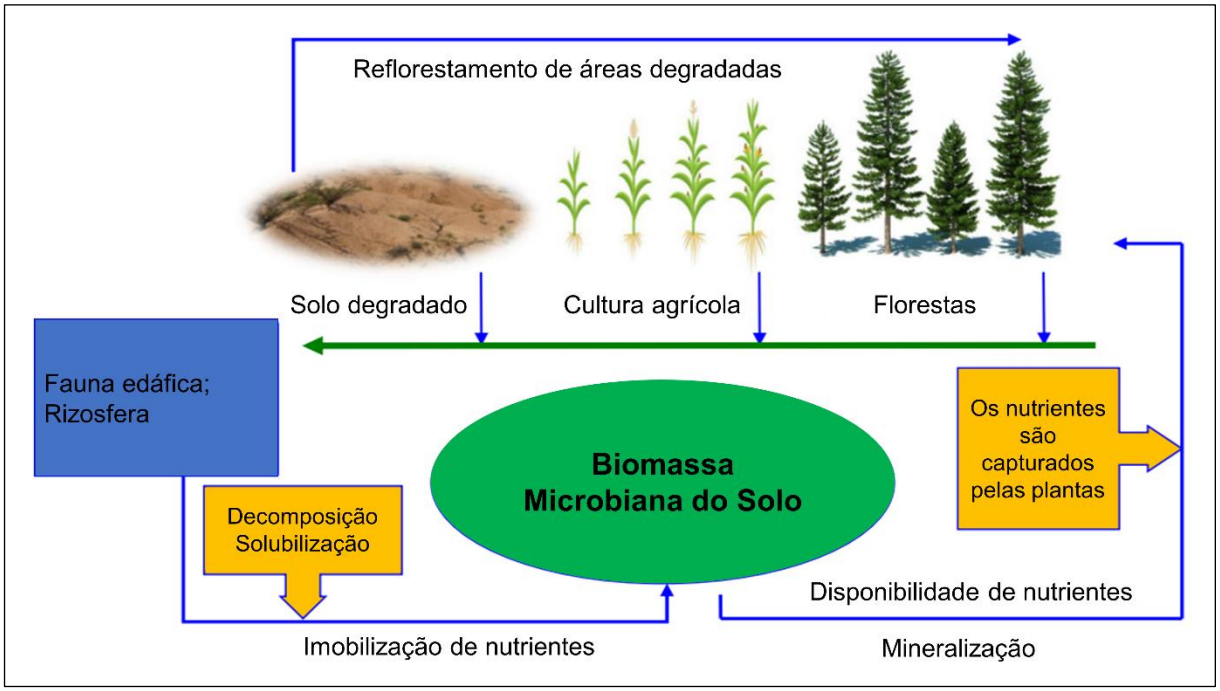


Figura 1. Modelo esquemático das contribuições da biomassa microbiana do solo como fontes de nutrientes para o desenvolvimento agrícola e florestal. Fonte: Singh e Gupta, 2018.

2.5 Estudos em respiração solo: descobertas e perspectivas futuras

A respiração do solo é um processo crucial, no qual ocorre o fluxo do dióxido de carbono do solo para atmosfera e faz parte ciclo biogeoquímico do carbono (C) (Luo e Zhuo, 2006), assim é um processo ocorre de forma global, embora seja frequentemente analisado por regiões (Schmiege et al., 2023). A emissão de CO_2 do solo é responsável pelos maiores fluxos de C da superfície do solo para a atmosfera terrestre cerca de 68 a 101 Pg C ano^{-1} (Jian et al., 2021).

Um modelo simplificado dos compartimentos de emissão de CO_2 do solo foi apresentado por Fang e Moncrieff (1999); Luo e Zhuo (2006), ambos, consideram a

respiração do solo o fluxo do dióxido de carbono emitido da componente solo que sofre ação da atividade microbiana mais a componente raiz (incluindo a respiração da raiz primárias, secundárias e rizosfera), esse modelo foi apresentado na equação a seguir.

$$R_s = R_m + R_r \quad \text{Equação 1}$$

Em que, A respiração do solo (R_s) é obtida pela soma da respiração microbiana (R_m) mais a respiração das raízes (R_r).

Embora fatores, como, umidade do solo, a temperatura do solo, porosidade e disponibilidade de oxigênio sejam mais frequentemente associados a respiração microbiana do solo (Lal, 2022; De Lucena et al., 2023), esses também são fatores diretamente relacionados a respiração radicular (Ramagnoli e Andreote, 2016), o que permite conceituar que são fatores diretos ligados a respiração global do solo, no entanto, para o entendimento dos compartimentos de forma isolada é importante destacar que fatores climáticos ambientais que normalmente são mais associados ao elemento “planta”, podem estar associados diretamente com a respiração de raízes, a saber, radiação solar, umidade relativa, temperatura do ar e a fotossíntese (Atkin et al., 2000; Kutsch et al., 2002).

A fotossíntese é um processo bioquímico de fixação do C nas plantas, inclui diversas vias metabólicas (entre elas, a glicólise), estima-se que cerca de 50% do dióxido de carbono capturado durante a fotossíntese pode ser emitido via respiração radicular (Luo e Zhuo, 2006). Essa respiração mitocondrial nas raízes ocorre devido a necessidade energética rapidamente utilizável requerida no processo de absorção de água e nutrientes pelas raízes (Atkin et al., 2000). A energia usada nesse respiração celular é na forma de ATP (adenosina trifosfato), ou seja, produto da respiração celular oriundo da quebra de açúcares solúveis obtidos na fotossíntese que foram transportados pelo floema até as raízes, essa energia é resultado direto do ciclo do ácido tricarboxílico (ciclo de Krebs) que demanda o consumo de O_2 para cadeia transportadora de elétrons e como subproduto da respiração radicular o dióxido de carbono é produzido e liberado pelas raízes (Atkin et al., 2000).

Contudo, a presença de raízes propicia a existência da rizosfera, essa camada varia de 1 a 3 mm de espessura na região mais próxima das raízes é rica em carboidratos que atraí uma fauna edáfica especializada no consumo desses carboidratos, em muitos casos ocorrem associações simbióticas em que a bactéria ou

fungo facilitam a biodisponibilidade de nutrientes importantes para a planta por meio da mineralização (Moreira e Siqueira, 2006), a este processo é denominado de respiração microbiana da rizosfera, embora sejam microorganismos que realizam essa respiração ela está acopladas à existência de raiz, assim foram atribuíram ao compartimento da respiração radicular (Luo e Zhuo, 2006). Assim um modelo esquemático baseado na equação 1 é apresentado na Figura 3.

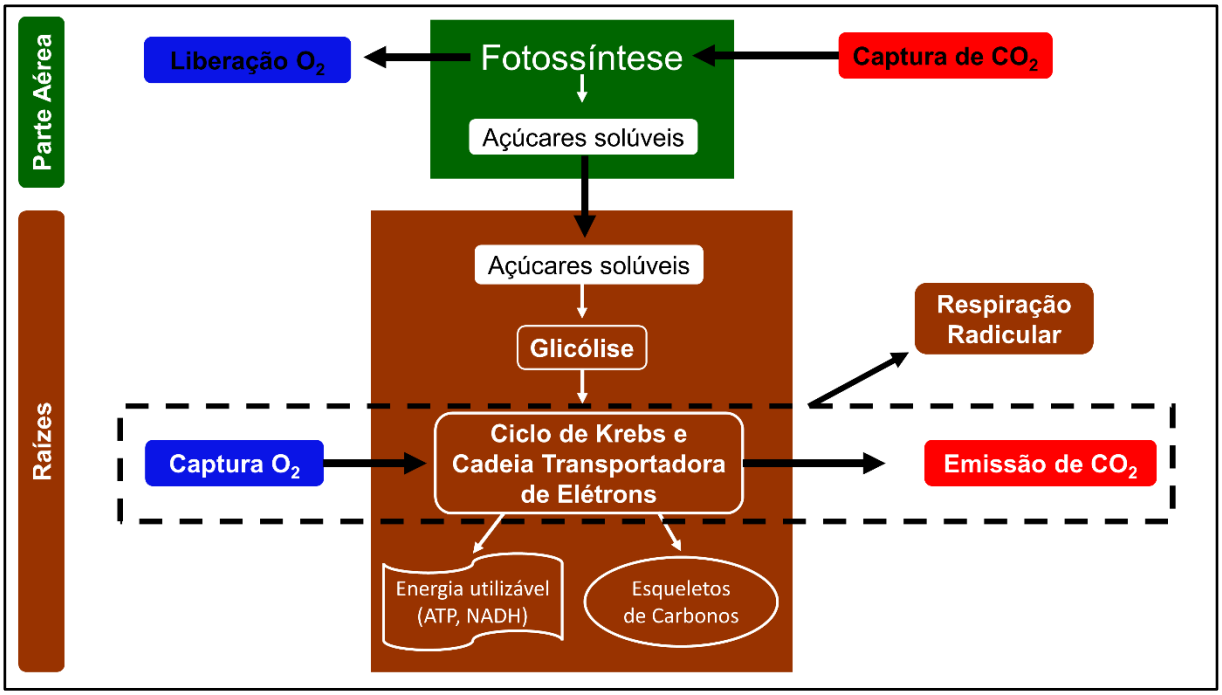


Figura 2. Visão simplificada dos processos envolvidos no ganho de carbono na parte aérea e geração de produtos respiratório nas raízes. Adaptado de Atkin et al., 2000.

No modelo esquemático dos compartimentos da respiração do solo (Figura 2), é notável a importância do consumo de oxigênio para os mecanismos de decomposição aeróbica, atividade microbiana, respiração de raízes, reações de oxidações da matéria orgânica do solo e respiração da fauna na rizosfera. Sabendo que o oxigênio desempenha um importante papel no ecossistema solo, em especial, devido sua necessidade durante a cadeia transportadora de eletróns na respiração celular (Bini et al., 2016).

A oxigenação do solo pode ser um fator limitante em sua capacidade produtiva. O estudo conduzido por Nobel e Palta (1989) demonstrou a essencialidade do oxigênio para a respiração de raízes. Ao simular atmosferas de solo que viam desde 21% de O_2 (atmosfera terrestre) até 0% de O_2, os autores perceberam que a respiração de raízes também era zero, em alguns casos provocou a morte das

espécies de plantas testadas. Porém, a partir de 2% de O_2 iniciava uma atividade respiratória mínima, no estudo não se observou diferenças significativas na respiração de raízes quando o percentual de oxigênio no solo variou de 5% até 21%. Foi demonstrado assim a essencialidade do O_2 para as raízes ao mesmo tempo indicando que pode acontecer variações maiores que as observadas na atmosfera terrestre (Nobel e Palta, 1989).

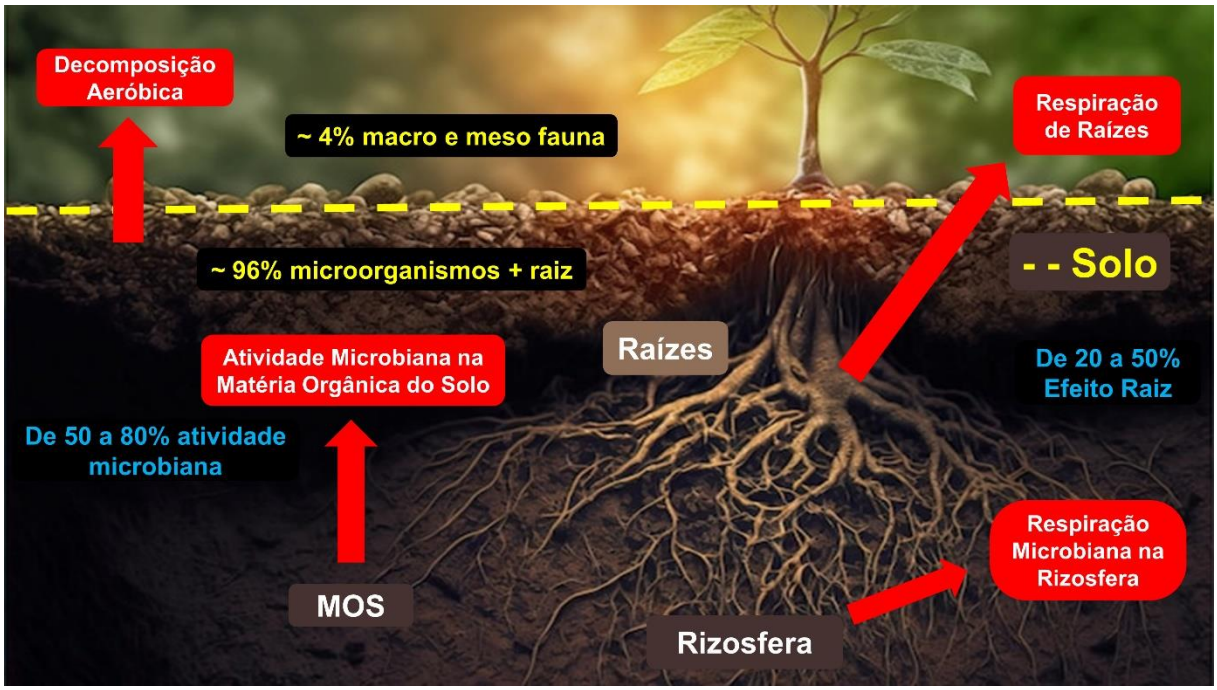


Figura 3. Compartimentos da respiração do solo. Adaptado de Luo e Zhuo, 2006.

A respiração do solo é amplamente estudada, e por vezes mais associada a emissão de CO_2, embora já sabido dos compartimentos respiratórios existentes no solo (Figura 3) (Atkin et al., 2000; Luo e Zhuo, 2006), pouco estudos visam o entendimento da dinâmica do oxigênio no solo e sua importância na respiração de raízes (Vicentini et al., 2019; De Lucena et al., 2023). A respeito da separação das contribuições microbianas e radicular da respiração do solo, ainda não há subdivisão dentro da respiração radicular ao ponto de quantificar a respiração microbiana da rizosfera da radicular propriamente dita (Kutsch et al., 2002), assim os diversos estudos citados ao longo do texto consideram apenas a respiração de raízes (efeito raiz) versus a respiração microbiana (atividade microbiana) (Ramagnoli e Andreote, 2016).

E por fim, novas abordagens precisam ser testadas e/ou desenvolvidas a fim de estudar a fundo cada compartimento da respiração do solo, este seria um grande

passo ao entendimento da dinâmica do carbono no solo, bem como, as estratégias para conservar esse carbono no ecossistema solo e assim subsidiar as políticas públicas de mitigação das mudanças climáticas.

3 CONTEXTUALIZANDO AS CONEXÕES

O metabolismo é o termo dado a soma de todas as reações que ocorre num organismo (Bini et al., 2016). Assim, pode-se conceituar o metabolismo respiratório do solo como a respiração global oriunda do somatório de respiração da atividade microbiana e do compartimento da rizosfera. A rizosfera diz a respeito à região mais próxima do solo que é diretamente influenciada pelo efeito da raiz, a comunidade microbiana que é influenciada pela liberação de exsudatos das raízes atua restritamente na catabolização da matéria orgânica do solo e mineralização de nutrientes, deixando-os prontamente mais disponível às plantas (Romagnoli e Andreote, 2016). Contudo, esse processo de natureza aeróbica é dependente de oxigênio para as reações de oxidações da matéria orgânica (Bini et al., 2016) e respiração radicular (Atkin et al., 2000; Moreira e Siqueira, 2006; Luo e Zhuo, 2006).

Basicamente dois processos são responsáveis pela ciclagem de nutrientes e manutenção da vida na Terra, e são eles: decomposição e fotossíntese (Bini et al., 2016). E, ambos processos estão intimamente ligados ao ciclo biogeoquímico do Carbono. No solo, ocorrem diversas reações metabólicas complexas, como observada na Figura 1. No entanto, em todas as reações a atividade microbiana edáfica atua como centro-motor, ora, desencadeando, ora, acelerando os fenômenos, como, imobilização, mineralização e solubilização de nutrientes (Bini et al., 2016).

A riqueza da fauna edáfica já foi abordada por diversos autores, bem como, sua importância na quantificação da respiração global do solo (Nobel e Palta, 1989; Andrews et al., 1999; Atkin et al., 2000; Kutsch et al., 2002). No entanto, Primavesi (2009) propôs a comunidade científica uma estimativa de cerca 20 milhões de organismos vivos para cada 1 cm^{-3} de solo saudável. A ideia de solo saudável não é nova, mas a ideia que a saúde do solo é uma componente vital a produtividade agrícola, controle dos serviços ecossistêmicos e da segurança alimentar e nutricional é algo realmente novo, denominada de segurança do solo (McBratney et al., 2014).

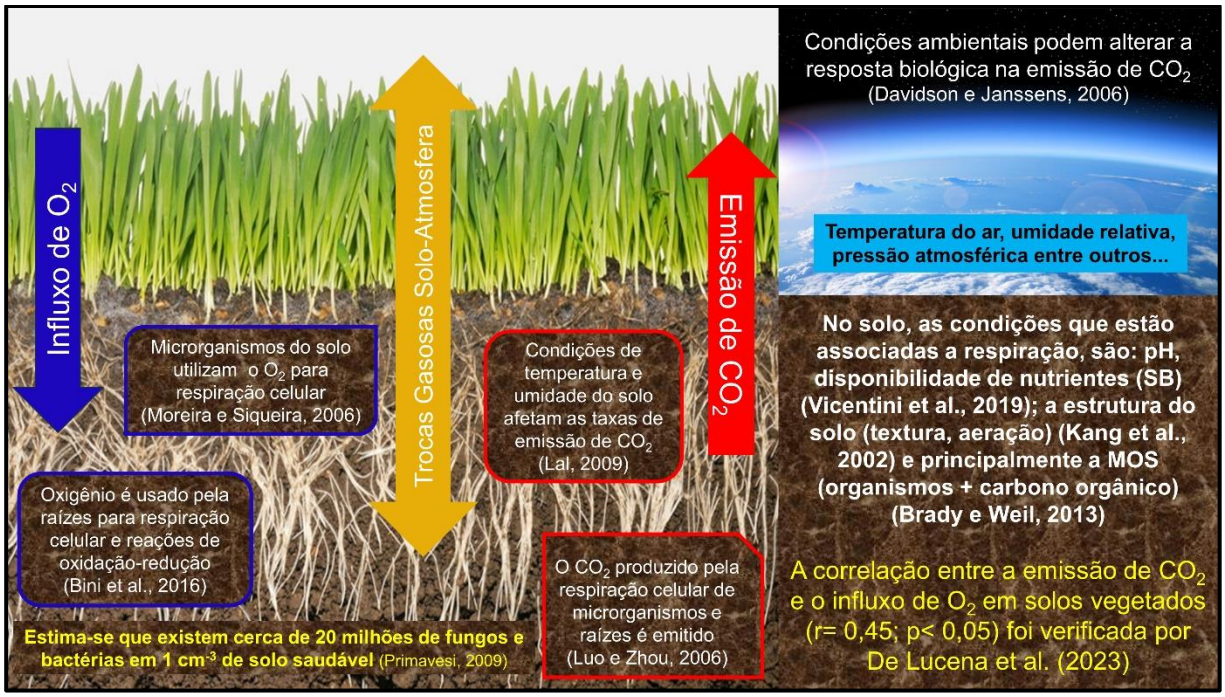


Figura 4. Diagrama de ideias para o metabolismo respiratório do solo. Fonte: Imagens obtidas da internet. Elaborado pelo autor.

A segurança do solo assume papel de importância global (McBratney et al., 2014), por que do solo dependem as plantas e a vida na Terra (Primavesi, 2009). Afim de conscientizar as nações ao redor do globo sobre a importância do solo, as Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) decretou em 2015, a década internacional dos solos, isto é, uma campanha de nível mundial que visa sensibilizar e mobilizar as sociedades sobre o papel e importância do solo para o futuro do planeta e manutenção da vida humana. Nesse relatório da ONU (Organizações das Nações Unidas) também nasce a Agenda 2030, na qual, propõe os 17 objetivos para o desenvolvimento sustentável (ODS) (FAO, 2015).

Após contextualizada a motivação, observa-se boa construção do conhecimento nos últimos dez anos. Embora os avanços no entendimento das conexões que englobam os mecanismos respiratório do solo sejam singelos, nesta tese, os capítulos 2 e 3 avançaremos no entendimento de conexão por conexão afim de compartimentar e entender as contribuições das emissões de CO_2 do solo e da respiração radicular ou ainda oriundas da mudança do uso do solo.

As leituras realizadas durante a escrita deste capítulo foram essenciais e gerou como produto o diagrama de ideias apresentado na Figura 4, no qual reuni as principais consolidações científicas sobre a respiração do solo até a presente data.

Assim é possível explorar as ideias existentes e propor novos caminhos no pensamento para avançar na interpretação dos estudos sobre metabolismo respiratório do solo. Ficou evidente o papel do oxigênio e a necessidade de estudo da captura de O_2 nesse metabolismo. Além, é claro do fato que as condições ambientais foram sempre associadas ao metabolismo do solo (Luo e Zhuo, 2006; Davidson e Janssens, 2006; De Lucena et al., 2023). Assim, os estudos em respiração do solo devem considerar as fontes de demandas de O_2 no solo, bem como, a relação do metabolismo respiratório do solo com fatores climáticos.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, D. A.; LEAL, F.; PINHO, A. F.; FAGUNDES, L. D. 2006. Gestão do conhecimento na análise de falhas: mapeamento de falhas através de sistema de informação. **Produção.** 16: 171-188. https://doi.org/10.1590/S0103-65132006000100014.

ANDREWS, J. A.; HARRISON, K. G.; MATAMALA, R.; SCHLESINGER, W. H. 1999. Separation of root respiration from total soil respiration using Carbon-13 labeling during Free-Air Carbon Dioxide Enrichment (FACE). **Soil Science Society of America Journal.** 63: 1429-1435. https://doi.org/10.2136/sssaj1999.6351429x.

ATKIN, O. K.; EDWARDS, E. J.; LOVEYS, B. R. 2000. Response of root respiration to changes in temperature and its relevance to global warming. **New Phytologist.** 147:141-154. https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2000.00683.x.

BINI, D.; LOPEZ, M. V.; CARDOSO, E. J. B. N. 2016. Metabolismo microbiano. **In:** CARDOSO, E. J. B. N.; ANDREOTE, F. D. (org.). Microbiologia do solo. 2. Ed. Piracicaba: Esalq. p. 61-80.

BINI, D.; SANTOS, C. A.; CARMO, K. B.; KISHINO, N.; ANDRADE, G.; ZANGARO, W.; NOGUEIRA, M. A. 2013. Effects of land use on soil organic carbon and microbial processes associated with soil health in southern Brazil. **European Journal of Soil Biology.** 55: 117–123. http://dx.doi.org/10.1016/j.ejsobi.2012.12.010.

BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos.** 3ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 704p.

BRIEDIS, C.; SÁ, J. C. de M.; CAIRES, E. F.; NAVARRO, J. de F.; INAGAKI, T. M.; FERREIRA, A. de O. 2012. Carbono do solo e atributos de fertilidade em resposta à calagem superficial em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira.** 47(7), 1007-1014. https://doi.org/10.1590/S0100-204X2012000700018.

BRIEDIS, C.; SÁ, J. C. de M.; LAL, R.; TIVET, F.; FERREIRA, A. O.; FRANCHINI, J. C.; SCHIMIGUEL, R.; HARTMAN, D. C.; SANTOS, J. Z. 2016. Can highly weathered soils under conservation agriculture be C saturated? **Catena.** 147, 638–649. https://doi.org/ 10.1016/J.CATENA.2016.08.021.

CERRI, C. E. P.; ABBRUZZINI, T. F.; CARVALHO, J. L. N.; CHERUBIN, M. R.; FRAZÃO, L. A.; MAIA, S. M. F.; OLIVEIRA, D. M. S. 2023. Matéria orgânica do solo e o equilíbrio global de carbono. **In:** BETTIOL, W.; SILVA, C. A.; CERRI, C. E. P.; MARTIN-NETO, L.; ANDRADE, C. A. (Org.). Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical. Brasília: Embrapa. p. 211-254.

CUSACK, D. F.; LEE H. DIETTERICH, L. H.; BENJAMIN N. SULMAN, B. N. (2023). Soil respiration responses to throughfall exclusion are decoupled from changes in soil moisture for four tropical forests, suggesting processes for ecosystem models. **Global Biogeochemical Cycles.** 37, e2022GB007473. https://doi. org/10.1029/2022GB007473.

CHIN, M. Y.; LAU, S. Y. L.; MIDOT, F.; JEE, M. S.; LO, M. L.; SANGOK, F. E.; MELLING, L. 2023. Root exclusion methods for partitioning of soil respiration: Review and methodological considerations. **Pedosphere.** 33(5):686-699. https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2023.01.015.

DAVIDSON, E.; JANSSENS, I. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. **Nature.** 2006. https://doi.org/10.1038/nature04514.

DE LUCENA, W. B.; TAVARES, M. A.; CARMO, P. H. O.; PERÔNICO, B.W.C.; SANTOS, J. M.; FERREIRA, G. B. 2018. Agricultura sustentável e atributos biológicos do solo: uma breve revisão sobre os indicadores da qualidade agrícola-ambiental. **In:** Oliveira, A.C. (Ed). Ensaios nas Ciências Agrárias e Ambientais. 1ed. Ponta Grossa: Atena. p.45-52. https://doi.org/10.22533/at.ed.079182907.

DE LUCENA, W.B.; VICENTINI, M.E.; SANTOS, G.A.A.D.; SILVA, B.O.; COSTA, D.V.M.; CANTERAL, K.F.F.; NEIRA ROMÁN, J.A.; ROLIM, G.S.; PANOSSO, A.R.; LA SCALA JR, N. Temporal variability of the CO_2 emission and the O_2 influx in a tropical soil in contrasting coverage conditions. **Journal of South American Earth Sciences.** 2023. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.104120.

DUSENGE, M. E.; DUARTE, A. G.; WAY, D. A. 2018. Plant carbon metabolism and climate change: elevated CO_2 and temperature impacts on photosynthesis, photorespiration and respiration. **New Phytologist.** 221: 32-49. https://doi.org/10.1111/nph.15283.

FANG, C.; MONCRIEFF, J. B. 1999. A model for soil CO_2 production and transport 1: Model development. **Agricultural and Forest Meteorology.** 95: 225-236. https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00036-2.

FEISTAUER, D; LOVATO, P. E.; MACHADO DA ROSA, A. C; SIMINSKI, A. Avaliação da transição agroecológica em propriedades rurais familiares em sistema orgânico e convencional de produção no norte do Mato Grosso. **Revista Brasileira de Agroecologia.** v. 12, n. 1, p. 32-41, 2017.

FRANKLIN, S. M.; KRAVCHENKO, A. N.; VARGAS, R.; VASILAS, B.; FUHRMANN, J. J.; JIN, Y. 2021. The unexplored role of preferential flow in soil carbon dynamics. **Soil Biology and Biochemistry.** 161: 108398. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.10839.

GIONGO, V.; CUNHA, T. J. F. Sistema de Produção de Melão: manejo de solo. Embrapa Semiárido, Sistemas de Produção 5, 2010. Disponível em < http://www.cpatsa.embrapa.br:8080/sistema_producao/spmelao/manejo_do_solo.html>. Acesso em 12/07/2023.

HANSON, P. J.; EDWARDS, N. T.; GARTEN, C. T.; ANDREWS, J. A. 2000. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations. **Biogeochemistry.** 48: 115–146. https://doi.org/10.1023/A:1006244819642.

HE, X.; HOU, E.; VEEN, G. F.; ELLWOOD, M. D. F.; DIJKSTRA, P.; SUI, X.; ZHANG, S.; WEN, D.; CHU, C. 2019. Soil microbial biomass increases along elevational gradients in the tropics and subtropics but not elsewhere. **Global Ecology and Biogeography.** 29:345-354. https://doi.org/10.1111/geb.13017.

INAGAKI, T. M.; MORAES SÁ, J. C.; CAIRES, E. F.; GONÇALVES, D. R. P. 2016. Lime and gypsum application increases biological activity, carbon pools, and agronomic productivity in highly weathered soil. **Agriculture, Ecosystems & Environment.** 231: 156-165. https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.06.034.

JENSEN, J.L.; SCHJØNNING, P.; WATTS, C.W.; CHRISTENSEN, B.T.; PELTRE, C.; MUNKHOLM, L.J. 2018. Relating soil C and organic matter fractions to soil structural stability. **Geoderma.** https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.10.034.

JIAN, J.; VARGAS, R.; ANDERSON-TEIXEIRA, K.; STELL, E.; HERRMANN, V.; HORN, M.; KHOLOD, N.; MANZON, J.; MARCHESI, R.; PAREDES, D.; BOND-LAMBERTY, B. 2021. A restructured and updated global soil respiration database (SRDB-V5). **Earth System Science Data**. 13: 255-267. https://doi.org/10.5194/essd-13-255-2021.

KUTSCH, W. L.; STAACK, A.; WÖTZEL, J.; MIDDELHOFF, U.; KAPPEN, L. 2001. Field measurements of root respiration and total soil respiration in an alder forest. **New Phytologist.** 150:157-168. https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2001.00071.x.

LA SCALA JR, N.; MARTINEZ, A. S.; SPOKAS, K. A. 2023. Emissão de CO_2 e sua interface com a matéria orgânica do solo: uma visão multidisciplinar. **In:** BETTIOL, W.; SILVA, C. A.; CERRI, C. E. P.; MARTIN-NETO, L.; ANDRADE, C. A. (Org.). Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical. Brasília: Embrapa. p. 297-316.

LAL, R. 2022. Reducing carbon footprints of agriculture and food systems. **Carbon Footprints.** 1:3, 1-19. https://dx.doi.org/10.20517/cf.2022.05.

LUO, Y.; ZHOU, X. Soil respiration and the environment. San Diego: **Academic Press**; 2006. 316p.

MENDONÇA, J.F.B. **Solo:** substrato da vida. 2. ed. Brasília: Embrapa, 2010. 129 p.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA (MAPA). 2024. **Exportações do agronegócio fecham 2023 com US$ 166,55 bilhões em vendas.** Disponível em <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/exportacoes-do-agronegocio-fecham-2023-com-us-166-55-bilhoes-em-vendas>. Acesso em 19/01/2024.

MOITINHO, M.R.; PADOVAN, M.P.; PANOSSO, A.R.; LA SCALA JR, N. 2013. Efeito do preparo do solo e resíduos da colheita de cana-de-açúcar sobre a emissão de CO_2. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** 37: 1720-1728. https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000600028.

MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O. **Microbiologia e bioquímica do solo.** Lavras: Editora da UFLA, 2.ed., 2006, 729p.

MCBRATNEY, A.; FIELD, D. J.; ANDREA KOCH, A. 2014. The dimensions of soil security. **Geoderma.** 213: 203-213. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.013.

NOBEL, P. S.; PALTA, J. A. 1989. Soil O_2 and CO_2 effects on root respiration of cacti. **Plant & Soil.** 120: 263–271. https://doi.org/10.1007/BF02377076.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA ALIMENTAÇÃO E AGRICULTURA (FAO). 2015. **FAO lança relatório sobre a situação da segurança alimentar no Brasil.** Disponível em <https://www.fao.org/brasil/noticias/detail-events/pt/c/343719/>. Acesso em 28/01/2024.

PIMENTEL, M. L.; OLIVEIRA, A. B.; SCHIEBELBEIN, B. E.; CARVALHO, M. L.; TENELLI, S.; CHERUBIN, M. R.; CARVALHO, J. L. N.; BRIEDIS, C.; PANOSSO, A. R.; BORDONAL, R. O. 2024. Quantity, quality and physical protection of soil carbon associated with sugarcane straw removal in southern Brazil. **Soil & Tillage Research.** 237:105976. https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105976.

PRIMAVESI, A. M. 2009. **Cartilha do solo:** como reconhecer e sanar seus problemas. São Paulo: Movimento dos Trabalhadores Rurais Sem Terra (MST).

RAMAGNOLI, E. M.; ANDREOTE, F. D. Rizosfera. **In:** CARDOSO, E. J. B. N.; ANDREOTE, F. D. (org.). Microbiologia do solo. 2. Ed. Piracicaba: Esalq, 2016. p. 47-60.

REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera.** 3. ed. Piracicaba: Centro de Energia Nuclear na Agricultura/USP e Fundação Cargill. 1975, 286 p.

SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C.; OLIVEIRA, V.A.; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A. ARAUJO FILHO, J.C.; OLIVEIRA, J.B.; CUNHA, T.J.F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** 5ed. Brasília: Embrapa. 2018. 356p.

SINGH, J. S.; GUPTA, V. K. 2018. Soil microbial biomass: A key soil driver in management of ecosystem functioning. **Science of The Total Environment.** 634:497-500. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.373.

SCHMIEGE, S. C.; HESKEL, M.; YUZHEN FAN, Y.; WAY, D. A. 2023. It's only natural: Plant respiration in unmanaged systems. **Plant Physiology.** 192:710-727. https://doi.org/10.1093/plphys/kiad167.

VICENTINI, M. E.; PINOTTI, C. R.; HIRAI, W. Y.; MORAES, M. L. T.; MONTANARI, R.; TEIXEIRA FILHO, M.C.M.; MILORI, D.M.B.P.; LA SCALA JR, N.; PANOSSO, A.R. 2019. CO_2 emission and its relation to soil temperature, moisture, and O_2 absorption in the reforested areas of Cerrado biome Central Brazil. **Plant & Soil.** 444:193-211. https://doi.org/10.1007/s11104-019-04262-z

VICENTINI, M. E.; DA SILVA, P. A. CANTERAL, K. F. F.; DE LUCENA, W. B.; MORAES, M. L. T.; MONTANARI, R. TEIXEIRA FILHO, M. C. M.: PERUZZI, N. J.; LA SCALA JR, N.; ROLIM, G. S.; PANOSSO, A. R. 2023. Artificial neural networks and adaptive neuro-fuzzy inference systems for prediction of soil respiration in forested areas southern Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment.** 195:1074. https://doi.org/10.1007/s10661-023-11679-8.

ZHANG, Q.; WU, J.; YANG, F.; LEI, Y.; ZHANG, Q.; CHENG, X. 2016. Alterations in soil microbial community composition and biomass following agricultural land use change. **Scientific Reports.** 6, 36587. https://doi.org/10.1038/srep36587.

CAPÍTULO II - EMISSÃO DE CO_2 E INFLUXO DE O_2 EM SOLOS COM E SEM VEGETAÇÃO: ACESSANDO A RESPIRAÇÃO DE RAÍZES A PARTIR DA RESPIRAÇÃO DO SOLO E SUA RELAÇÃO COM VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS

Resumo:

Um fator indispensável ao entendimento da respiração radicular além da emissão do dióxido de carbono é o influxo de oxigênio do solo, assim o objetivo foi monitorar a dinâmica respiratória da emissão de CO_2 e influxo de O_2 sob duas condições de cobertura do solo (com e sem vegetação) e relacionar com as condições meterológicas. O monitoramento aconteceu com leituras às 07h, 10h, 12h, 15h e 17h em diferentes condições ambientais. Para o delineamento do experimento foram adotadas duas parcelas de $1m^2$ sob as condições de solo nu e solo vegetado com grama (*Paspalum notatum*). Para a determinação da emissão de CO_2 do solo foi utilizado o sistema portátil Li-8100, enquanto o influxo de O_2 do solo foi obtido pela interpolação linear da varição de oxigênio na câmara usando um sensor inteligente de oxigênio UV Flux 25% modelo CM-42951. Os dados foram submetidos a análise de variância para medidas repetidas no tempo. Os resultados demostraram que a emissão de CO_2 e o influxo de O_2 são supeiores em solo vegetado, outro padrão identificado é que o pico de emissão de CO_2 e o pico de influxo de oxigênio ocorre entre 10h e 15h. A emissão de CO_2 foi fortemente associadas a umidade do solo sem vegetação ($r = 0,76$; $p < 0,05$) e com vegetação ($r = 0,80$; $p < 0,05$). O influxo de O_2 no solo vegetado foi associado com a radiação fotossinteticamente ativa ($r = 0,79$; $p < 0,05$) e está atrelado a atividade da fotossíntese e consequentemente respiração radicular. Conclui-se a existência da respiração radicular e sua dependência com o influxo de oxigênio no solo, pois o influxo de O_2 é aumentado em solos vegetados em relação ao solo nu. E, por fim, a respiração radicular representou de 27 a 48% da respiração do solo.

Palavras-chave: Respiração radicular; Captura de O_2; Metabolismo do solo.

CHAPTER II - CO_2 EMISSIONS AND O_2 INFLUX IN SOILS WITH AND WITHOUT VEGETATION: ACCESSING ROOT RESPIRATION FROM SOIL RESPIRATION AND ITS RELATIONSHIP WITH METEOROLOGICAL VARIABLES

Abstract:

An essential factor for understanding root respiration, in addition to carbon dioxide emission, is the influx of oxygen from the soil, so the objective was to monitor the respiratory dynamics of CO_2 emission and O_2 influx under two soil cover conditions (with and with vegetation) and relate it to weather conditions. Monitoring readings occur at 7am, 10am, 12pm, 3pm and 5pm at three different times. Two $1m^2$ plots were adopted under the conditions of bare soil and vegetated soil with grass (*Paspalum Notatum*). To determine the CO_2 emission from the soil, the Li-8100 portable system was used, while the O_2 influx from the soil was obtained by linear interpolation of the oxygen variation in the chamber using a UV Flux 25% intelligent oxygen sensor, model CM-42951. The data were subjected to analysis of variance for repeated measurements over time. The results demonstrated that CO2 emissions were strongly associated with soil moisture in conditions without ($r= 0.76$; $p < 0.05$) and with vegetation ($r= 0.84$; $p < 0.05$). It was observed that the influx of O2 into the vegetated soil is associated with photosynthetically active radiation ($r= 0.78$; $p < 0.05$) and is linked to the activity of photosynthesis and consequently root respiration. It was concluded that the existence of root respiration and its dependence on the influx of oxygen into the soil, as the influx of O_2 is increased in vegetated soils in relation to bare soil. Root respiration represented 27 to 48% of soil respiration.

Key-words: Root respiration; Soil O_2 uptake; Metabolism.

1 INTRODUÇÃO

A respiração do solo tem sido amplamente estudada nas últimas décadas, em carácter especial dado aos estudos que priorizam a dinâmicas dos fluxos no solo (Balogh et al., 2011). Muito desse impulso ao estudo da dinâmica de gases no solo deve-se ao fato do aquecimento global adicional resultado do aumento de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera terrestre, como, dióxido de carbono (Chin et al., 2023). Embora existam diversos estudos que consideram a biomassa microbiana do solo e suas interações com ciclo biogeoquímico do carbono é fortemente estudada (Balogh et al., 2011; Bini et al., 2013; Briedis et al., 2016; Moitinho et al., 2021a; Moitinho et al., 2021b). O efeito da raiz ou da rizosfera na respiração do solo tem sido desprezado na compreensão dessa dinâmica (Hopkins et al., 2013; Neira et al., 2015).

Ainda outro fator necessário para compreensão da dinâmica de respiração, como a entrada de oxigênio no ecossistema solo é ignorado (Luo e Zhuo, 2006). Poucos autores que estudaram o influxo de O_2 no solo reportaram a provável dependência do consumo de oxigênio do solo atribuído a respiração radicular (Neira et al., 2015; Vicentini et al., 2019; De Lucena et al., 2023). A relevância do influxo de O_2 para respiração celular nas raízes é muito conhecida (Andrews et al., 1999; Luo e Zhuo, 2006; Bini et al., 2013; Romagnoli e Andreaote, 2016), no entando, a importância dessa troca gasosa para melhoria das previsões da respiração do solo é pouco abordada (Friedlingstein et al., 2020; Ren et al., 2024).

A respiração das raízes quando ativada está aclopada diretamente a atividade fotossintética e a sua dependêcia por essa energia do fóton como estímulo para atividade fotossintentica que desencadeia maior ativação e, consequentemente maior respiração radicular (Atkin et al., 2000; Dias e Marenco, 2006; Costa e Marenco, 2007). Contudo fatores ambientais, como temperatura, umidade do solo ou relativas a atividade fotossintética, como a foto inibição podem governar a respiração radicular em duas vias, como, potencializador ou diminuidores da respiração celular (Dias e Marenco, 2006; Davidson e Janssens, 2006; Hopkins et al., 2013).

O problema está na escassez de estudos que realizam o monitoramento da atividade respiratória e de seus compartimentos, ainda mais no que diz a respeito a quantificação da contribuição da respiração de raízes na respiração global do solo, apenas valores téoricos foram levantados e com alta variabilidade, como, de 10 a 90%

de respiração radicular (Hanson et al., 2000), cerca de 50% (Luo e Zhuo, 2006), ou cerca de 20 a 50% (Andrews et al., 1999).

A compreensão da dinâmica da troca gasosa entre consumo de O_2 e liberação de CO_2 nos diferentes compartimento respiratórios do solo é de suma importância para nortear os avanços nos sistemas globais de estimativas de CO_2, assim compreender a sensibilidade as condições climáticas e como influenciam na decomposição da matéria orgânica do solo e suas relações com o aquecimento global antrópico (Ren et al., 2024; Khan et al., 2024).

O uso do solo tem sido amplamente estudado como um fator de potencialização das mudanças climáticas e liberação de toneladas de carbono para a atmosfera terrestre sob a forma de CO_2 (Friedlingstein et al., 2020; Lal, 2022), mas as diferentes coberturas do solo também determinam diferentes dinâmicas na respiração global dos solos (De Lucena et al., 2023). Existe um consenso que a respiração do solo é o resultado de outras duas componentes, a respiração microbina e a respiração radicular (Luo e Zhuo, 2006).

Em resumo, é possível que a contribuição da emissão de CO_2 das raízes na respiração do solo seja uma componente essencial das interações entre planta-solo-atmosfera e do ciclo do carbono. Pois há estudos que já propuseram que essa relação desempenha um papel significativo na dinâmica dos ecossistemas, nas emissões de CO_2 do solo e na capacidade de mitigação das mudanças climáticas. Portanto, seu entendimento é fundamental para promover práticas de manejos para a sustentabilidade agrícola e ambiental e assim diminuir os impactos das atividades antrópicas nos balanços de carbono do solo.

A hipótese é a respiração radicular está intimamente relacionada à sua atividade fotossintética. Assim, esta respiração pode ser observada em duas condições distintas: solo nu, onde a influência da rizosfera é minimizada, e solo vegetado, especialmente com grama, caracterizado por um sistema radicular denso na camada superficial. Espera-se que a respiração radicular apresente variabilidade diurna e se estabeleça uma conexão com variáveis meteorológicas.

Diante do que foi apresentado, com o presente estudo objetivou-se buscar por indicadores meteorológicos associados ao monitoramento da emissão de CO_2 e do influxo de O_2 em solos com e sem vegetação e com potencial para estimar a respiração do solo e das raízes.

2 MATERIAL E METÓDOS

2.1 Localização e caracterização da área experimental

O experimento foi realizado na estação agroclimatológica da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV), campus da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP), localizada no município de Jaboticabal, oeste do estado de São Paulo, Brasil (Figura 1). A estação está localizada sob as coordenadas geográficas 21°14' 05'' S e 48°17'09'' W, com altitude de 615 metros.

O clima regional foi classificado como B1rB′4a', mesotérmico úmido, com pequena deficiência hídrica (Thornthwaite, 1948). O solo da área foi classificado por Centurion e Andrioli (2000) como Latossolo Vermelho eutrófico típico. Os atributos fisico-químicos do solo para a camada superficial (0,00 a 0,20 m) foram apresentados por De Lucena et al., (2023).

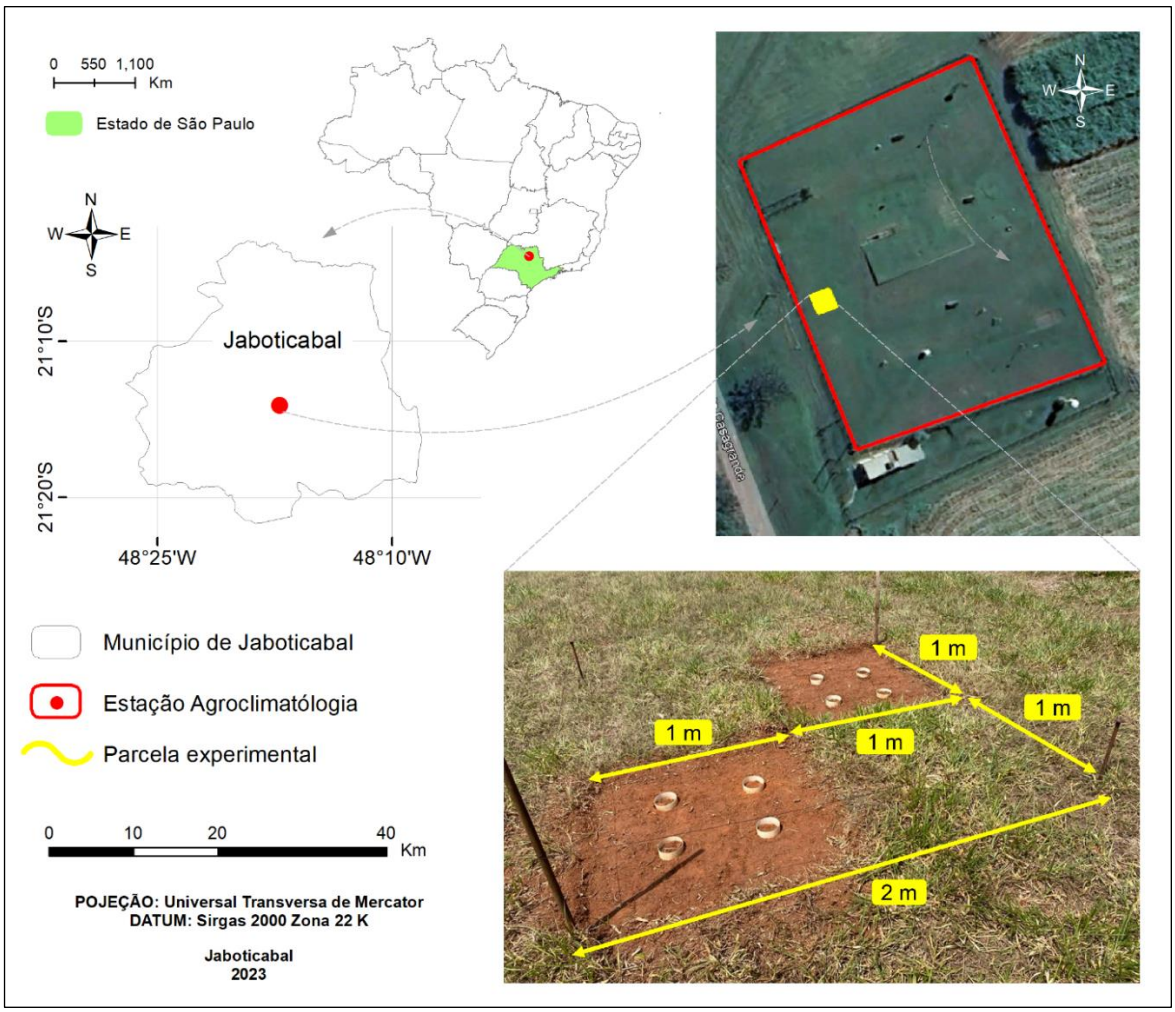


Figura 1. Localização da área experimental e design experimental.

2.2 Design experimental

O experimento foi alocado em uma área de 4,0 m^2 e foi dividido em quatro parcelas de 1,0 m^2, sendo duas parcelas de solo nu e outras duas parcelas de solo vegetado com grama batatais (*Paspalum notatum*) em cada uma das parcelas foram alocados quatro colares de PVC medindo 0,05 m de altura e diâmetro de 0,10 m. O tratamento denominado de solo nu estava vegetado e foi retirado a vegetação para instalação do experimento e assim foram instalados colares de PVC no solo 72h antes do primeiro momento de leitura (Figura 1). Durante o período de avaliação realizou-se o controle manual nas parcelas denominadas de solo nu mantendo assim o estado inicial do tratamento.

As leituras foram registradas em três diferentes momentos com condições climáticas contrastantes e frequentemente ocorrentes durante o ano. O primeiro momento a leitura ocorreu após uma chuva de 19,9 mm (02/10/2023) equivalente ao dia do ano de número 275. O segundo momento após um período de estiagem, as leituras ocorreram em 24/10/2023, equivale ao dia do ano de número 297. O terceiro momento dia 09/11/2023 equivalente ao dia do ano de número 313, sendo avaliados a emissão de CO_2 do solo, o influxo de O_2 do solo, umidade do solo e temperatura do solo para o solo nu (SN) e o solo vegetado (VG) nos seguintes horários: 07 h, 10 h, 12 h, 15 h e 17 h.

Os dados meteorológicos, a exemplo da, temperatura do ar (Temp), umidade relativa (UR), pressão atmosférica (Patm) e radiação fotossinteticamente ativa (RFA) também foram monitorados no momento das leituras e foram extraídos de um conjunto de dados pertencentes ao acervo do Departamento de Engenharia e Ciências Exatas. As observações realizadas na Estação Agroclimatológica do Campus de Jaboticabal foram coletadas, digitadas em formato padronizado, realizada a consistência e controle de qualidade. A variabilidade dessas variáveis metereológicas para cada momento em cada um dos horários foram apresentadas nas Figuras 2, 3 e 4, respectivamente.

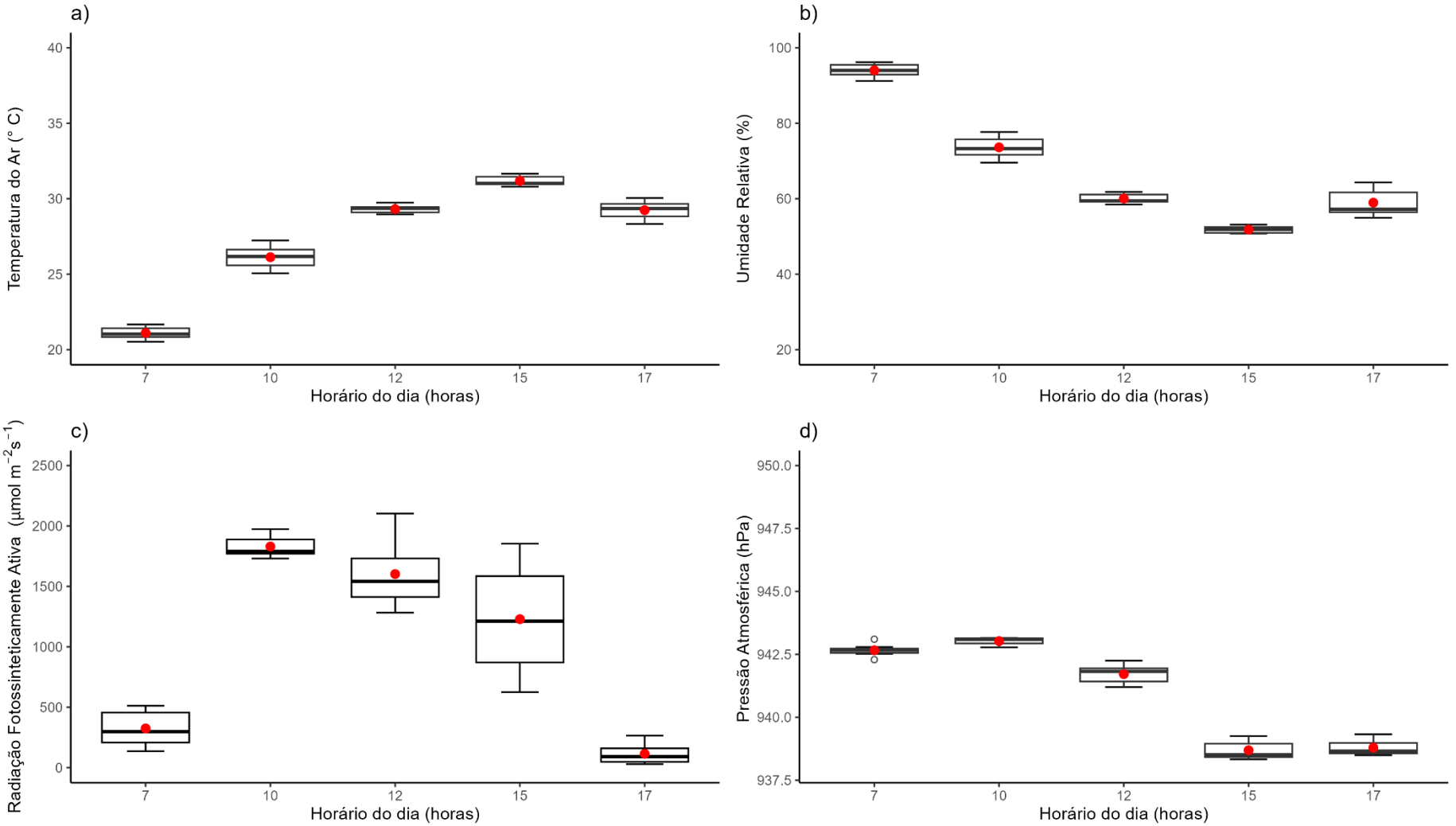


Figura 2. Box-plot dos dados meteorológicos para o dia 02/10/2023 (275). Em: a) temperatura do ar (º C), b) umidade relativa (%), c) radiação fotossinteticamente ativa (µmol m^{-2} s^{-1}), d) pressão atmosférica (hPa). O ponto vermelho indica a média. Elaborado pelo Autor.

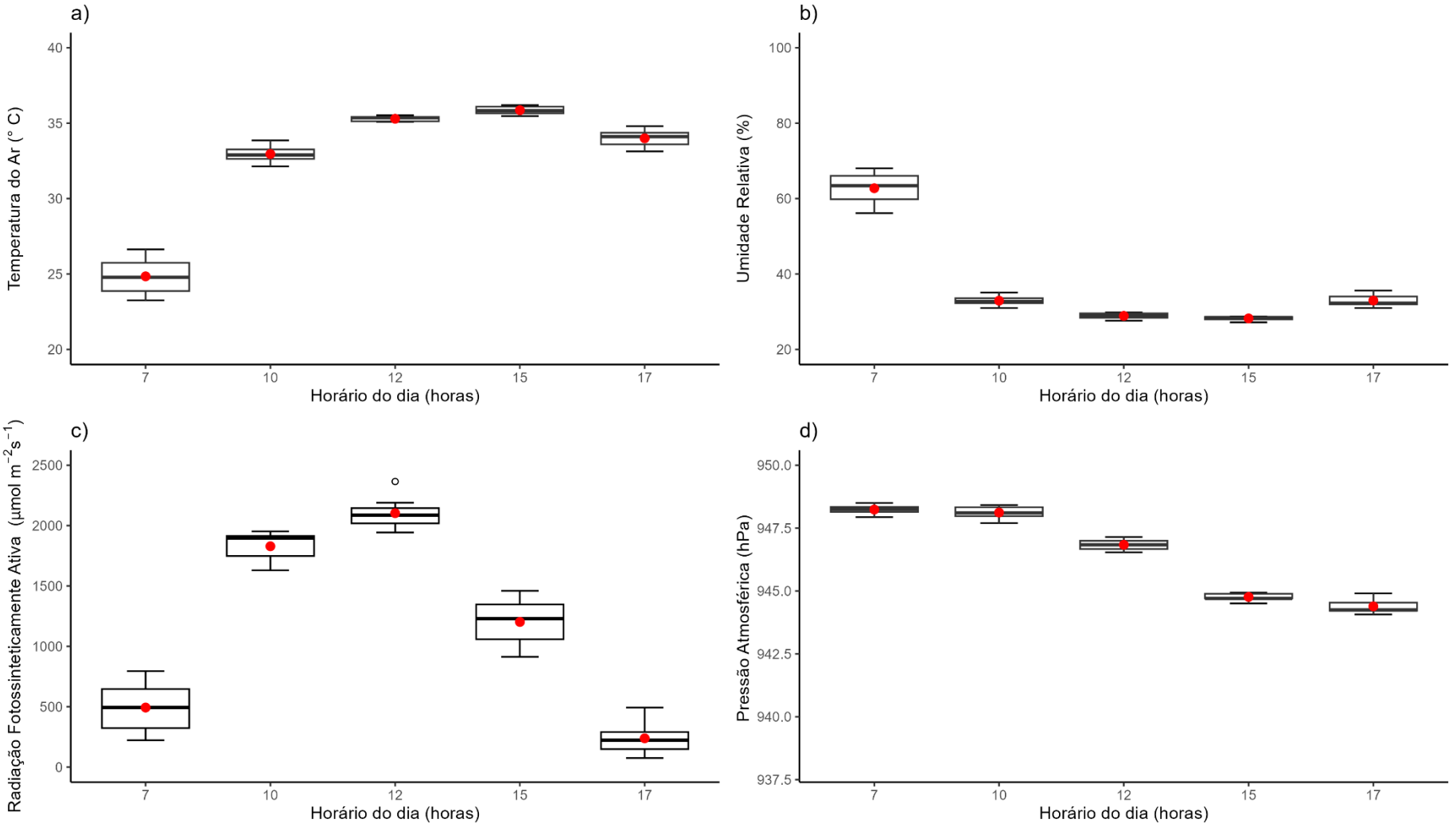


Figura 3. Box-plot dos dados meteorológicos para o dia 24/10/2023 (297). Em: a) temperatura do ar (º C), b) umidade relativa (%), c radiação fotossinteticamente ativa (µmol m^{-2} s^{-1}), d) pressão atmosférica (hPa). O ponto vermelho indica a média. Elaborado pelo Autor.

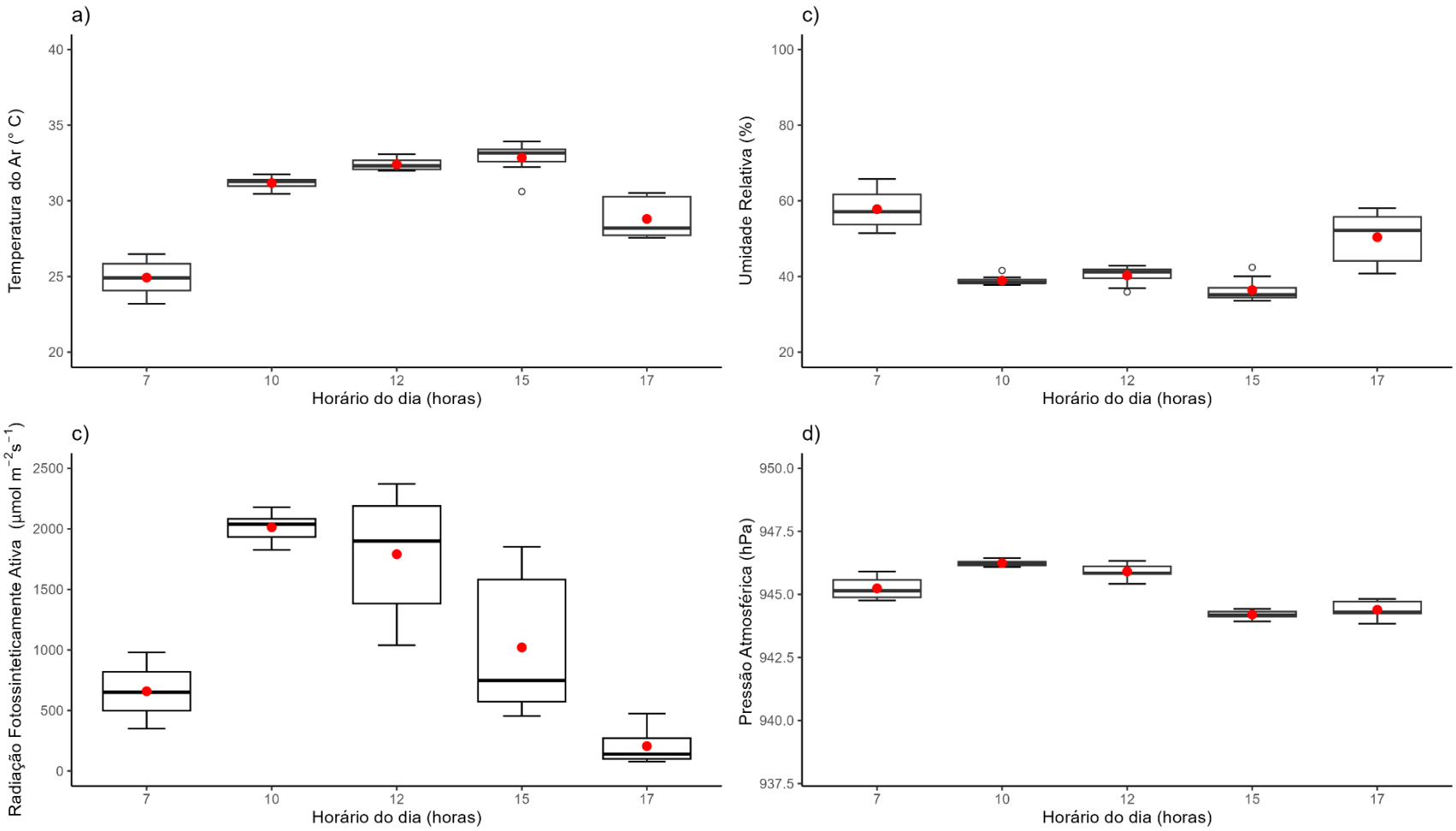


Figura 4. Box-plot dos dados meteorológicos para o dia 09/11/2023 (313). Em: a) temperatura do ar (º C), b) umidade relativa (%), c) radiação fotossinteticamente ativa (µmol m^{-2} s^{-1}), d) pressão atmosférica (hPa). O ponto vermelho indica a média. Elaborado pelo autor.

2.3 Emissão de CO_2, temperatura e umidade do solo

As leituras da emissão de CO_2 do solo (FCO2) foram registradas por meio de um sistema portátil LI-8100 denominado de Sistema Automatizado de Fluxo de CO_2 do Solo (Figura 5a) de fabricação da LI-COR Biosciences®, Nebraska, EUA. O sistema LI-8100 foi acoplado a uma câmara modelo 8100-102 que fornece medições sobre a emissão de CO_2 do solo.

Essa câmara apresenta volume interno de 854,2 cm^3 com área de contato circular de 83,7 cm^2. Esse sistema permitiu verificar as mudanças nas concentrações de CO_2, usando o sensor IRGA (*Infrared Gas Analyzer*), por meio da espectroscopia de absorção óptica na região espectral do infravermelho próximo (*Near Infrared* - NIR).

A câmara foi colocada sobre colares de PVC previamente foram inseridos no solo (72 horas antes) em cada ponto amostral a uma profundidade de 0,03 m. Para determinação da emissão de CO_2 do solo o padrão de leitura adotado foi de 90 segundos de leitura com intervalos de leitura de um segundo. O resultado da variação do dióxido de carbono em relação ao tempo no interior da câmera foi obtido em µmol m^{-2} s^{-1}.

A umidade do solo foi determinada por meio de um equipamento de TDR (Time Domain Reflectometry) (Figura 5c), um sensor portátil de umidade do solo modelo HidroSense II (HS2) fabricado por Campbell Scientific® que avaliou a umidade disponível do solo em porcentagem (volume / volume) com uso de uma dupla haste de 0,12 m.

A temperatura do solo foi obtida por meio de termômetro de haste (Figura 5d) inserido no interior do solo a uma profundidade de 0,10 m ao lado dos colares de PVC previamente instalados. A temperatura do solo foi obtida e apresentada em graus Celsius.

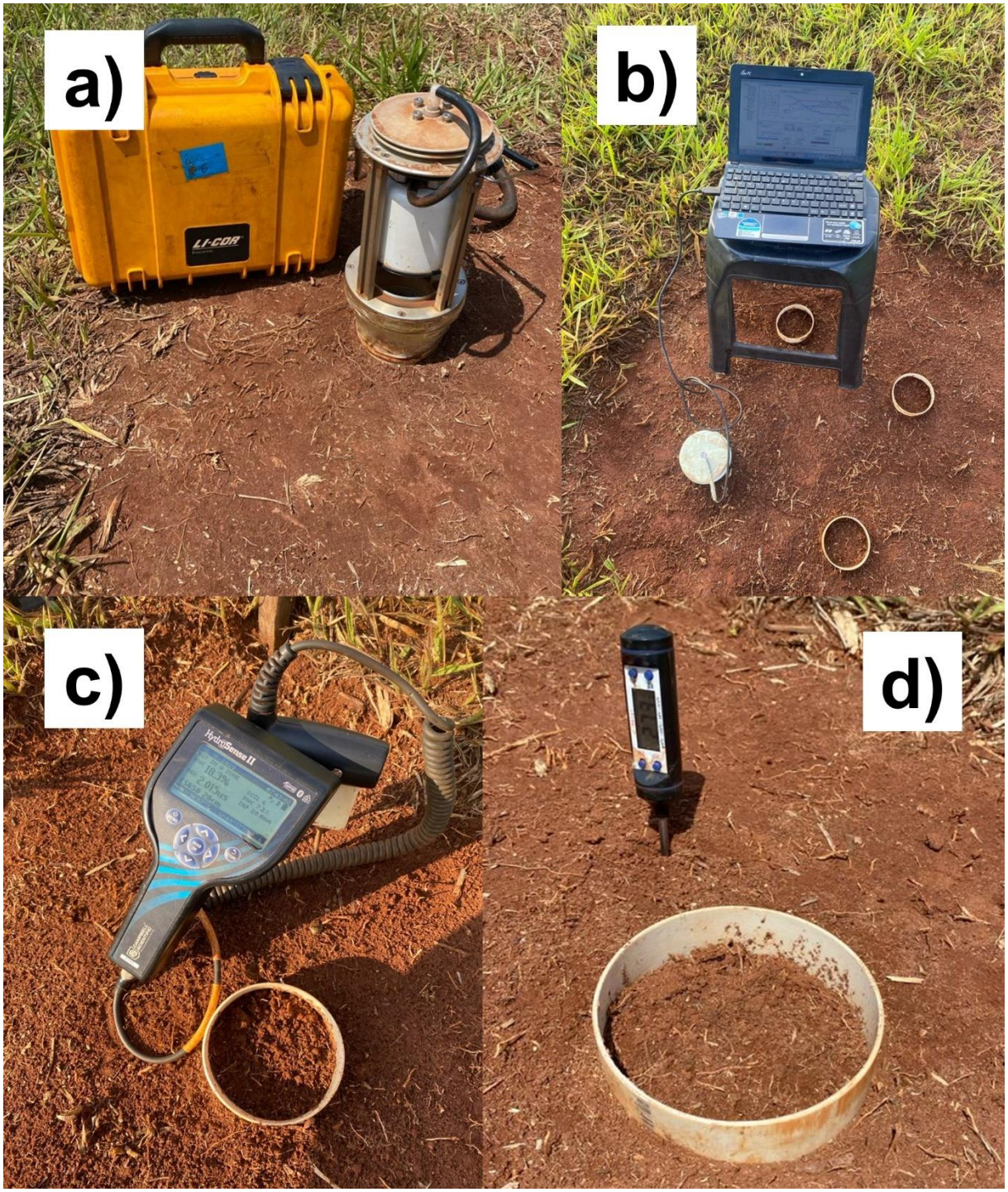


Figura 5. Equipamentos utilizados nas leituras. Em a) Sistema portátil de análise da emissão de CO_2 do solo modelo LI-8100, b) Sensor inteligente de oxigênio CM-42951 com câmera de PVC acoplado ao laptop, c) Sensor portátil de umidade do solo modelo HS2, d) Termômetro de haste.

2.4 Influxo de O_2 do solo

A determinação do influxo de O_2 do solo (iO2) foi realizada a partir de uma câmera de PVC acomplada a um Sensor Inteligente de Oxigênio UV Flux 25% modelo CM-42951 fabricado por CO2 METER®. Esse sistema é formado por um sensor portátil que mede a variação do oxigênio no interior da câmera usando o princípio da fluorescência com a luz ultravioleta (UV). Esse sistema fornece baixo desvio e sensibilidade cruzada. Assim, a câmera com o sensor foi acoplado a um computador portátil (laptop) via porta USB (*Universal Serial Bus*) e conectado por meio do software GasLab® para registro dos dados em tempo real (Figura 5b).

O influxo de O_2 do solo (Equação 1) foi calculado por interpolação linear dos valores de concentração do oxigênio no interior da câmera durante 300 segundos (5 minutos) de amostragem e considerando a pressão atmosférica, a temperatura absoluta do ar em Kelvin e o volume da câmera. Obtendo-se o decaimento de O_2 no interior da câmera durante o período amostrado (Figura 5b). O influxo de O_2 do solo obtido via equação 1 e foi apresentado em mg O_2 m^{-2} s^{-1}.

$$iO_2 = \frac{dO_2\ PM}{dt\ RT}\ H \qquad \text{Equação 1}$$

onde, dO_2/dt é a quantidade de O_2 (ppm) medida em função do tempo t (s); P é a pressão atmosférica (Pa); M é a massa molar do O_2 (g m^{-3}); R é a constante universal dos gases (8,314462 J mol^{-1} K^{-1}); T é a temperatura absoluta (K) e H = V/A, para volume (V) = 6,6 x 10^{-6} m^3 e área do colar (A) = 0,008 m^2 acima do solo. (Jassal et al., 2012; Giacomo et al., 2014; Almeida et al., 2018; Vicentini et al., 2019; De Lucena et al., 2023).

2.5 Análise dos dados

2.7.1 Análise da variabilidade temporal

Inicialmente, os pressuspostos básicos foram verificados e atendidos, assim, os resíduos das variáveis estão normalmente distribuídos e foram testados apoiando-se no teste de normalidade de Shapiro-Wilk ($p > 0,05$) (Shapiro e Wilk, 1965) e a hipótese da homocesdáscidade (igualdade entre as variâncias), também foi testada com base no teste de Bartlett ($p > 0,05$) (Bartlett, 1937).

Sendo atendidos os requisidos os dados da emissão de CO_2 do solo (FCO2), influxo de oxigênio do solo (iO2), temperatura do solo (Tsolo) e umidade do solo (Usolo) foram submetidos a análise da variabilidade temporal diurna que foi avaliada usando o método de análise de variância para experimentos com medidas repetidas no tempo, isso significa que os diferentes tratamentos (solo nu e vegetado) foram avaliados em função do tempo (em horas) conforme proposto por Littell et al. (1998), assim, foram calculadas as médias para cada horário de avaliação. Para as comparações múltiplas entre médias usou-se o teste LSD (do inglês, *Least Significant Difference*) proposto por Fisher (1935).

2.7.2 Relação dinâmica de gases com o ambiente

A relação entre a dinâmica dos fluxos de gases no solo com as condições do ambiente foi analisada com base em duas análises. Inicialmente foi realizado a análise de correlação linear entre os fluxos de gases no solo (emissão de dióxido de carbono, influxo de oxigênio) com as variáveis meteorológicas coletadas na estação agroclimatológica (temperatura do ar, umidade relativa, pressão atmosférica, radiação fotossinteticamente ativa), além da temperatura e umidade do solo e foram performadas usando o método de correlação linear de Pearson e foi adotado o nível de significância de 5% de probabilidade (Wei e Simko, 2021).

Na sequência foi aplicada análise da partição hierárquica (APH) (Chevan e Sutherland, 1991) que particiona as contribuições independentes e conjuntas de cada preditor em um conjunto de dados multivariados para um modelo linear por decomposição hierárquica. Enquanto, o teste de randomização (a 5% de probabilidade) permite a avaliação dos scores de maior importância para cada avaliação na explicação da variável de resposta (Nally e Wash, 2004).

2.7.3 Regressão Linear Simples com Validação Cruzada K-Fold de Repetição

A análise de regressão é uma maneira de prever o resultado da variável de estudo a partir de uma outra váriavel preditora. Para a realização dessa análise foi considerado os resultados da análise de partição hierárquica (citada anteriormente). O modelo de regressão linear simples (RLS) é dado pela equação 2 (Zuur et al., 2009).

$$y = \beta_1 * X_0 + \beta_0 + \varepsilon \qquad \text{Equação 2}$$

em que, y é a variável dependente da equação de regressão linear; β_1 é a inclinação da reta de regressão linear; X_0 é a variável indepedente do modelo de regressão

linear; β_0 é o intercepto em y da equação de regressão linear; ε é o erro da regressão linear.

Para a obtenção dos coefiecientes de regressão foi utlizado o método de validação cruzada K-fold com repetição, sendo essa uma técnica que permite a devisão dos dados em treinamento e teste em K vezes e então é aplicado uma reamostragem dos dados, denominada de repetição. Assim, foi adotado o número de fold igual a três (isto é, dividiu-se o banco de dados em três partes iguais) com cem repetições (foi reamostrado 100 vezes com a semente fixa), o parâmetro de divisão de dados adotados foi dois terços treinamento e um terço teste em cada reamostragem. O modelo final de regessão foi obtido juntamente com o R^2 ajustado (medida de acurácia) médio de todos os modelos validados, além do média do erro quadrático médio – RMSE (do inglês, *Root Mean Square Error*) como medida de erro. A utilização dessa abordagem foi justificada por ser um método mais robusto no controle dos erros de tendência e viés (Stone, 1978).

Todas as análises estatísticas foram performadas em linguagem R (R Core Team, 2023). Com o auxílio dos pacotes: *ExpDes.pt* (Ferreira et al., 2021); *factoextra* (Kassambara e Mundt, 2020); *readxl* (Wickham e Bryan, 2022); *tidyverse* (Wickham et al., 2019); *rstatix* (Kassambara, 2021); *patchwork* (Pedersen, 2020); *nortest* (Gross e Ligges, 2015); *lawstat* (Gastwirth et al., 2020); *pacman* (Rinker e Kurkiewicz, 2017); *caret* (Kuhn, 2008) e *ggplot2* (Wickham, 2016).

3. RESULTADOS

3.1 Variabilidade temporal diurna e contribuição da respiração de raiz

Para o primeiro momento (dia 275), nos diferentes horários avaliados a emissão de CO_2 do solo foi maior no solo vegetado (Figura 6a). Embora, o solo nu tenha registrados os menores valores de emissão de CO_2 do solo quando comparado ao solo vegetado, a emissão das 10h, 12h e 15h não diferiram entre si (7,56; 7,67 e 7,16 µmol m^{-2} s^{-1}, respectivamente), porém são superiores às emissões nos horários das 07h e 17h, essas não diferiram entre si (5,01 e 5,26 µmol m^{-2} s^{-1}, respectivamente).

No segundo momento (dia 297), a emissão de CO_2 manteve o padrão observado no primeiro momento e registrou diferenças significativas entre solo vegetado e solo nu em todos os horários avaliados (Figura 6b). Entre 07h e 17h o solo vegetado registrou os seguintes valores médios: 3,56; 4,70; 4,99; 4,29 e 3,99 µmol m^{-2} s^{-1}, respectivamente. No entanto, os maiores valores ocorreram às 10h e 12h e diferiram dos demais horários. Enquanto o solo nu registrou os seguintes valores: 2,46; 2,89; 3,33; 3,25 e 3,04 µmol m^{-2} s^{-1}, respectivamente para o mesmo intervalo de tempo. Embora o solo nu obteve seu pico de emissão às 12h, os valores de 10h a 17h não diferiram entre si, mas apresentam diferenças significativas para a emissão às 07h no solo nu.

E finalmente, no terceiro momento (dia 313), a emissão de CO_2 do solo seguiu o mesmo padrão conforme foi observado nos momentos anteriores (dias 275 e 297), isto é, manteve-se mais elevado e significativo no solo vegetado (6,36; 8,34; 8,35; 7,90 e 7,93 µmol m^{-2} s^{-1} respectivamente), em relação ao solo nu (3,24; 4,18; 4,36; 4,00 e 4,22 µmol m^{-2} s^{-1} respectivamente) em todos os horários investigados (Figura 6c). Vale destacar que nos tratamentos a emissão de CO_2 do solo subiu a partir das 10h em relação aos valores observados às 07h (Figura 8a).

Em relação ao influxo de O_2 do solo variou entre os tratamentos nos tempos avaliados (Figura 6d). Embora tenha diferenças no influxo de O_2 no solo vegetado e no solo nu, os maiores valores em ambos os casos ocorreram entre 10h e 15h, mas não existem diferenças significativas no influxo de O_2 do solo entre os tratamentos nos horários das 07h e 17h. O solo vegetado entre 10h e 15h registrou os seguintes valares para o influxo de O_2 do solo: 1,34; 1,20 e 1,28 mg O_2 m^{-2} s^{-1}, respectivamente. Porém, esses valores diferiram do solo nu que registrou 0,86; 0,46 e 0,70 mg O_2 m^{-2} s^{-1}, respectivamente entre 10h e 15h.

No segundo momento (dia 297), para o influxo de O_2 do solo não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos nos seguintes horários: 07h, 10h e 17h (Figura 6e). Por outro lado, às 12h e 15h o influxo de O_2 foi maior no solo vegetado (1,58 e 1,19 mg O_2 m^{-2} s^{-1}) em comparação ao solo nu (0.73 e 0.59 mg O_2 m^{-2} s^{-1}) respectivamente para o mesmo horário. Seguindo o mesmo padrão do primeiro momento, no segundo também foi observado que os menores valores do influxo de O_2 do solo para ambos os tratamentos ocorreram às 07h e 17h.

No terceiro momento (dia 313), o influxo de O_2 do solo vegetado (1,75 e 1,02 mg O_2 m^{-2} s^{-1}) foi superior e significativo ao solo nu (0,93 e 0,54 mg O_2 m^{-2} s^{-1}) às 12h e 15h (Figura 6f). Enquanto, às 07h, 10h e 17h não diferiram entre os tratamentos, esse comportamento também foi observado no segundo momento (dia 297). Entre relação às 07h e 17h os maiores valores de influxo de O_2 do solo ocorreu entre 10h e 15h para os tratamentos investigados (Figura 6f).

A umidade do solo variou ao longo do tempo (dia 275) (Figura 7a). A umidade do solo às 07h não diferiu entre os tratamentos (15,8 e 15,3% SN e VG, respectivamente), esse comportamento também foi observado as 17h (11,3 e 11,7% SN e VG, respectivamente). Observou-se que em ambos os tratamentos a umidade do solo decresceu quando observado os valores no início e no final das avaliações ($p < 0,05$). A umidade no solo nu foi superior ao solo vegetado entre 10h e 15h ($p < 0,05$). Os valores de umidade no solo nu entre 10h e 15h foram: 15,1; 14,0 e 13,0% e diferiram do solo vegetado, e foram; 13,6; 12,7 e 12,1%, respectivamente.

A umidade do solo no segundo momento (dia 297) apresentou um comportamento diferente do primeiro, ao invés de decair ao longo do dia manteve uma faixa estável com pequenas oscilações. Não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos nos horários das 10h, 15h e 17h, entretanto diferiram às 07h e às 12h, sendo que pela manhã (07h) o solo nu registrou maior conteúdo de umidade do solo (3,4%), porém isso se inverteu às 12h com solo vegetado (3,9%) sendo superior ao solo nu (2,8%) (Figura 7b).

A umidade do solo para o terceiro momento (dia 313) variou entre os tratamentos investigados (Figura 7c), sendo superior no solo nu (11,5; 10,4; 9,5; 9,8 e 8,7 %) quando comparada ao solo vegetado (9,2; 8,0; 7,7; 6,8 e 6,4 %). Contudo a umidade do solo descreu ao longo do dia (Figura 7c), assim às 17h a umidade do solo

foi menor em relação às 07h em ambos nos tratamentos, essa diminuição representou 24,4% para o solo nu e 30,4% para o solo vegetado (Figura 7c).

A temperatura do solo variou ao longo do dia (Figura 7d), porém não registrou diferenças significativas às 10h entre os tratamentos investigados. Às 07h a temperatura do solo vegetado (26,0 ºC) foi superior em relação ao solo nu (24,9 ºC). No entanto, das 12h às 17h a temperatura do solo nu foi maior e significativa (31,2; 32,7 e 32,3 ºC, respectivamente) diferindo-se da temperatura do solo vegetado (27,7; 29,1 e 30,1 ºC, respectivamente). Todos as comparações entre as médias nos diferentes tratamentos investigados foram apoiadas no teste LSD de Fisher a 5% de probabilidade.

A temperatura do solo diferiu entre os tratamentos para todos os horários investigados. Assim, a temperatura do solo nu (27,7; 34,5; 39,9; 41,9 e 38,8 ºC, respectivamente) foi superior e significativa quando comparada ao solo vegetado (27,1; 29,2; 31,1; 32,2 e 31,4 ºC). Quando analisado o pico de temperatura do solo que ocorreu às 15h em ambos os tratamentos, a diferença entre o solo nu e o solo vegetado chegou aos 9,7 ºC. As diferenças significativas foram interpretadas para o teste LSD ($p < 0,05$).

Mesmo o solo nu apresentando maior conteúdo de umidade do solo (Figura 7c) neste terceiro momento (dia 313), a temperatura do solo diferiu em todos os horários avaliados (Figura 7f), sendo superior e significativa no solo nu (26,9; 31,9; 35,7; 37,8 e 35,5 ºC) quando comparada ao solo vegetado (26,3; 28,2; 29,1; 30,1 e 29,2 ºC) respectivamente (Figura 7f). De semelhante modo ao segundo momento (dia 297) o pico de temperatura do solo ocorreu às 15h. A diferença na temperatura do solo entre os tratamentos durante o pico foi de 7,7 ºC. As comparações entre médias para o terceiro momento também foi apoiada no teste LSD a 5% de probabilidade.

Embora os valores médios por momento não foram apresentados durante essa abordagem analítica da variabilidade temporal diurna, tais valores podem ser consultados no Apêndice B.

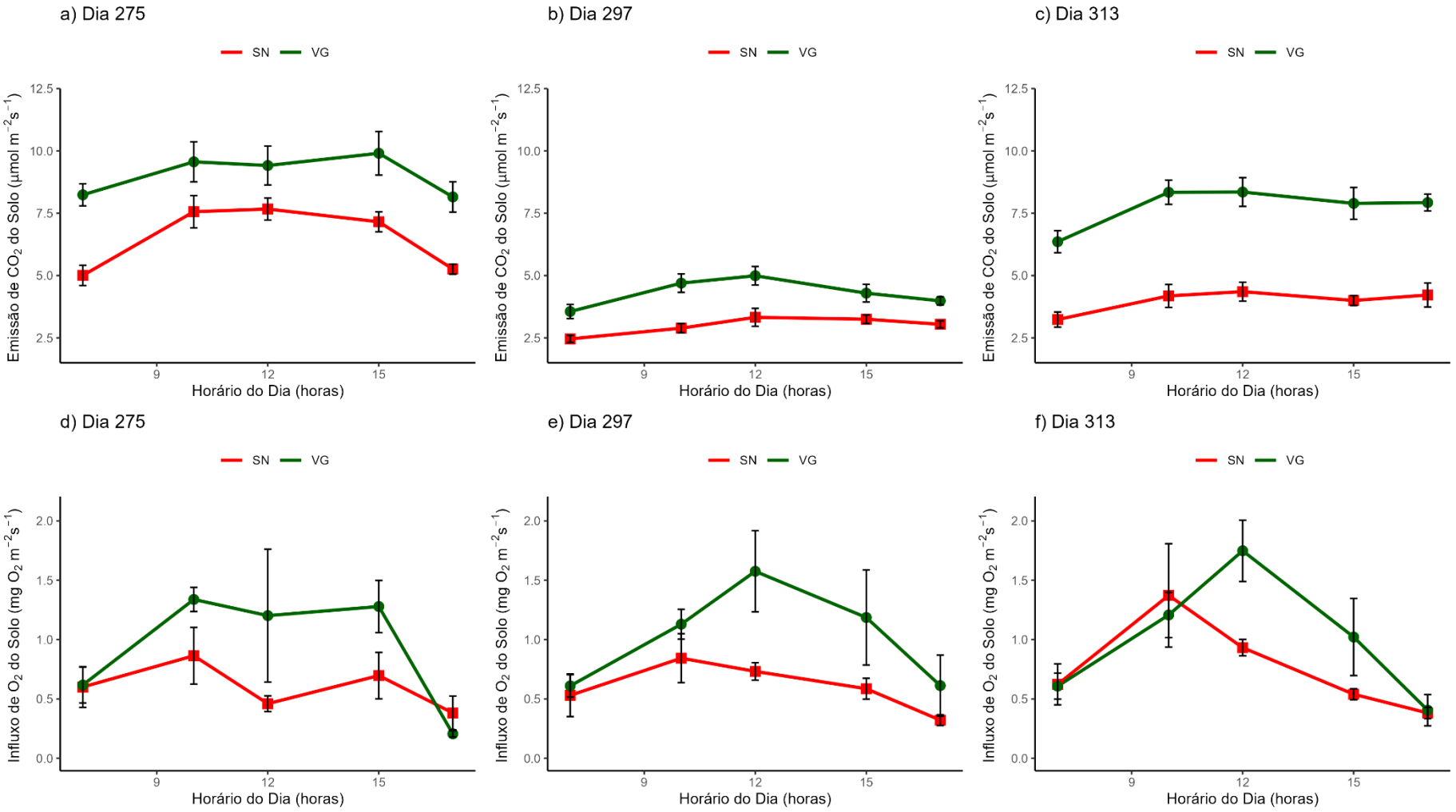


Figura 6. Análise da variabilidade temporal para emissão de CO_2 (a, b, c) e o influxo de O_2 do solo (d, e, f). Foram apresentadas as médias por horários seguidas das barras de erro-padrão da média. Em que, SN é o solo nu e VG é o solo vegetado.

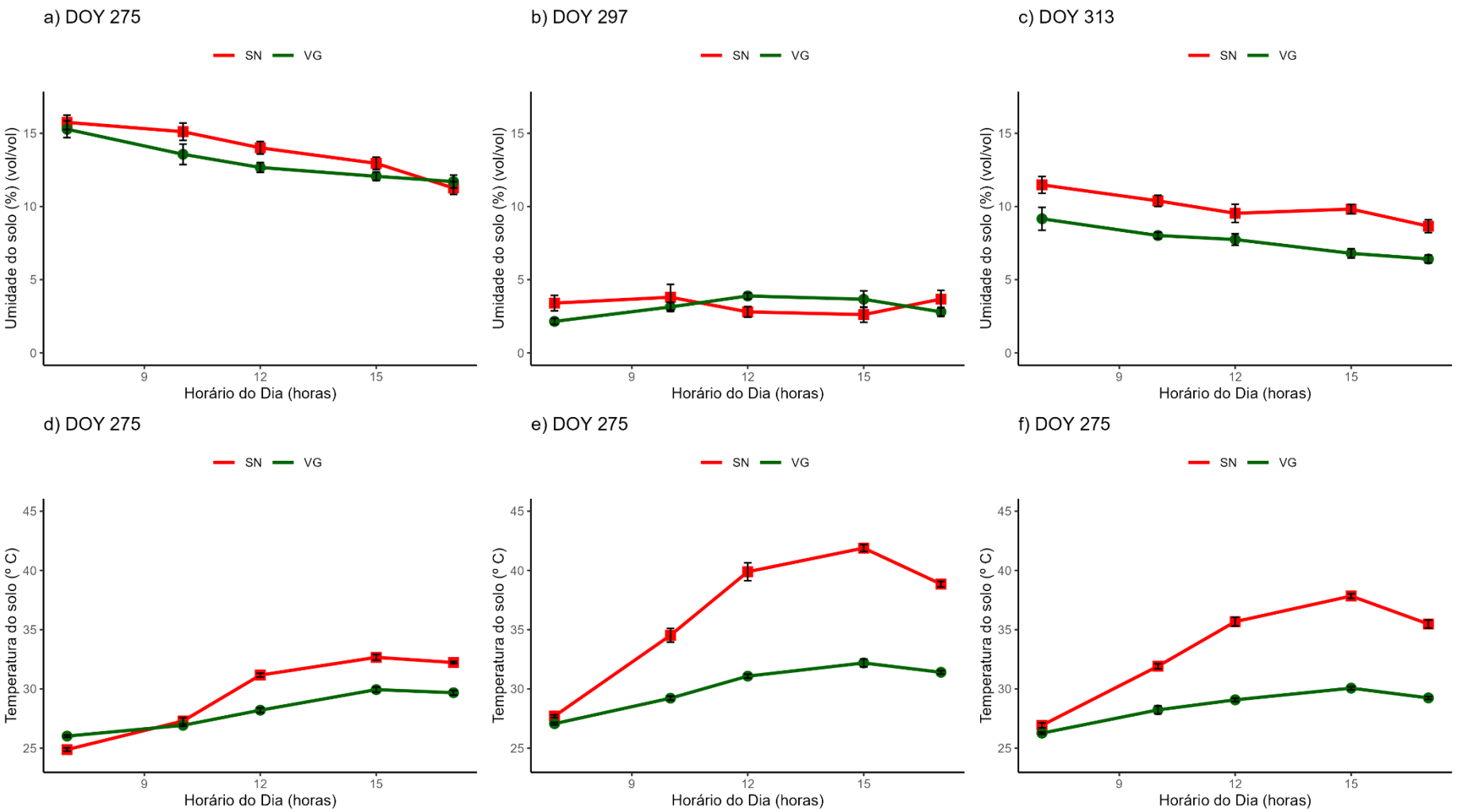


Figura 7. Análise da variabilidade temporal para umidade (a, b, c) e temperatura do solo (d, e, f). Foram apresentadas as médias por horários seguidas das barras de erro-padrão da média. Em que, SN é o solo nu e VG é o solo vegetado.

3.2 Relação entre a dinâmica de gases no solo e as condições ambientais

Esse estudo apontou algumas correlações lineares de fraca-moderada a forte significativas (Figura 8, Figura 9). As inferências sobre a interpretação dos coeficientes de correlação linear (r) adotados nessa descrição dos resultados foi adaptado de Pimentel Gomes (1990)[1]. O tratamento denominado de solo nu registrou uma correlação linear forte entre a emissão de CO_2 com a umidade do solo ($r = 0,76$; $p < 0,05$) (Figura 8a). Enquanto, o tratamento solo vegetado observou-se também uma correlação linear positiva e forte ($r = 0,80$; $p < 0,05$) (Figura 8d).

Por outro lado, correlações lineares e negativas foram observadas entre a emissão de CO_2 do solo com a pressão atmosférica nos tratamentos investigados. Para o solo nu, existe uma correlação forte entre a emissão de CO_2 do solo e a pressão atmosférica ($r = -0,72$; $p <0,05$) (Figura 8b). No solo vegetado, foi observada uma correlação moderada entre a emissão de CO_2 e a pressão atmosférica ($r = -0,60$; $p < 0,05$) (Figura 8e). Entretanto, a umidade relativa do ar apresentou correlações fraca-moderada para ambos tratamentos, sendo solo nu ($r = 0,48$; $p < 0,05$) (Figura 9c) e solo vegetado ($r = 0,40$; $p < 0,05$) (Figura 8f).

Apesar dos resultados obtidos para emissão de CO_2, para o influxo de O_2 do solo o cenário mostrou-se diferente, apenas uma variável foi significativa nos testes, a saber, a radiação fotossinteticamente ativa para ambos tratamentos. Enquanto, a relação da temperatura do ar (Figura 9c) com influxo de oxigênio do solo foi significativa apenas na condição de solo vegetado, porém é uma relação fraca-moderada ($r = 0,38$; $p < 0,05$). Foi observada uma correlação linear positiva moderada entre a radiação fotossinteticamente ativa e o influxo de O_2 em solo nu ($r = 0,63$; $p < 0,05$) (Figura 9a). Contudo, no solo vegetado, foi registrado uma correlação forte e positiva entre o influxo de oxigênio e a radiação fotossinteticamente ativa ($r = 0,78$; $p < 0,05$).

Quando cruzado os dados de correlação (Figuras 8 e 9) com a análise do particionamento hierárquico (Figura 10), tem-se que a radiação fotossinteticamente ativa demostrou explicar 41,24% da variância que ocorre no influxo de O_2 no solo nu (Figura 10a). Enquanto, no solo vegetado, a explicação da variância desse fenômeno chega a 51,89% (Figura 10b). No entanto, a análise detectou um percentual baixo,

[1] Disponível para consulta, se necessário, apêndice C.

porém significativo da temperatura do ar na explicação do influxo de O_2 no solo vegetado, cerca de 11,8% (Figura 10b).

Para a emissão de CO_2 no solo nu, o particionamento hierárquico indicou significativo as mesmas variáveis já reportadas na correlação (Figura 8), no entanto, na seguinte ordem de importância, pressão atmosférica (30,64%), umidade do solo (29,08%) e umidade relativa do ar (15,0%) (Figura 10c). Apesar do ranking, de acordo com a análise de correlação a umidade do solo e a umidade relativa impulsionam a emissão de CO_2 no solo nu, enquanto, a pressão atmosférica atua de forma inversa (Figura 8).

Entretanto, a emissão de CO_2 no solo vegetado, o particionamento hierárquico registrou significativo apenas a umidade do solo (45,68%) seguido da pressão atmosférica (23,13%) (Figura 10d). Enquanto, a umidade do solo impulsiona a emissão de CO_2 do solo, a pressão atmosférica atua de forma inversa, de semelhante modo ao observado no solo nu, porém com percentual inferior de explicação da variância no caso do solo vegetado.

Embora, o particionamento hierárquico, indicou divergências numéricas levemente sútil entre pressão atmosférica (30,64%) e umidade do solo (29,08%) na condição do solo nu, foi considerado como critério de importância do preditor a umidade do solo, pois possui maior valor numérico em módulo na análise de correlação linear ($r = 0,76$) quando comparada com a pressão atmosférica ($r = -0,72$) (Figura 8a). Assim, essa discussão auxiliou na escolha dos melhores preditores que foram usados na secção seguinte. Para emissão de CO_2 do solo pode-se usar a umidade do solo devido as associações aqui reportadas, quanto, ao influxo de oxigênio no solo a variável ambiental selecionada foi a radiação fotossinteticamente ativa conforme as análises apresentadas.

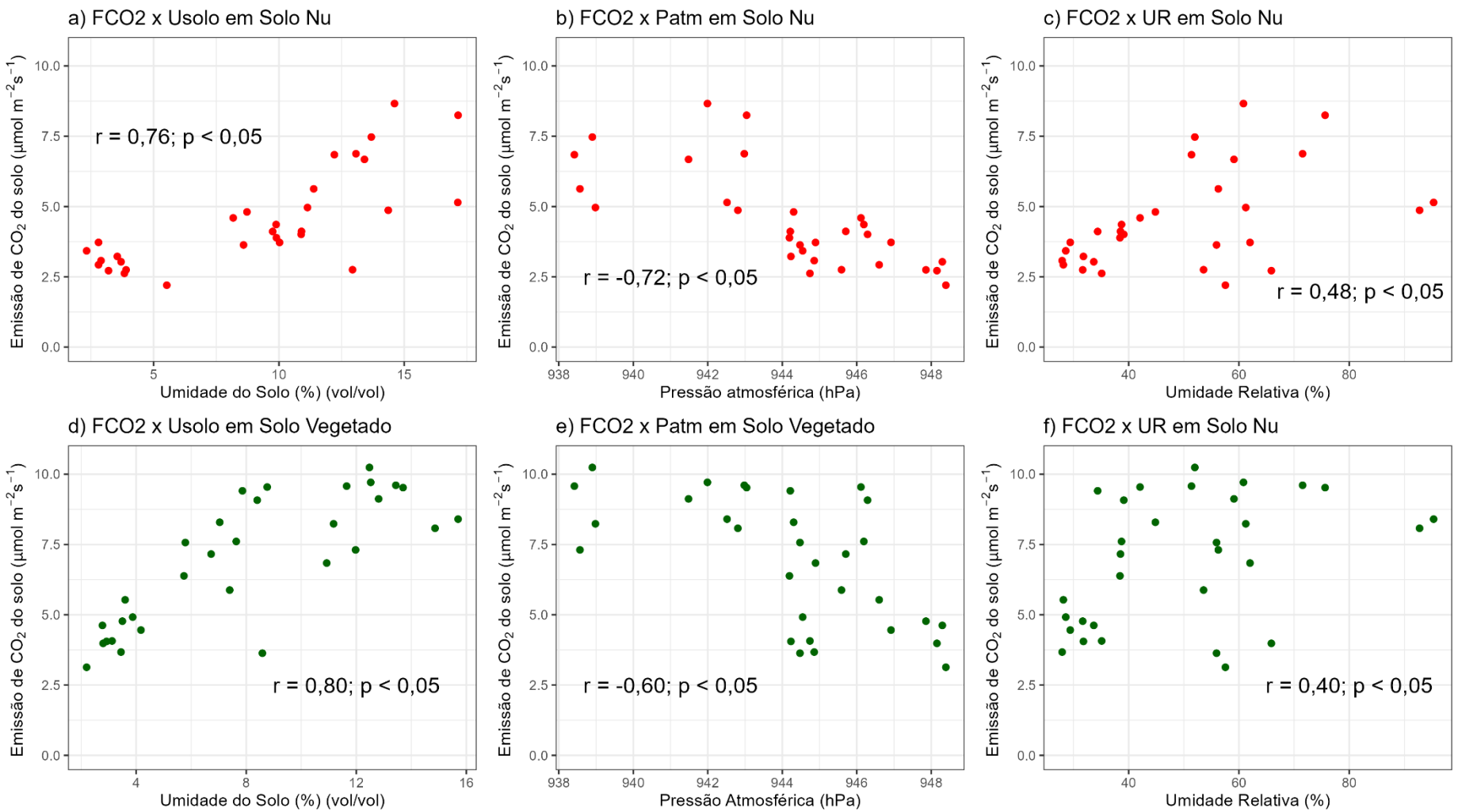


Figura 8. Relações linear entre a emissão de CO_2 com a umidade do solo (a, d). Relação linear a emissão de CO_2 e pressão atmosférica (b, e). Relação linear entre o a emissão de CO_2 do solo com a umidade relativa do ar (c, f).

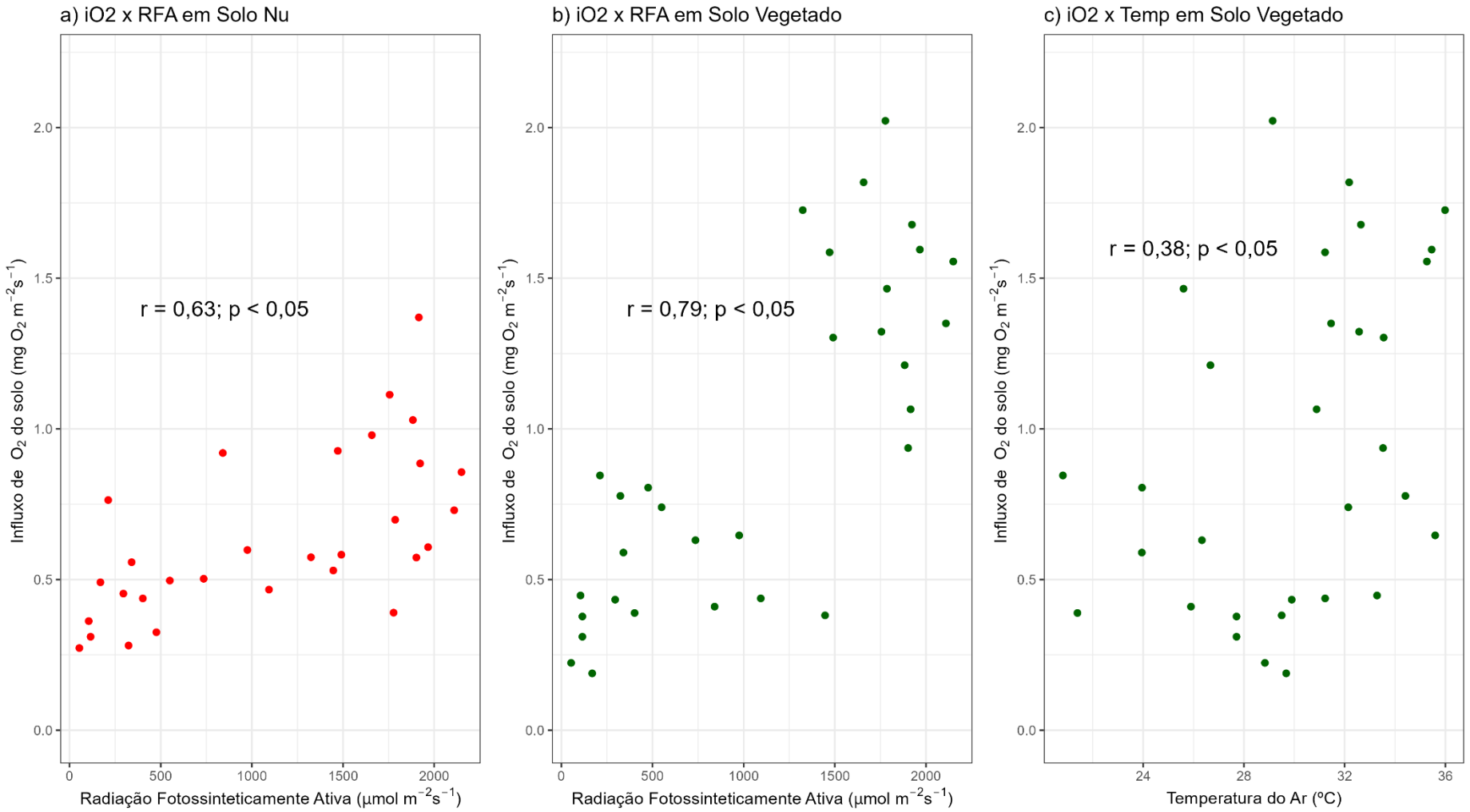


Figura 9. Relação linear entre o influxo de O_2 do solo com a radiação fotossinteticamente ativa (a, b) em solos nu e vegetados, respectivamente. Relação linear entre o influxo de O_2 do solo com a temperatura do ar em solo vegetado (c).

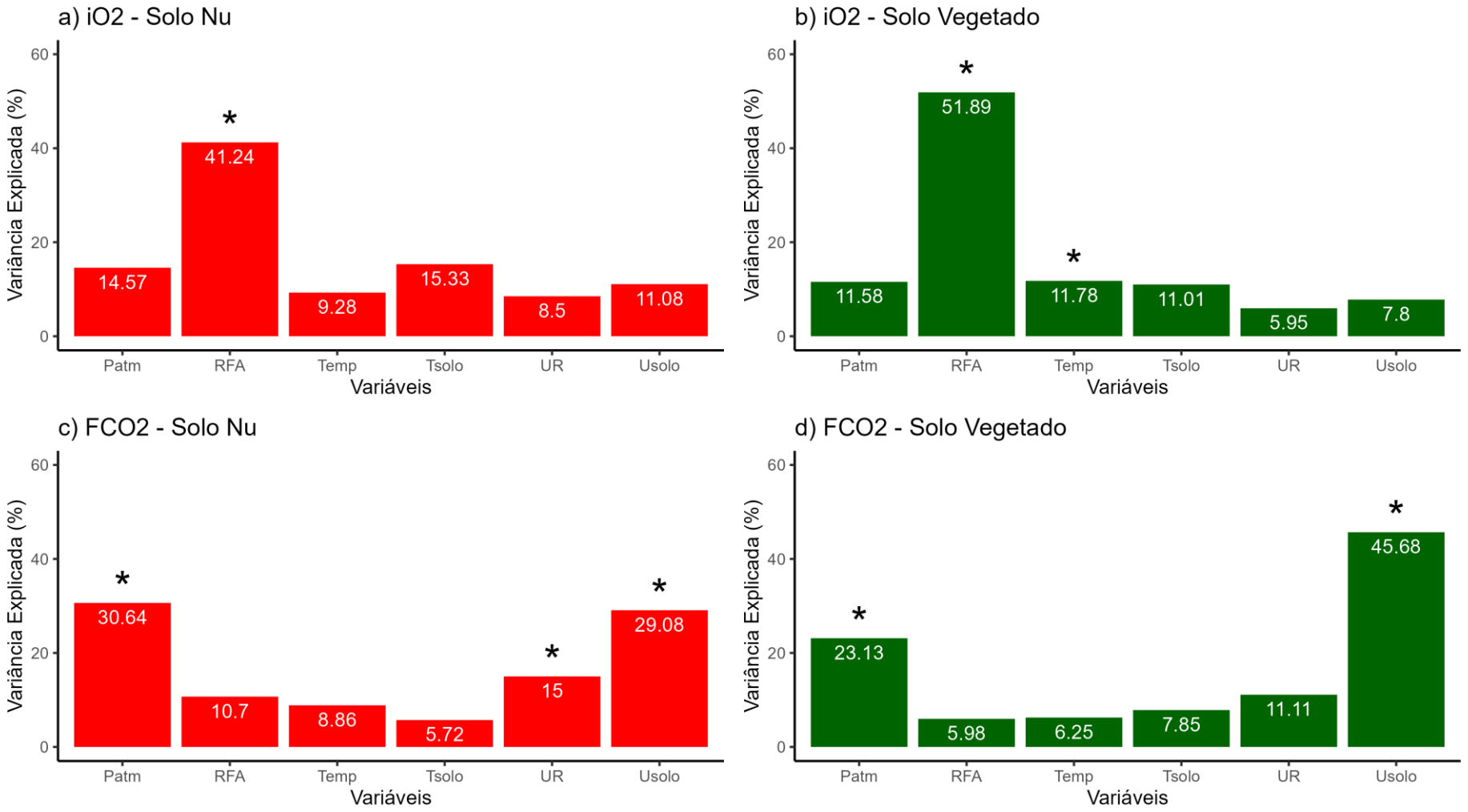


Figura 10. Análise do particionamento hierárquico para o influxo de oxigênio no solo (a, b) e para a emissão de CO_2 do solo (c, d). Em condições com e sem vegetação. Os asteriscos indicam significância a 5% de probabilidade.

3.3 Regressão linear simples para emissão de CO_2 do solo e o influxo de oxigênio do solo aplicando a validação cruzada de repetição

Os resultados na análise de correlação linear demonstraram moderada a forte relação entre emissão de CO_2 do solo (FCO2) com a umidade do solo (Usolo), além de uma associação do influxo de O_2 do solo (iO2) com a radiação fotossinteticamente ativa (RFA) entre os tratamentos estudados, assim os modelos lineares foram testados e foram significativos ($p < 0,05$).

Tabela 1. Modelo de regressão linear com validação cruzada k-fold de repetição da variação temporal da emissão de CO_2 em função da umidade do solo (%) (volume/volume) em solo nu.

Parâmetros	Estimativa	EP	RMSE ±DP	R^2	R^2 ajd
Intercepto	1,872	±0,473			
Usolo	0,2896	±0,046	1,18±0,23	0,61	0,60

Em que, EP é o erro-padrão da estimativa, RMSE é o erro quadrático médio seguido do desvio-padrão em µmol m^{-2} s^{-1}, R^2 é o coeficiente de determinação, R^2 ajd é o coeficiente de determinação ajustado. Foi adotado 5% de probabilidade em todos parâmetros.

A emissão de CO_2 no solo vegetado apresentou um coeficiente linear de 3,536 µmol m^{-2} s^{-1}, diferentemente do solo nu com 1,872 µmol m^{-2} s^{-1}. Em termos práticos, o solo vegetado respondeu ao incremento da umidade do solo a uma taxa de 0,438 (coeficiente angular), diferentemente do solo nu que possui uma taxa de apenas 0,2896; em comparação, isso representa uma taxa de crescimento do solo vegetado é cerca de 1,5 vezes maior em relação ao solo nu (Figura 12a).

Tabela 2. Modelo de regressão linear com validação cruzada k-fold de repetição da variação temporal da emissão de CO_2 em função da umidade do solo (%) (volume/volume) em solo vegetado.

Parâmetros	Estimativa	EP	RMSE ±DP	R^2	R^2 ajd
Intercepto	3,536	±0,488			
Usolo	0.,38	±0,054	1,26 ±0,20	0,72	0,71

Em que, EP é o erro-padrão da estimativa, RMSE é o erro quadrático médio seguido do desvio-padrão em µmol m^{-2} s^{-1}, R^2 é o coeficiente de determinação, R^2 ajd é o coeficiente de determinação ajustado. Foi adotado 5% de probabilidade em todos parâmetros.

O modelo também demostrou acertar mais na previsão da emissão de CO_2 no solo vegetado (R^2 ajd = 0,71) quando comparado ao solo nu (R^2 ajd = 0,60). Isso indica uma precisão de 71% na predição da FCO2 em solo vegetado contra 60% em solo nu, isto é, uma acurácia 11% maior. Por outro lado, apesar de existir uma diferença numérica, não há evidências que os modelos analisados tenham um erro quadrático médio (RMSE) diferentes entre si, assim, o solo vegetado apresentou RMSE de 1,26 µmol m^{-2} s^{-1} contra um RMSE de 1,18 µmol m^{-2} s^{-1} no solo nu (Tabela 1).

Tabela 3. Modelo de regressão linear com validação cruzada k-fold de repetição da variação temporal do influxo de O_2 em função da radiação fotossinteticamente ativa (µmol m^{-2} s^{-1}) em solo nu.

Parâmetros	Estimativa	EP	RMSE ±DP	R^2	R^2 ajd
Intercepto	0,3601	±0,0974			
RFA	0,0002684	±0,0000737	0,28 ±0,11	0,41	0,39

Em que, EP é o erro-padrão da estimativa, RMSE é o erro quadrático médio seguido do desvio-padrão em mg O_2 m^{-2} s^{-1}, R^2 é o coeficiente de determinação, R^2 ajd é o coeficiente de determinação ajustado. Foi adotado 5% como nível de probabilidade em todos parâmetros.

A tabela 4 apresenta o modelo de regressão para iO2 em função da RFA no solo nu, notadamente, o influxo de oxigênio no solo nu não parece ser tão bem explicado em relação ao solo vegetado (Tabela 4). Enquanto, o solo nu responde a uma taxa em relação ao aumento da radiação fotossinteticamente ativa de 0,0002684 no solo vegetado essa taxa chega aos 0,000579. No solo vegetado, a RFA explicou 61% da variação no iO2 (R^2 adj = 0,61), diferentemente do solo nu, em que, a RFA explicou apenas 39% (R^2 adj = 0,39). Em ambos os casos não foram observadas diferenças nos coeficientes lineares, isto é, quando a RFA é zero, o influxo de O_2 no solo nu e no solo vegetado não são diferentes entre si (Figura 12b).

Tabela 4. Modelo de regressão linear com validação cruzada k-fold de repetição da variação temporal do influxo de O_2 em função da radiação fotossinteticamente ativa (µmol m^{-2} s^{-1}) em solo vegetado.

Parâmetros	Estimativa	EP	RMSE ±DP	R^2	R^2 ajd
Intercepto	0,3241	±0,116			
RFA	0,000579	±0,000088	0.34 ±0.06	0,63	0,61

Em que, EP é o erro-padrão da estimativa, RMSE é o erro quadrático médio seguido do desvio-padrão em mg O_2 m^{-2} s^{-1}, R^2 é o coeficiente de determinação, R^2 ajd é o coeficiente de determinação ajustado. Foi adotado 5% como nível de probabilidade em todos parâmetros.

Embora, foram apresentados o erro quadrático médio (RMSE) para cada modelo de regressão, em nossos casos ao considerar o desvio-padrão do RMSE observa-se que não há evidências para a suposição que os erros sejam diferentes entre si, o que retorna ao coeficiente de determinação ajustado (R^2 adj) como parâmetro de avaliação do desempenho e validação dos modelos lineares analisados nesse estudo. Assim, as métricas de RMSE sinalizam erros proporcionais nos modelos ao estimar os valores da emissão de dióxido de carbono e o influxo de oxigênio no solo sob condições de com e sem vegetação.

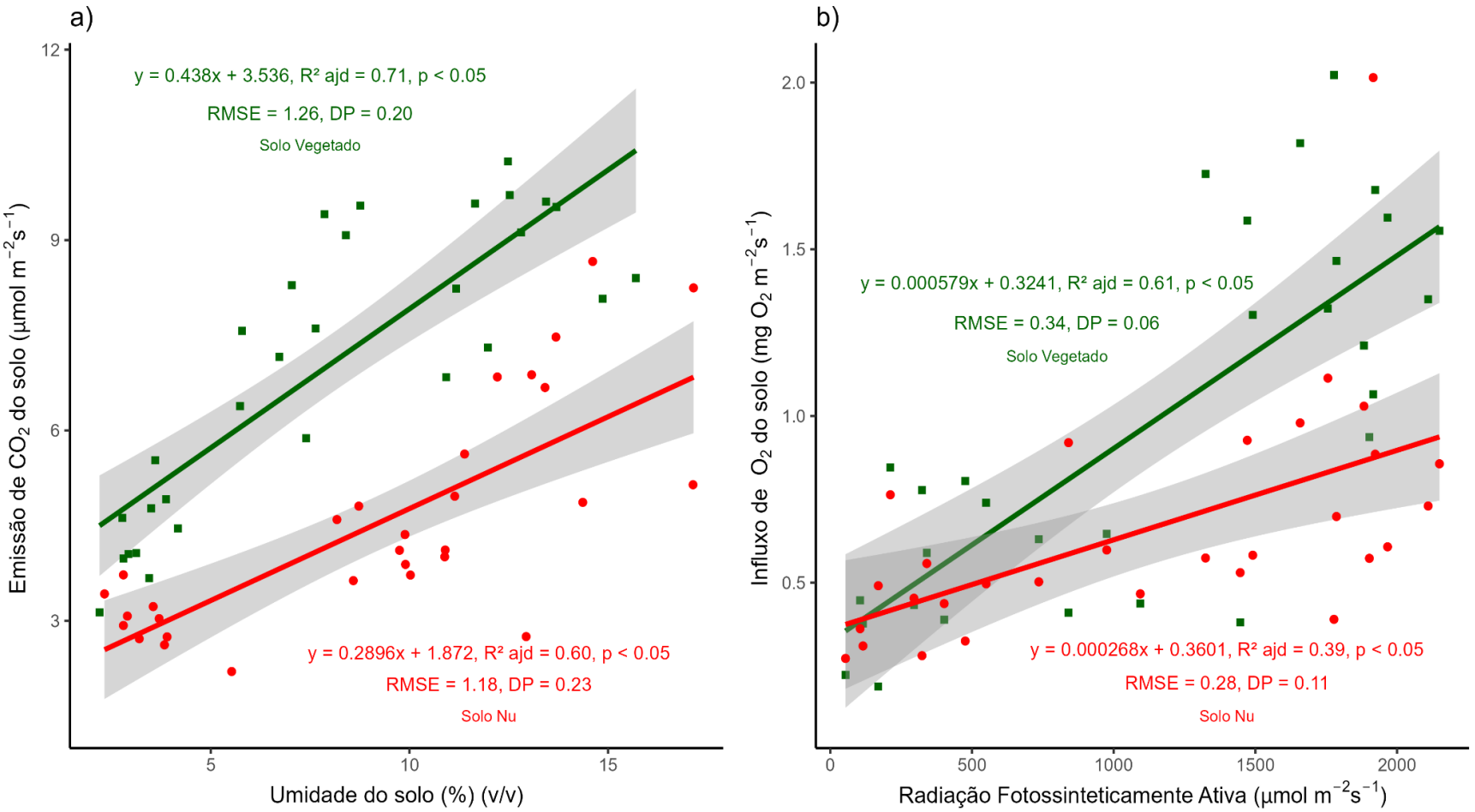


Figura 11. Modelos de regressões lineares. Em a) emissão de CO_2 do solo em função da umidade do solo, b) influxo de O_2 do solo em função da radiação fotossinteticamente ativa. Nota: a sombra cinza indica o erro-padrão do ajuste.

4 DISCUSSÃO

4.1 Variabilidade diurna, efeito da raiz e das condições meteorológicas

Observou-se padrões temporais em função das condições ambientais nos dias avaliados, de fato, a emissão de CO_2 em solo vegetado é superior quando comparado ao solo nu, no geral, essas diferenças foram mais expressivas e significativas ocorrendo entre 10h e 15h (Figura 6a, 6b e 6c), nesse intervalo de tempo foi observado as maiores taxas de radiação fotossinteticamente ativa, em alguns casos, ultrapassando os 2000 µmol m^{-2} s^{-1} (Figura 2c, 3c e 4c).

A emissão de CO_2 do solo mais elevada no primeiro e terceiro momento (Figura 6ª e 7a) foi condicionada pela umidade do solo (Figura 6c e 7c). A umidade do solo é um estimulante da atividade microbiana e, da respiração de raízes e assim resulta no aumento das emissões de CO_2 do solo (Chin et al., 2023). O efeito intrínseco da raiz foi calculado e apresentado como material suplementar (ver Apêndice A).

A emissão de CO_2 superior no solo vegetado é oriunda da contribuição da respiração de raízes, essa componente de respiração do solo, pode representar cerca de 50% da respiração do solo (Luo e Zhuo, 2006), no entanto, a contribuição da respiração de raiz apresenta alta variabilidade podendo variar de 10 até 90% da respiração do solo (Hanson et al., 2000).

Nesse estudo, a contribuição da respiração das raízes[2] na emissão de CO_2 do solo foi de 27,6% no primeiro momento (dia 275), 30,4% no segundo momento (dia 297) e de 48,1% no terceiro momento (dia 313), enquanto, o valor médio da componente respiração de raiz foi cerca de 35,4% da respiração do solo (considerando todos os momentos investigados). Assim, os valores de amplitude e o valor médio da contribuição da raiz na respiração do solo apontados nesse estudo corroboram os valores reportados por Hanson et. al. (2000); e os limites teóricos de Luo e Zhuo et al. (2006).

Enquanto, no segundo momento (dia 297), a menor umidade do solo (menor que 4,0%, Figura 7b) influenciou negativamente, a emissão de CO_2 do solo em ambos os tratamentos (Figura 7b). No solo e na planta, os processos bioquímicos,

[2] A respiração de raiz pode ser obtida pela manipulação algébrica da equação: Rs = Rm + Rr, em que Rs é a respiração do solo, Rm é a respiração microbiana (solo nu) e Rr é a respiração radicular (solo vegetado). Fonte: Fang e Moncrieff, 1999.

respiratórios e a dinâmica da biomassa microbiana são dependentes da umidade (Costa e Marenco, 2007).

Assim, condições de baixa umidade condiciona um estresse nos processos bioquímicos do solo, e, portanto, é um fator limitante da atividade de microorganismos no solo e na rizosfera (Romagnoli e Andreote, 2016). Em adição, as raízes dependem do potencial hídrico para a absorção e o transporte de água e nutrientes, à medida que o potencial hídrico diminuí (menor umidade do solo), aumenta a dificuldade de absorção e o gasto de energia o que pode interromper a fotossíntese na parte aérea da planta (Costa e Marenco, 2007; Jin et al., 2024).

No primeiro momento (dia 275) os maiores valores de influxo de O_2 foram observados no intervalo das 10h até 15h (Figuras 6d, 6e e 6f), não ao acaso, neste horário também ocorreu os maiores valores de radicação fotossinteticamente ativa (RFA) (Figuras 3c, 4c, 5c). Na planta, o estímulo para a respiração de raízes está acoplado ao aumento da radiação, esta atua como estimulante da atividade fotossintética (Costa e Marenco, 2007). Os resultados sugerem que o influxo maior de O_2 no solo vegetado é influenciado pela respiração de raízes.

Ainda no primeiro momento (dia 275) o influxo de O_2 do solo não diferiu entre os tratamentos para 07h e 17h. É possível que esse efeito esteja relacionado com à redução da atividade fotossintética, uma vez que, a fotossíntese está associada com aumento dos índices de radiação fotossinteticamente ativa (Costa e Marenco, 2007). Porém, a queda na respiração de raízes às 07h e 17h que pode ser efeito da redução ou paralisação da fotossíntese e pode ser atribuída a fotoinibição (Dias e Marenco, 2006). Enquanto, no solo nu tal queda também pode está associada a falta de radiação solar que condiciona maior temperatura do solo que facilita a entrada do oxigênio no solo (Neira et al., 2015).

A fotoinibição ocorre quando a energia do fóton necessária para fotossíntese está em níveis baixos, assim ocorre uma queda nas taxas fotossintética que resulta em baixa respiração celular (Dias e Marenco, 2006). Justamente às 07h e 17h os índices de RFA registrados foram menores que 500 µmol m^{-2} s^{-1} (Figura 3c), o que pode explicar os resultados não significativos de influxo de O_2 nos horários supracitados.

Esse comportamento repetiu-se nos dias 297 e 313, nos horários das 07h, 10h e 17h. No entanto, às 12h e 15h o influxo de O_2 do solo vegetado foi superior e pode ser atribuído as taxas mais altas de respiração das raízes, pois durante o pico da

fotossíntese que ocorre próximo ao meio-dia (Costa e Marenco, 2007) as plantas podem secretar cerca de 40% dos produtos fotossintetizados (ex.: açúcares solúveis) na rizosfera o que eleva a atividade respiratória das raízes e da comunidade microbiana presente, esse processo é denominado de efeito rizosférico (Romagnoli e Andreote, 2016).

A umidade do solo no dia 275, em ambos tratamentos iniciaram as leituras na mesma faixa de umidade do solo (~15,5%), contudo ao decorrer do dia o tratamento com solo vegetados demostrou perder mais umidade do solo em relação ao solo nu, isso pode estar associado à evapotranspiração mais acelerada devido a atividade fotossintética (Roudier et al., 2011). Apesar que ao final do dia (às 17h) ambos os tratamentos apresentarem mesmo nível de umidade (Figura 7a), isso pode ser explicado devido ao efeito da evaporação descontrolada que ocorre em solos sem proteção física (solo nu) aos efeitos da radiação e temperatura (Davidson e Janssens, 2006; Dusenge et al., 2018).

A umidade do solo no segundo momento (dia 297) apresentou maiores oscilações (Figura 7b). Essas variações, no solo nu, podem ser atribuídas ao aumento do déficit hídrico (baixa umidade) que está interligado ao aumento da temperatura do ar e da radiação, assim, a capacidade de retenção de água no solo apresenta elevada variabilidade (Hamdi et al., 2013). Enquanto, no solo vegetado o potencial hídrico parece governar as condições de umidade do solo ao longo do dia o que poderia ter resultado numa diminuição da evapotranspiração nesse tratamento e manutenção no potencial hídrico do solo (Reth et al., 2005; Feng et al., 2021).

A umidade no terceiro momento (dia 313) demostrou um comportamento típico após a recomposição da umidade do solo (Figura 7c). A perda de água no solo vegetado é oriunda do somatório da evaporação mais a transpiração vegetal o que resulta em mais perda de água ao longo do dia, enquanto no solo nu a perda de água ocorre apenas pela evaporação (Coelho Filho et al., 2011). Vale ressaltar que esse fenômeno só foi observado devido os eventos de precipitação que favoreceram a recomposição do conteúdo de água no solo (Wu et al., 2010; Drake et al 2013).

A temperatura do solo aumentou ao longo do dia nos diferentes momentos avaliados (Figuras 7d, 7e e 7f), assim, a temperatura do solo apresentou comportamento similar à temperatura do ar (Figuras 2a, 3a e 4a) e ambas as temperaturas chegaram aos seus valores máximos às 15h. Assim, observou-se que a

temperatura do solo respondeu ao aumento da temperatura do ar e da radiação (Figuras 2a, 3a, 4a).

Um contraste foi observado nas temperaturas do solo entre os tratamentos. Com maior umidade no dia 275, a diferença entre o solo nu e o solo vegetado foi de apenas 2,8°C, entretanto, no segundo momento (dia 297) com umidade do solo média mais baixa (aproximadamente 4%), o solo vegetado registrou uma temperatura do solo 9,7 °C menor que o solo nu. Enquanto, no terceiro momento (dia 313) essa diferença foi de 7,7 °C. Esse contraste de temperatura entre o solo nu e o solo vegetado pode ser atribuído ao efeito da aclimatação das raízes (Kutsch et al., 2002).

O efeito da temperatura do solo em condições de diferentes coberturas do solo já foi observado por De Lucena et al. (2023) que constatou a diminuição da temperatura em solos cobertos por palha ou vegetados em relação a solos nus. Sabe-se que diferentes coberturas do solo podem oferecer mais ou menos proteção física à radiação (Atkin et al., 2000), com efeito, a temperatura do solo que responde linearmente ao aumento da temperatura do ar pode ser condicionada pelo uso das coberturas vegetais e assim alterar a influência da radiação sobre os solos (Khan et al., 2024).

4.2 Relação entre a dinâmica respiratória do solo e dados climáticos

As condições ambientais pautadas nessa discussão são representadas pelas variáveis meteorológicas, como, temperatura do ar, umidade relativa do ar, pressão atmosférica e radiação fotossinteticamente ativa (Figuras 2, 3, 4). As correlações observadas denotam que independente do tratamento as condições impostas pelo ambiente tendem a governar a dinâmica respiratória no solo (Davidson e Janssens, 2006; Chin et al., 2023).

A existência de uma relação forte e positiva entre a emissão de CO_2 e a umidade registrada pode ser explicada por que no tempo as condições impostas para umidade do solo é um fator condicionante da atividade microbiana (Jian et al., 2021; Lal, 2022), no entanto, esse efeito já era esperado e foi observado por Almeida et al. (2018) e Moitinho et al. (2021a). Assim, a umidade do solo um fator intrínseco associado às emissões de CO_2 do solo, pois está ligada ao mesmo tempo com atividade da biomassa microbiana e a respiração de plantas e de raízes (Atkin et al., 2000; Bini et al., 2013; Camarda et al., 2019) o que justifica a forte correlação no solo vegetado ($r = 0,80$; $p < 0,05$). Essa associação da microbiota edáfica com a emissão

de CO_2 do solo acontece no tempo e no espaço pela degradação biogênica da matéria orgânica do solo e decomposição e isso explica a forte correlação também observada no solo nu ($r = 0,76$; $p < 0,05$) (Lal, 2009; Camarda et al., 2019; Moitinho et al., 2021b).

As interações negativas observadas entre a emissão de CO_2 do solo e a pressão atmosférica nos tratamentos sugerem que a emissão de CO2 diminui à medida que a pressão atmosférica aumenta durante o dia. Embora, poucos estudos propuseram relacionar as emissões de CO_2 com dados climáticos. Nesses estudos também foram observadas relações negativas entre a emissão de CO_2 e a pressão atmosférica (Camarda et al., 2019; De Lucena et., 2023; Vicentini et al., 2023). Tal comportamento pode ser reflexo do processo físico que descreve o fluxo de gases no solo, a difusão, descrita na primeira Lei de Fick em que o transporte de massas de ar sofre com a pressão exercida pela atmosfera o que resulta em uma pequena queda nas emissões de gases do solo (Neira et al., 2015; Camarda et al., 2019).

Essa diminuição das emissões de CO_2 sugerida por Neira et al. (2015) e Camarda et al (2019), em nossos resultados, demostram que a variabilidade diuma da pressão atmosférica pode explicar cerca de 30,6% das emissões de CO_2 no solo nu e aproximadamente 23,1% da variabilidade temporal das emissões em solos vegetados conforme observado na análise do particionamento hierárquico, vale ressaltar que esses valores foram significativos ($p < 0,05$) (Figura 10c e 10d).

Correlações fracas ou fraca-moderadas já foram observadas na relação umidade relativa do ar com a emissão de CO_2 do solo (Canteral et al., 2023). Assim, condições meteorológicas do ambiente, como temperatura e umidade relativa do ar podem afetar o processo de emissão de dióxido de carbono do solo para atmosfera terrestre (Davidson e Janssens, 2006; Canteral et al., 2023).

Quanto ao influxo de O_2 no solo já é conhecido os efeitos da pressão atmosférica e temperaturas (do ar e do solo) pois esses são fatores facilitadores da difusão do oxigênio nos solos (Neira et al., 2015; De Lucena et al., 2023) (Figura 10c). Contudo, o efeito da radiação fotossinteticamente ativa como potencializador do influxo de oxigênio da atmosfera para o solo já foi reportado (Neira et al., 2015; Vicentini et al., 2023).

Acredita-se que a demanda por oxigênio no solo é aumentada com a respiração celular e a ativação das raízes condicionada pela atividade fotossintética que depende dentre outros fatores de água, nutrientes e da absorção de luz solar (fóton) como estimulante dessa fase clara da fotossíntese (Costa e Marenco, 2007; Roudier et al.,

2011; Romagnoli e Andreote, 2016), isso pode justificar a forte correlação positiva entre o influxo de O_2 e a radiação fotossinteticamente ativa no solo vegetado ($r = 0,78$; $p < 0,05$) (Figura 10b).

Em adição, o resultado significativo da explicação da variabilidade apontada pelo particionamento hierárquico (51,89%) (Figura 10b) exemplifica a relação do influxo de oxigênio com a radiação fotossinteticamente ativa, em especial, no solo vegetado o que reforça a possibilidade de acesso à respiração radicular e o estímulo da fotossíntese condicionado pela radiação (Kutsch et al., 2002; Romagnoli e Andreote, 2016; Chin et al., 2023).

4.3 Modelos de predição linear da respiração do solo

Esses resultados avançaram na proposição de uma metodologia simples para prever a respiração do solo a partir de regressões lineares que usam como *inputs* a umidade do solo e a radiação fotossinteticamente ativa, cuja a importância já foi mencionada nas seções anteriores. Os resultados da validação cruzada de K-fold com repetição demostrou serem sólidos o suficiente para o banco de dados avaliado (Zuur et al., 2009; Winter, 2013).

Os principais estudos pontuam que a temperatura do solo ideal para respiração radicular encontra-se entre 20 e 30°C (Atkin et al., 2000; Hanson et al., 2000; Kutsch et al., 2002; Inagaki et al., 2016; Dusenge et al., 2018), essa faixa de temperatura é facilmente observada em condições tropicais (Inagaki et al., 2016). Assim, a modelagem da emissão de CO_2 do solo pode ser realizada pela umidade do solo como fator governante de dois compartimentos fundamentais na respiração do solo, e são eles, a atividade microbiana e o efeito rizosférico (Romagnoli e Andreote, 2016; Dusenge et al., 2018).

Os resultados apontaram uma acurácia na predição da emissão de CO_2 do solo de 61% para solo nu e de 72% para solos vegetados. As inferências estatísticas também foram fortes os suficientes para não rejeitar a hipótese de diferenças entre a taxa de crescimento (coeficiente angular) na comparação solo nu *versus* solo vegetado (Tabela 1 e 2). Anteriormente, Silva et al. (2019) havia proposto a predição usando regressão linear múltipla a partir dos atributos do solo, entre eles, a umidade do solo, e Canteral et al. (2023) usando diversas variáveis edafoclimáticas por meio de machine learning. Assim, as estimativas previstas nessa modelagem linear apresentaram-se promissora, simples e com potencial de aplicação maior na

promoção maior sustentabilidade em sistemas agrícolas, plantações florestais e plantas cultivadas (De Lucena et al., 2018; Schmiege et al., 2023).

Este estudo apresenta um resultado inédito na literatura, uma estimativa do influxo de oxigênio através de uma regressão linear simples. Vicentini et al. (2023) haviam proposto uma estimativa utilizando redes neurais, mas, de acordo com os autores, a base de dados não foi suficiente para a obtenção de um modelo geral. Dessa forma, esse estudo contribui para o entendimento da dinâmica da respiração global do solo. No solo nu, sem a atuação do efeito rizosférico (Moreira e Siqueira, 2006; Romagnoli e Andreote, 2016), foi obtido apenas 39% de explicação do influxo de O_2, mas quando se analisa o solo vegetado a explicação é de 61% (Figura 11).

A amplitude na estimativa do oxigênio do solo compreende todas as faixas já relatadas nos estudos de Almeida et al. (2018) em cana-de-açúcar; Vicentini et al. (2019) em florestas plantadas e por De Lucena et al. (2023) em diferentes coberturas do solo. Essa é uma informação importante que sugere que esse modelo seja possível de prever o influxo de O_2 do solo em diferentes condições. Os modelos apresentados nesse estudo mostraram maior capacidade de predição do influxo de O_2 do solo quando comparado ao reportado por Vicentini et al. (2023), apesar do uso de redes neurais.

A estimativa da emissão de CO_2 e do influxo de O_2 nos solos, especialmente os tropicais, é um importante indicador que auxilia na adoção de práticas agrícolas mais sustentáveis (Vicentini et al., 2019; De Lucena et al., 2023), além de permitir a criação de um novo indicador podem colaborar na criação de um novo indicador, denominado de quociente respiratório do solo, isto é, a razão entre a saída de CO_2 e entrada de O_2 no sistema, que ajuda no entendimento da dinâmica da respiração global do solo (Wolińska et al., 2011; Angert et al., 2015; Almeida et al., 2018).

5 CONCLUSÃO

Os resultados indicam que as respirações das raízes possuem relação com o influxo de O_2 no ecossistema solo, assim, a respiração radicular pode representar de 27 a 48 % da respiração do solo.

A emissão de CO_2 do solo respondeu a pressão atmosférica em solos com e sem vegetação, estima de 20 a 30% a contribuição da pressão atmosférica na explicação da variabilidade temporal diurna da emissão de CO_2.

A emissão de CO_2 do solo, sob condições, com ou sem vegetação, podem ser preditas usando um modelo linear com base na umidade do solo.

O influxo de O_2 no solo vegetado pode ser predito em função da radiação fotossinteticamente ativa (RFA).

Dessa forma, este estudo contribuiu para o progresso da compreensão da respiração do solo e da contribuição da respiração radicular, ao propor uma abordagem simplificada na predição de dois importantes gases que regulam a respiração global do solo.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, R.F.; TEIXEIRA, D.B.; MONTANARI, R.; BOLONHEZI, A.C.; TEIXEIRA, E.B.; MOITINHO, M.R.; PANOSSO, A.R.; SPOKAS, K.A.; LA SCALA JR, N. 2018. Ratio of CO_2 and O_2 as index for categorising soil biological activity in sugarcane areas under contrasting straw management regimes**. Soil Research.** 56(4): 373-381 https://doi.org/10.1071/SR16344.

ANDREWS, J. A.; HARRISON, K. G.; MATAMALA, R.; SCHLESINGER, W. H. 1999. Separation of root respiration from total soil respiration using Carbon-13 labeling during Free-Air Carbon Dioxide Enrichment (FACE). **Soil Science Society of America Journal.** 63: 1429-1435. https://doi.org/10.2136/sssaj1999.6351429x.

ANGERT, A.; YAKI, D.; RODEGHIERO, M.; PREISLER, Y.; DAVIDSON, E.A.; WEINER, T. Using O_2 to study the relationships between soil CO_2 efflux and soil respiration. **Biogeosciences.** 2015.

ATKIN, O. K.; EDWARDS, E. J.; LOVEYS, B. R. 2000. Response of root respiration to changes in temperature and its relevance to global warming. **New Phytologist.** 147:141-154. https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2000.00683.x.

BARTLETT, M.S. Properties of sufficiency and statistical tests. **Proceedings of the Royal Society of London.** 1937.

BALOGH, J.; PINTÉR, K.; FÓTI, SZ.; CSERHALMI, D.; PAPP, M.; NAGY, Z. 2011. Dependence of soil respiration on soil moisture, clay content, soil organic matter, and CO_2 uptake in dry grasslands. **Soil Biology & Biochemistry.** 43: 1006-1013. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.01.017.

BINI, D.; LOPEZ, M. V.; CARDOSO, E. J. B. N. 2016. Metabolismo microbiano. **In:** CARDOSO, E. J. B. N.; ANDREOTE, F. D. (org.). Microbiologia do solo. 2. Ed. Piracicaba: Esalq. p. 61-80.

BINI, D.; SANTOS, C. A.; CARMO, K. B.; KISHINO, N.; ANDRADE, G.; ZANGARO, W.; NOGUEIRA, M. A. 2013. Effects of land use on soil organic carbon and microbial processes associated with soil health in southern Brazil. **European Journal of Soil Biology.** 55: 117–123. http://dx.doi.org/10.1016/j.ejsobi.2012.12.010.

BRIEDIS, C.; SÁ, J. C. de M.; LAL, R.; TIVET, F.; FERREIRA, A. O.; FRANCHINI, J. C.; SCHIMIGUEL, R.; HARTMAN, D. C.; SANTOS, J. Z. 2016. Can highly weathered soils under conservation agriculture be C saturated? **Catena.** 147, 638–649. https://doi.org/ 10.1016/J.CATENA.2016.08.021.

CAMARDA, M.; GREGORIO, S.; CAPASSO, G.; DI MARTINO, R. M. R.; GURRIERI, S.; PRANO, V. 2019. The monitoring of natural soil CO_2 emissions: Issues and perspectives. **Earth-Science Reviews.** 198: 102928. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102928

CANTERAL, K.F.F.; VICENTINI, M.E.; DE LUCENA, W.B.; DE MORAES, M.L.T.; MONTANARI, R.; FERRAUDO, A.S.; PERUZZI, N.J.; LA SCALA JR, N.; PANOSSO, A.R. Machine learning for prediction of soil CO_2 emission in tropical forests in the Brazilian Cerrado. **Environmental Science and Pollution Research.** 2023. https://doi.org/10.1007/0s11356-023-26824-6.

CHIN, M. Y.; LAU, S. Y. L.; MIDOT, F.; JEE, M. S.; LO, M. L.; SANGOK, F. E.; MELLING, L. 2023. Root exclusion methods for partitioning of soil respiration: Review and methodological considerations. **Pedosphere.** 33(5): 686-699. https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2023.01.015.

COELHO FILHO, M. A.; BASSOI, L. H.; ANGELOCCI, L. R.; COELHO, E. F.; PEREIRA, F. A. de C. Relação solo-planta-atmosfera. **In:** SOUSA, V. F. de; MAROUELLI, W. A.; COELHO, E. F.; PINTO, J. M.; COELHO FILHO, M. A. (Ed.). Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2011. p. 27-90.

CONANT, R. T.; STEINWEG, J. M.; HADDIX, M. L.; PAUL, E. A.; PLANTE, A. F.; SIX, J. 2008. Experimental warming shows that decomposition temperature sensitivity increases with soil organic matter recalcitrance. **Ecology.** 89(9): 2384-2391. https://doi.org/10.1890/08-0137.1.

COSTA, G. F.; MARENCO, R. A. 2007. Fotossíntese, condutância estomática e potencial hídrico foliar em árvores jovens de andiroba (*Carapa guianensis*). **Acta Amazonica.** 37(2): 229-234. https://doi.org/10.1590/S0044-59672007000200008.

DAVIDSON, E.; JANSSENS, I. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. **Nature.** 2006. https://doi.org/10.1038/nature04514.

DE LUCENA, W.B.; VICENTINI, M.E.; SANTOS, G.A.A.D.; SILVA, B.O.; COSTA, D.V.M.; CANTERAL, K.F.F.; NEIRA ROMÁN, J.A.; ROLIM, G.S.; PANOSSO, A.R.; LA SCALA JR, N. Temporal variability of the CO_2 emission and the O_2 influx in a tropical soil in contrasting coverage conditions. **Journal of South American Earth Sciences.** 2023. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.104120.

DE LUCENA, W. B.; TAVARES, M. A.; CARMO, P. H. O.; PERÔNICO, B.W.C.; SANTOS, J. M.; FERREIRA, G. B. Agricultura sustentável e atributos biológicos do solo: uma breve revisão sobre os indicadores da qualidade agrícola-ambiental. **In:** Oliveira, A.C. (Ed). Ensaios nas Ciências Agrárias e Ambientais. 1ed. Ponta Grossa: Atena. 2018. p.45-52. https://doi.org/10.22533/at.ed.079182907.

DIAS, D.P.; MARENCO, R.A. 2006. Photoinhibition of photosynthesis in *Minquartia guianensis* and *Swietenia macrophylla* inferred by monitoring the initial fluorescence. **Photosynthetica.** 44: 235–240. https://doi.org/10.1007/s11099-006-0013-x.

DRAKE, J. E.; B. A. DARBY, B. A.; GIASSON, M. A.; KRAMER, M. A.; PHILLIPS, R. P.; FINZI, A. C. 2013. Stoichiometry constrains microbial response to root exudation insights from a model and a field experiment in a temperate forest. **Biogeosciences.** 10: 821-838. https://doi.org/10.5194/bg-10-821-2013.

DUSENGE, M. E.; DUARTE, A. G.; WAY, D. A. 2018. Plant carbon metabolism and climate change: elevated CO_2 and temperature impacts on photosynthesis, photorespiration and respiration. **New Phytologist.** 221: 32-49. https://doi.org/10.1111/nph.15283.

FENG, H.; GUO, J.; MALGHANI, S.; HAN, M.; CAO, P.; SUN, J.; XU, X.; XU, X.; WANG, W. 2021. Effects of soil moisture and temperature on microbial regulation of methane fluxes in a poplar plantation. Forests. 12:407. https://doi.org/10.3390/f12040407.

FISHER, R. A. 1935. The design of experiments. 1st ed. New York.

FRIEDLINGSTEIN, P.; O'SULLIVAN, M. JONES, M. W.; ANDREW, R. M.; HAUCK, J.; OLSEN, A.; PETERS, G. P.; PETERS, W.; PONGRATZ, J.; SITCH, S.; LE QUÉRÉ, C.; CANADELL, J. G.; CIAIS, P.; JACKSON, R. B.; ALIN, S.; ARAGÃO, L. E. O. C.; ARNETH, A.; ARORA, V. BATES, N. R.; BECKER, M.; BENOIT-CATTIN, A.; BITTIG, H. C.; BOPP, L.; BULTAN, S.; CHANDRA, N.; CHEVALLIER, F.; CHINI, L. P.; EVANS, W.; FLORENTIE, L. FORSTER, P. M.; GASSER, T.; GEHLEN, M.; GILFILLAN, D.; GKRITZALIS, T.; GREGOR, L.; GRUBER, N.; HARRIS, I.; HARTUNG, K.; HAVERD, V.; HOUGHTON, R. A.; ILYINA, T.; JAIN, A. K.; JOETZJER, E.; KADONO, K.; KATO, E.; KITIDIS, V.; KORSBAKKEN, J. I.; LANDSCHÜTZER, P.; LEFÈVRE, N.; LENTON, A.; LIENERT, S.; LIU, Z.; LOMBARDOZZI, D.; MARLAND, G. METZL, N.; MUNRO, D. R.; NABEL, J. E. M. S.; NAKAOKA, S. I.; NIWA, Y.; O'BRIEN, K.; ONO, T.; PALMER, P. I.; PIERROT, D.; POULTER, B.; RESPLANDY, L.; ROBERTSON, E.; RÖDENBECK, C.; SCHWINGER, J.; SÉFÉRIAN, R.; SKJELVAN, I.; SMITH, A. J. P.; SUTTON, A. J.; TANHUA, T.; TANS, P. P.; TIAN, H. Q.; TILBROOK, B.; VAN DER WERF G, VUICHARD, N.; WALKER, A. P.; WANNINKHOF, R.; WATSON, A. J.; WILLIS, D.; WILTSHIRE, A. J.; YUAN, W. P.; YUE, X.; ZAEHLE, S. 2020. Global carbon budget 2020. **Earth System Science Data.** 12: 3269–3340. https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020.

GIACOMO, G.; ANGELO, F.; FABIO, B.; STEFANO, B.; RICCARDO, M. 2014. Measurements of soil carbon dioxide emissions from two maize agroecosystems at harvest under different tillage conditions. **Scientific World Journal**. 141345. https://doi.org/10.1155/2014/141345.

HAMDI, S.; MOYANO, F.; SALL, S.; MARTIAL, B.; TIPHAINE, C. (2013). Synthesis analysis of the temperature sensitivity of soil respiration from laboratory studies in relation to incubation methods and soil conditions. **Soil Biology and Biochemistry**. 58: 115-126. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.11.012.

HANSON, P. J.; EDWARDS, N. T.; GARTEN, C. T.; ANDREWS, J. A. 2000. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations. **Biogeochemistry.** 48: 115–146. https://doi.org/10.1023/A:1006244819642.

HOPKINS, F.; GONZALEZ-MELER, M.A.; FLOWER, C. E.; LYNCH, D. J.; CZIMCZIK, C.; TANG, J. W.; SUBKE, J. A. 2013. Ecosystem-level controls on root-rhizosphere respiration. **New Phytologist.** 199: 339–351. https://doi.org/10.1111/nph.12271.

INAGAKI, T. M.; MORAES SÁ, J. C.; CAIRES, E. F.; GONÇALVES, D. R. P. 2016. Lime and gypsum application increases biological activity, carbon pools, and agronomic productivity in highly weathered soil. **Agriculture, Ecosystems & Environment.** 231: 156-165. https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.06.034.

IPCC. **Synthesis Report.** Sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, United Kingdom and New York. 2023. 85p.

JIAN, J.; VARGAS, R.; ANDERSON-TEIXEIRA, K.; STELL, E.; HERRMANN, V.; HORN, M.; KHOLOD, N.; MANZON, J.; MARCHESI, R.; PAREDES, D.; BOND-LAMBERTY, B. 2021. A restructured and updated global soil respiration database (SRDB-V5). **Earth System Science Data**. 13: 255-267. https://doi.org/10.5194/essd-13-255-2021.

JIN, R.; YAN, M.; LI, G.; LIU, M.; ZHAO, P.; ZHANG, Z.; ZHANG, Q.; ZHU, X.; WANG, J.; YU, Y.; ZHANG, A.; YANG, J.; TANG, Z. 2024. Comparative physiological and transcriptome analysis between potassiumdefciency tolerant and sensitive sweetpotato genotypes in response to potassium-defciency stress. **BMC Genomics.** 25, 61. https://doi.org/10.1186/s12864-023-09939-5.

KAISER, H.F. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. **Psychometrika.** 1958. https://doi.org/10.1007/BF02289233.

KASSAMBARA, A.; MUNDT, F. **factoextra:** extract and visualize the results of multivariate data analyses. R package version 1.0.7. 2020. https://CRAN.R-project.org/package=factoextra.

KASSAMBARA, A. **rstatix:** pipe-friendly framework for basic statistical tests. R package version 0.7.0. 2021. https://CRAN.R-project.org/package=rstatix.

KHAN, A.; WICHERN, F.; UPOROVA, M.; KUZYAKOV, Y. 2024. Mineralization and temperature sensitivity of soil organic matter pools of contrasting lability. **European Journal of Soil Science.** 75: e13451. https://doi.org/10.1111/ejss.13451.

KUHN, M. 2008. Building predictive models in R using the caret package. **Journal of Statistical Software.** 28(5): 1–26. https://doi.org/10.18637/jss.v028.i05.

KUTSCH, W. L.; STAACK, A.; WÖTZEL, J.; MIDDELHOFF, U.; KAPPEN, L. 2001. Field measurements of root respiration and total soil respiration in an alder forest. **New Phytologist.** 150:157-168. https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2001.00071.x.

LAL, R. 2022. Reducing carbon footprints of agriculture and food systems. **Carbon Footprints.** 1:3, 1-19. https://dx.doi.org/10.20517/cf.2022.05.

LUO, Y.; ZHOU, X. Soil respiration and the environment. San Diego: **Academic Press**; 2006. 316p.

MOITINHO, M.R.; PADOVAN, M.P.; PANOSSO, A.R.; LA SCALA JR, N. 2013. Efeito do preparo do solo e resíduos da colheita de cana-de-açúcar sobre a emissão de CO_2. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** 37: 1720-1728. https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000600028.

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 JR, N. 2021a. Effects of burned and unburned sugarcane harvesting systems on soil CO_2 emission and soil physical, chemical, and microbiological attributes. **Catena.** 196: 104903. https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104903.

MOITINHO, M. R.; TEIXEIRA, D. B.; BICALHO, E. S.; PANOSSO, A. R.; FERRAUDO, A. S.; Pereira, G. T.; TSAI, S. M.; BORGES, B. M. F.; LA SCALA JR, N. 2021b. Soil CO_2 emission and soil attributes associated with the microbiota of a sugarcane area in southern Brazil. **Scientific Reports**. 11: 8325. https://doi.org/10.1038/s41598-021-87479-2.

MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O. **Microbiologia e bioquímica do solo.** Lavras: Editora da UFLA, 2.ed., 2006, 729p.

NEIRA, J.; ORTIZ, M.; MORALES, L.; ACEVEDO, E. 2015. Oxygen diffusion in soils: understanding the factors and processes needed for modeling. **Chilean Journal of Agricultural Research**. 75: 35-44. http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392015000300005.

PEDERSEN, T. **patchwork:** the composer of plots. R package version 1.1.1, 2020. https://CRAN.R-project.org/package=patchwork.

PIMENTEL GOMES, F. 1990. **Curso de estatística experimental.** 13 ed. Piracicaba: Nobel. 468 p.

RAMAGNOLI, E. M.; ANDREOTE, F. D. Rizosfera. **In:** CARDOSO, E. J. B. N.; ANDREOTE, F. D. (org.). Microbiologia do solo. 2. Ed. Piracicaba: Esalq, 2016. p. 47-60.

R CORE TEAM. **R:** A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2023. URL https://www.R-project.org/.

REN, S.; WANG, T.; GUENET, B.; LIU, D.; CAO, Y.; DING, J. SMITH, P.; PIAO, S. 2024. Projected soil carbon loss with warming in constrained Earth system models. **Nature Communications.** 15:102. https://doi.org/10.1038/s41467-023-44433-2.

RETH, S.; REICHSTEIN, M.; FALGE, E. 2005. The effect of soil water content, soil temperature, soil pH-value and the root mass on soil CO_2 efflux – A modified model. **Plant and Soil.** 268: 21-33. https://doi.org/10.1007/s11104-005-0175-5.

ROUDIER, P.; SULTAN, B.; QUIRION, P.; BERG, A. 2011. The impact of future climate change on West African crop yields: What does the recent literature say. **Global Environmental Change.** 21: 1073-1083. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.04.007.

SILVA, B.O.; MOITINHO, M.R.; SANTOS, G.A.A.; TEIXEIRA, D.B.; FERNANDES, C.; LA SCALA JR, N. 2019. Soil CO_2 emission and short-term soil pore class distribution after tillage operations. **Soil and Tillage Research.** 189: 224-232. https://doi.org/10.1016/j.still.2018.10.019.

SCHMIEGE, S. C.; HESKEL, M.; YUZHEN FAN, Y.; WAY, D. A. 2023. It's only natural: Plant respiration in unmanaged systems. **Plant Physiology.** 192:710-727. https://doi.org/10.1093/plphys/kiad167.

SCHNEIDER, V.M. Análise multivariada aplicada no estudo de dentifrícios comercializados no Brasil. Santa Maria, 2018. 78p. **Dissertação (Mestrado).** Centro de Ciências Naturais e Exatas. Universidade Federal de Santa Maria.

SHAPIRO, S.S.; WILK, M.B. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika.**1965. https://doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591.

STONE, M. 1978. Cross-validation: a review. **Series Statistics.** 9:(1): 127-139. https://doi.org/10.1080/02331887808801414.

THORNTHWAITE, C. W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review.** 38: 55-94. https://www.jstor.org/stable/210739.

VENABLES WN, RIPLEY BD. **Modern Applied Statistics with S.** Fourth Edition. Springer, New York. 2002.

VICENTINI, M. E.; PINOTTI, C. R.; HIRAI, W. Y.; MORAES, M. L. T.; MONTANARI, R.; TEIXEIRA FILHO, M.C.M.; MILORI, D.M.B.P.; LA SCALA JR, N.; PANOSSO, A.R. 2019. CO_2 emission and its relation to soil temperature, moisture, and O_2 absorption in the reforested areas of Cerrado biome Central Brazil. **Plant & Soil.** 444:193-211. https://doi.org/10.1007/s11104-019-04262-z

VICENTINI, M. E.; DA SILVA, P. A. CANTERAL, K. F. F.; DE LUCENA, W. B.; MORAES, M. L. T.; MONTANARI, R. TEIXEIRA FILHO, M. C. M.: PERUZZI, N. J.; LA SCALA JR, N.; ROLIM, G. S.; PANOSSO, A. R. 2023. Artificial neural networks and adaptive neuro-fuzzy inference systems for prediction of soil respiration in forested areas southern Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment.** 195:1074. https://doi.org/10.1007/s10661-023-11679-8.

WINTER, B. 2013**. Linear models and linear mixed effects models in R with linguistic applications.** Disponível em <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1308/1308.5499.pdf>. Acesso em 05 fev. 2024.

WICKHAM, H. **ggplot2:** elegant graphics for data analysis, 2nd ed. Springer, New York, NY. 2016. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24277-4_5.

WICKHAM, H.; AVERICK, M.; BRYAN, J.; CHANG, W.; MCGOWAN, L.D.; FRANÇOIS, R.; GROLEMUND, G.; HAYES, A.; HENRY, L.; HESTER, J.; KUHN, M.; PEDERSEN, T.L.; MILLER, E.; BACHE, S.M.; MÜLLER, K.; OOMS, J.; ROBINSON, D.; SEIDEL, D.P.; SPINU, V.; TAKAHASHI, K.; VAUGHAN, D.; WILKE, C.; WOO, K.; YUTANI, H. Welcome to the tidyverse. **Journal of Open Source Software.** 2019. https://doi.org/10.21105/joss.01686.

WICKHAM, H.; BRYAN, J. **readxl:** read excel files. R package version 1.4.0, 2022. https://CRAN.R-project.org/package=readxl.

WOLIŃSKA, A.; STEPNIEWSKA, Z.; SZAFRANEK-NAKONIECZNA, A. 2011. Effect of selected physical parameters on respiration activities in common Polish mineral soils. **Polish Journal of Environmental Studies**. 20: 1075–1082.

WU, X.; YAO, Z.; BRÜGGEMANN, N.; SHEN, Z. Y.; WOLF, B.; DANNENMANN, M.; ZHENG, X.; BUTTERBACH-BAHL, K. 2010. Effects of soil moisture and temperature on CO_2 and CH_4 soil–atmosphere exchange of various land use/cover types in a semi-arid grassland in Inner Mongolia, China. **Soil Biology and Biochemistry.** 42: 773-787. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.01.013.

ZHANG, Q.; WU, J.; YANG, F.; LEI, Y.; ZHANG, Q.; CHENG, X. 2016. Alterations in soil microbial community composition and biomass following agricultural land use change. **Scientific Reports.** 6: 36587. https://doi.org/10.1038/srep36587.

ZUO, G.; HUO, J.; YANG, X.; MEI, W.; ZHANG, R.; KHAN, A.; FENG, N.; ZHENG, D. 2024. Photosynthetic mechanisms underlying NaCl-induced salinity tolerance in rice (*Oryza sativa*). **BMC Plant Biology.** 24:41. https://doi.org/10.1186/s12870-024-04723-3.

ZUUR, A. F.; IENO, E. N.; WALKER, N. J.; SAVELIEV, A. A.; SMITH, G. M. 2009. Mixed effects models and extensions in ecology with R. Springer-Verlag New York. 542p. https://doi.org/10.1007/978-0-387-87458-6.

CAPÍTULO III - EXPLORANDO A VARIABILIDADE TEMPORAL DE CURTO PRAZO DA EMISSÃO DE CO_2 E DO INFLUXO DE O_2 DO SOLO EM AGROECOSSISTEMAS TROPICAIS

RESUMO:
O metabolismo do solo ou simplesmente a respiração do solo é o processo de trocas gasosas, isto é, entre o consumo de O_2 e produção de CO_2 no solo. O objetivo foi investigar a variabilidade temporal a curto prazo das emissões de CO_2 e do influxo de O_2 do solo e relacionar com as condições climáticas tropicais e atributos do solo. Assim, foram avaliadas as emissões de CO_2 usando o sistema portátil LI-8100, enquanto o influxo de O_2 do solo foi obtido pela interpolação linear da variação de O_2 no interior da câmara de avaliação com o sensor inteligente UV Flux 25%, simultaneamente foram avaliadas a temperatura e umidade do solo em três diferentes usos do solo. Os usos do solo estavam bem consolidados como pastagens (cerca de 11 anos) e reflorestamentos com espécies nativas e eucalipto com mais de 30 anos. Os resultados indicam a existência de variabilidade temporal a curto prazo significativa para emissão de CO_2, influxo de O_2, temperatura e umidade do solo. Enquanto, o quociente respiratório do solo (razão entre a emissão de CO_2 sobre o influxo de O_2) apontou maiores taxas de respiração do solo para áreas de reflorestamento com espécies nativas (0,59 mol mol^{-1}) e reflorestamento com eucalipto (0,52 mol mol^{-1}) quando comparada com a pastagem manejada (0,28 mol mol^{-1}). A análise de componentes principais indicou uma sobreposição entre as áreas de reflorestamentos, nesses usos foi atribuído a relação entre captura de oxigênio com a emissão. Conclui-se que o bom manejo empregado na pastagem do Cerrado brasileiro condicionou melhoria dos atributos do solo (MOS, SB e pH) e isso foi associado à baixa taxa de emissão de CO_2. Os usos com reflorestamentos foram agrupados e associados com a dinâmica respiratória do solo.

Palavras-chave: Respiração do solo; Pastagem; Reflorestamentos; ODS13.

CHAPTER III - EXPLORING THE SHORT-TERM TEMPORAL VARIABILITY OF CO_2 EMISSION AND SOIL O_2 INFLUX IN TROPICAL AGROECOSYSTEMS

ABSTRACT:
Soil metabolism or simply soil respiration is the process of gas exchange, that is, between O_2 consumption and CO_2 production in the soil. The objective was to investigate the short-term temporal variability of CO_2 emissions and O_2 influx from soil and relate them to tropical climate conditions and soil attributes. Thus, CO_2 emissions were evaluated using the LI-8100 portable system, while the O_2 influx from the soil was obtained by linear interpolation of the O_2 variation inside the evaluation chamber with the UV Flux 25% smart sensor, simultaneously evaluated soil temperature and humidity in three different land uses. Land uses were well consolidated, such as pastures (about 11 years old) and reforestation with native species and eucalyptus over 35 years old. The results indicate the existence of significant short-term temporal variability for CO_2 emission, O_2 influx, temperature and soil moisture. Meanwhile, the soil respiratory quotient (ratio between CO_2 emission over O_2 influx) showed higher soil respiration rates for reforestation areas with native species (0.59 mol mol^{-1}) and reforestation with eucalyptus (0. 52 mol mol^{-1}) when compared to managed pasture (0.28 mol mol^{-1}). The analysis of main components indicated an overlap between the reforestation areas, in these uses the relationship between oxygen capture and emission was attributed. It is concluded that the good management used in the Brazilian Cerrado pasture resulted in an improvement in soil attributes (SOM, SB and pH) and this was associated with a low CO_2 emission rate. Reforestation uses were grouped and associated with soil respiratory dynamics.

Key-Words: Soil respiration; Pasture; Reforestation; SDG13**.**

1 INTRODUÇÃO

O IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas) já aponta um aquecimento global da temperatura média do planeta da ordem de 1,1 ºC acima dos limites entre 1850 e 1900, no entanto, com aumentos maiores sobre a superfície da Terra (1,34 a 1,83 ºC) do que nos oceanos (0,68 a 1,01 ºC) (IPCC, 2023). Esse aquecimento é alavancado por ações antopogênicas, como as emissões oriundas de combustíveis fósseis, que impulsionam algumas mudanças nos ciclos biogeoquímicos planetários, em especial do carbono (Moss et al., 2010; IPCC, 2023).

Globalmente, estima-se que aproximadamente 12% desse carbono do solo está em áreas agrícolas (Cerri et al., 2023). No Brasil, as emissões de CO_2 associadas ao uso da terra e cobertura do solo entre 1990 e 2021 foram da ordem de 40,5 Gt CO_2 equivalente ano^{-1}, isso representa uma fração de 57% das emissões de CO_2 equivalente do Brasil para o mesmo período (SEEG, 2022; Canteral et al., 2023). O que reforça a importância de estudos que analisem os agroecossistemas em diferentes usos do solo.

Diante da problemática, a questão climática é o assunto que mais preocupa as principais políticas socioambientais de forma global, uma vez que, os impactos da mudança do clima é experienciado com mais ou menos intensidade em todos os países, trazendo o tema para o centro das discussões nas esferas política, científica e socioambiental. Esse tema é também foi proprosto na agenda 2030, o qual coloca a questão climática dentro dos objetivos para o desenvolvimento sustentável da Organização da Nações Unidas.

Uma forma de contribuir para o objetivo de desenvolvimento susténtavel número 13, que trata das ações contra a mudança global do clima é a mitigação de gases de efeito estufa. Essa mitigação pode acontecer quando uma parte do carbono emitido é incorporado ao ecossistema solo, tal processo é altamente favorecido pela fotossíntese (Luo e Zhou, 2006). Desta forma, a agricultura que prioriza a conservação do carbono no solo é uma aliada para a mitigação das mudanças do clima (Moitinho et al., 2013). O que demostra a necessidade de estudos que avancem no tema da respiração do solo e no entendimento desse processo, conforme destaca o IPCC (2023).

A respiração do pode ser entendida como o consumo de oxigênio e a produção de dióxido de carbono oriundo da respiração celular de microorganismos, raízes das

plantas, decomposição microbiológica e da fauna edáfica (Luo e Zhou, 2006). Esse fenômeno é conhecido como metabolismo do solo. Sendo assim, as mudanças nas emissões de CO_2 ao longo do tempo estão intimamente relacionadas com a temperatura e umidade do solo, bem como com as condições climáticas que influenciam diretamente essas variáveis (Lal, 2009; Lal, 2022).

Existem poucas pesquisas sobre o influxo de oxigênio do solo com essa perspectiva para o metabolismo do solo (De Lucena et al., 2023), mas alguns estudos realizados em solos tropicais demostram a importância do O_2 na dinâmica respiratória do solo, em especial no que se refere ao ciclo global do carbono (Almeida et al., 2018; Almeida et al., 2019; Vicentini et al., 2019). Portanto, melhorar a compreensão das mudanças temporais no influxo de O_2 e na emissão de CO_2 é uma estratégia importantes na promoção de manejos agrícolas que visam a sustentabilidade dos solos.

Considerando apenas o ecossistema terrestre, o solo é o maior reservatório global de carbono (Jensen et al., 2018). Logo, implicações ao manejo do solo, a cobertura vegetal, bem como, as mudanças do uso solo impõem diferentes dinâmicas nas trocas gasosas no sistema solo-atmosfera (Lisboa et al., 2012; De Lucena et al., 2018). Essas trocas gasosas são o tema deste manuscrito e envolvem principalmente a relação entre o consumo de oxigênio e a produção de dióxido de carbono.

Conforme a síntese do sexto relatório de avaliação (AR 6) do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) os reflorestamentos com maturidade elevada, em climax[3], tem um potencial mais baixo de armazenamento de carbono (< 1Gt CO_2 ano^{-1})) em comparação com os sistemas que envolvem culturas agrícolas e/ou da pecuária, que apresentam potencial mais alto (> 3 Gt CO_2 ano^{-1}) (IPCC, 2023).

Diante deste contexto, as pastagens brasileiras quando bem manejadas proporciona uma série de benefícios ao solo, elevando o grau de sustentabilidade desse agroecossistema (Dias-Filho, 2017). Esses benefícios são desde socioambientais, econômicos e produtivos, pois pode favorecer o acúmolo de matéria orgânica, a presença da cobertura vegetal está associada a diminuição do impacto das gotículas de chuvas sobre o solo, reduzindo o processo de erosão, o que contribui para menores perdas de carbono do solo (Guarda e Campos, 2014). Por outro lado,

[3] Climax, em ecologia, refere-se à comunidade estável, adaptada às condições ambientais específicas da região, e na qual a biomassa e a biodiversidade permanecem constantes (Lima et al., 2016).

existem cerca de 159 milhões de hectares de pastagens degradadas no Brasil (Parente et al., 2019; Campos et al., 2022), reforçando a necessidade de estudos com enfoque na adoção de estratégias de transição e de manejo para sustentabilidade dos solos nesses agroecossistemas.

O cultivo de pastagem é uma boa estratégia agrícola, pois apresenta boa resposta ao manejo e as condições climáticas favoráveis ao crescimento vegetativo, esse desenvolvimento exige boas condições na fertilidade do solo e ativação radicular para o transporte de água e nutrientes do solo para planta (Zimmer et al., 2012). A ativação dessas raízes requer alta demanda de oxigênio para respiração das raízes (Huang et al., 2006), por outro lado, florestas que atingiram o climax mantém faixa de estável de crescimento, não sendo altamente demandates de água, nutrientes ou oxigênio do solo pois desenvolve mecanismos de reciclagem da matéria orgânica do solo e forte interrelação com microbiota edáfica com a ativação das raízes (Primavesi, 2009).

É notório que mudanças no uso da terra impõem diferentes condições ao ecossitema solo, e essas condições quando associadas ao clima tropical e aos atributos físicos e químicos do solo estabelecem novo modelo na dinâmica do carbono nos agroecossistemas. A medida que esses agroecossistemas são consolidados na natureza é necessário entender as conexões que eles estabelebem na respiração edáfica na promoção de saúde do solo, para tal, é importante entender os padrões temporais da respiração nesses solos, fortalecendo assim a rede global para tornar viável os objetivos de desenvolvimento susténtavel.

A hipótese levantada nesse estudo é que embora exista uma respiração do solo associada a respiração celular, a investigação dessa respiração em diferentes agroecossistemas, a curto prazo é um alternativa para entender a dinâmicas imposta pelos diferentes usos da terra e assim propor melhorias que contribuam desde uma escala regional a uma escala global e somar os esforços nas ações mitigatórias ao aumento da concentração de CO_2 atmosférico e mudanças do clima. Esses estudos dão apoio científico para a formação de políticas públicas globais ao combate e mitigação das mudanças climáticas.

Diante do exposto, o objetivo foi investigar a variabilidade temporal de curto prazo das emissões de CO_2, do influxo de O_2, da temperatura e umidade do solo e relacionar com os atributos do solo sob usos de pastagem, eucalipto e reflorestamento de espécies nativas do Cerrado, em condições climáticas tropicais.

2 MATERIAL E METÓDOS

2.1 Localização da área de estudo

As áreas utilizadas nesse estudo estão localizadas a cidade de Selvíria, Mato Grosso do Sul, Brasil. Município localizado á margem direita do Rio Paraná sob coordenadas geográficas 20º 20’ 58’’ de latitude sul e 51º 23’ 45’’ longitude oeste com uma altitude de 331 metros. As áreas de eucalipto (*Eucalyptus camaldulensis*) e Reflorestamento com Espécies Nativas (REN) são pertencentes a Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da Faculdade de Engenharia (FIES) da Universidade Estadual Paulista (Unesp) Campus de Ilha Solteira.

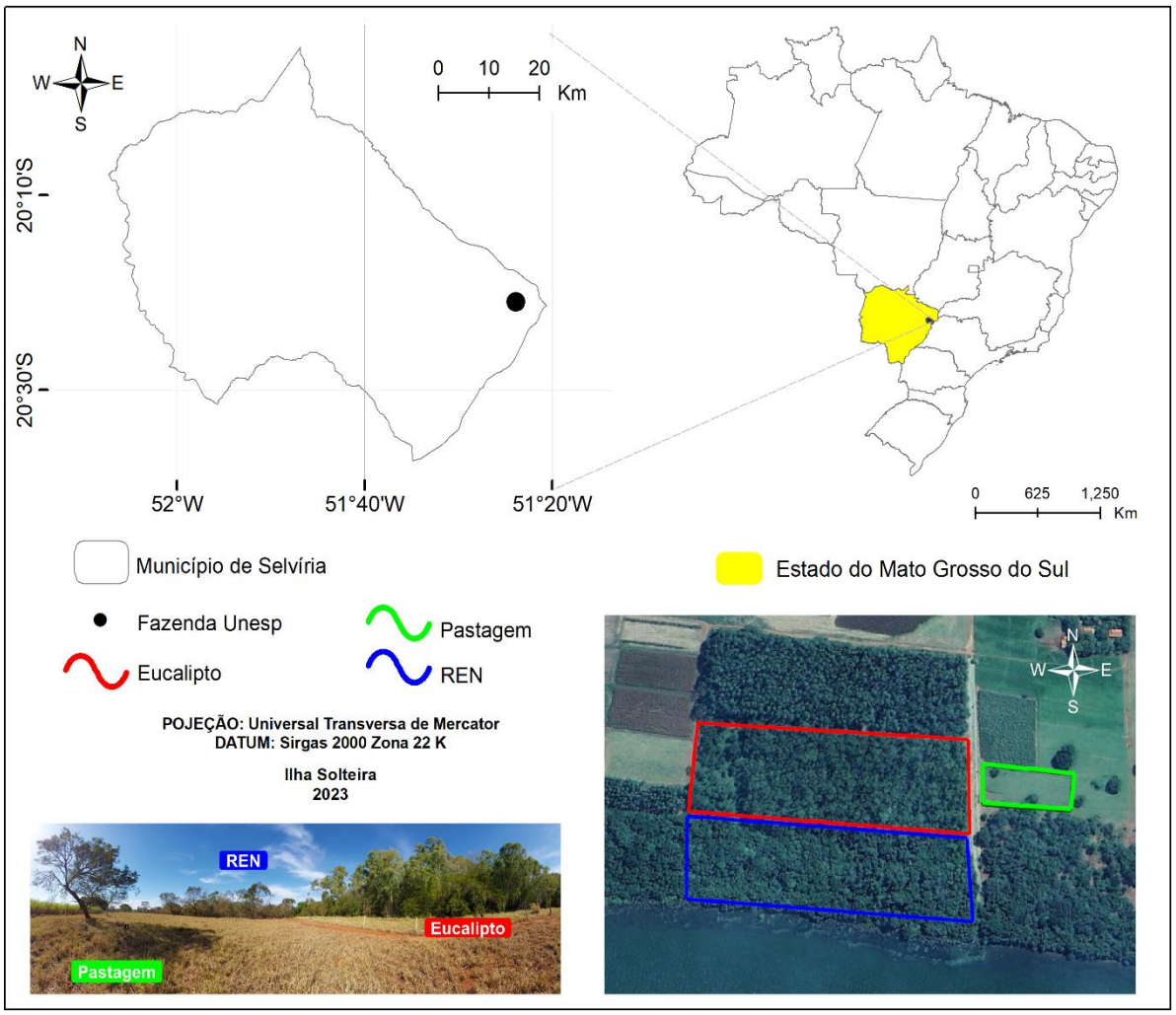


Figura 1. Localização geográfica do município e as áreas de estudos. Elaborado pelo autor.

Enquanto, a área adjacente com pastagem de braquiária (*Urochloa decumbens*) é uma área privada que foi cedida para realização do experimento. Os locais foram selecionados para avaliação, pois estão numa mesma topossequência, além de representar usos típicos para a região. Levando em consideração o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), o solo da região foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico argiloso, com horizonte A moderado (Santos et al., 2018. Apresentando um declive de 0,025 mm^{-1}, o relevo foi caracterizado como moderamente plano e ondulado (Santos et al., 2018).

O clima local foi classificado como C1dAa' pelo sistema de classificação de Thorrnthwaite (1948), adotou-se esta classificação pois é mais sensível aos volumes de chuvas, temperatura e relevo para a região (Rolim et al., 2007), indicando uma região sub-úmida seca, sem excedentes hidrícos, com temperatura média anual em torno dos 24 ºC (Rolim et al., 2007) e precipitação média anual de 1300 mm, com período de chuvas occorrendo entre os meses de novembro a abril e o período mais seco de maio a outubro (Ramos, 2018).

Os dados climáticos durante a realização do experimento foram obtidos da Estação Agrometereológica da Unesp, unidade Ilha Solteira, São Paulo, Brasil com uma altitude: 337 metros. Na figura 2, são apresentadas as temperaturas do ar (média, máxima e mímina, respectivamente, Tméd, Tmáx e Tmín) em ºC, bem como, a Evapotranspiração (ETo) calculada pelo método Penman-Monteith proposto pela FAO (Allen et al., 1998) (Figura 2a). A umidade relativa média do ar (em %) junto com a Radiação Fotossinteticamente Ativa (RFA) expressa em µmol m^{-2} (Figura 2b) e a Pressão Atmosférica (P_Atm) em Quilo Pascal (KPa) e a Radiação Solar Global (RSG) em MJ m^{-2} dia^{-1} (Figura 2c) para o período durante a realização do experimento.

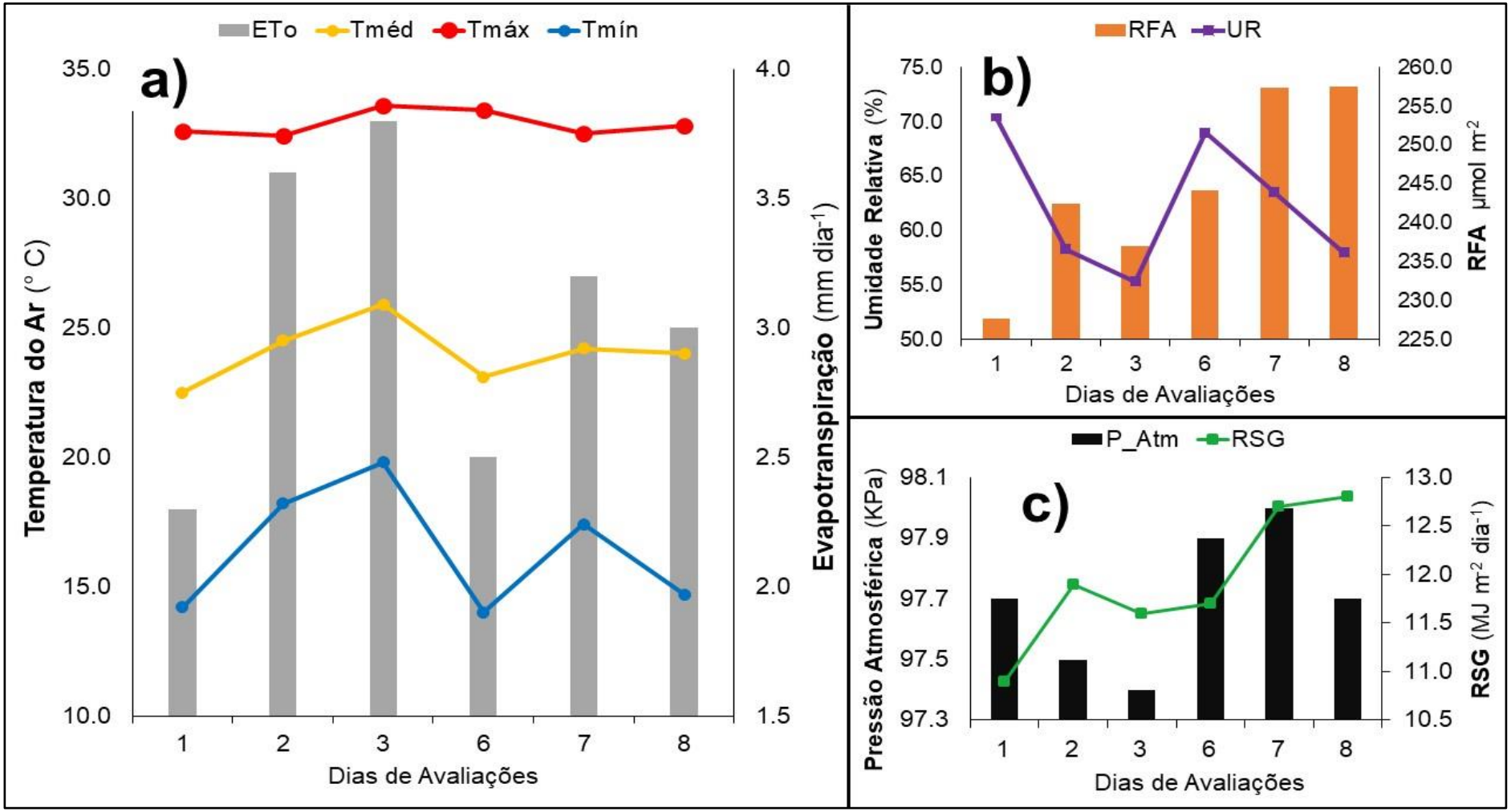


Figura 2. Variáveis climáticas ao longo do tempo de realização do experimento. Em a) Temperatura do ar (em º C) e Evapotranspiração (ETo) pelo método Penman-Monteith (mm dia^{-1}); b) Umidade relativa do ar (UR) (em %) e Radiação Fotossinteticamente Ativa (RFA) (µmol m^{-2}); c) Pressão atmosférica (P_Atm) KPa) e Radiação Solar Global (RSG) (MJ m^{-2} dia^{-1}). Dados obtidos da Estação Climática da Unesp Ilha Solteira. Elaborado pelo autor.

2.2 Descrição dos usos do solo

O termo reflorestamento (ou áreas reflorestadas) foi adotado seguindo a recomendação de Lima et al. (2016) que sugere a utilização desse termo para designação de áreas anteriormente desmatadas em que fez-se uso do povoamento florestal (plantio de florestas) de espécies nativas ou exóticas (como eucalipto) para recompor a paisagem. Esses locais foram selecionados para avaliação, pois estão numa mesma topossequência e representa usos típicos para a região.

As áreas denominadas de reflorestamentos estavam cobertas por sua vegetação nativa até 1970, porém, em 1978 foram desmatadas e reconduzidas com plantio de culturas anuais, como, milho (*Zea mays*), soja (*Glycine max*), algodão (*Gossypium hirsutum*) e adubos verdes até o ano 1986. (Cavenage et al., 1999; Souza e Alves, 2003). Contudo, em 1986 foram convertidas em diferentes usos. O uso com reflorestamento com eucalipto que foi implantado em abril de 1986, e é composto por uma população de *E. camaldulensis* (45.500 m^2), com espaçamento de 4 × 4 metros.

O uso denominado de reflorestamento com espécies nativas (REN), é composto por espécies nativas da região do Cerrado e foi instalado em março de 1986 adotando o espaçamento de 3 × 2 metros e as espécies foram distribuidas de forma casualizada. As espécies usadas no reflorestamento com espécies nativas já foram descritas por Vicentini et al. (2019).

A área de pastagem estava degradada e foi reformada em 2007 utilizando aração com arado de discos mais gradagem para nivelamento. Esta área anteriormente era constituída po pastagem de braquiária (*U. decumbens*) e foi reformada novamente com braquiária (*U. decumbens*). Em termos de adubação, tem sido feita aplicação de fertilizantes contendo N-P-K anualmente (normalmente de 200 kg da formulação 08-18-16) e calagem a cada quatro anos de acordo com a análise de solo.

Tomando com base a classificação de pastagens de Parente et al. (2019) que está disponível nos Atlas das Pastagens (https://atlasdaspastagens.ufg.br/map), a área de pastagem usada no estudo foi classificada como pastagem manejada. A classificação porposta por Parente et al. (2019) é baseda nas imagens do satélite Landsat apoiando-se nos métodos de aprendizado de máquinas usando a platarforma do Google Earth Engine, o qual classificou as pastagens brasileira em três níveis, e

são eles: severa, intermédiário e manejada, os dois primeiros nivéis são relacionados ao estado de degradação das pastagens (Campos et al., 2022).

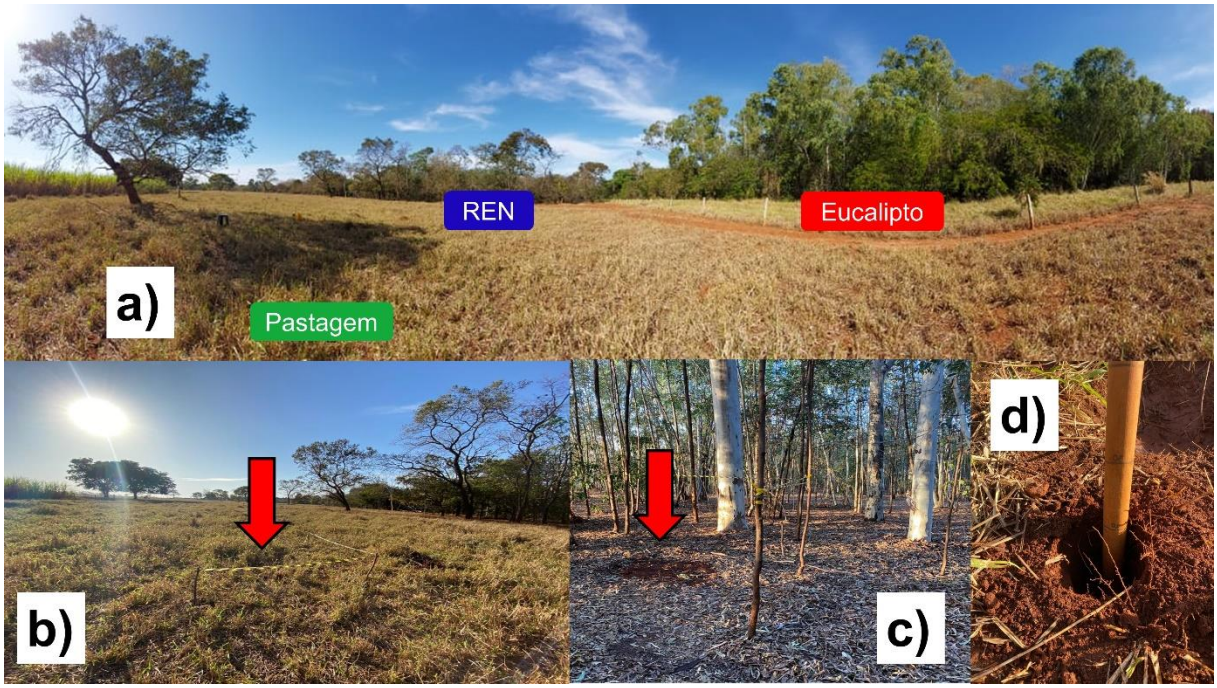


Figura 3. Imagens da área. Em a) foto panorâmica dos diferentes usos. Sinalização e disposição das estacas e os colares para as leituras da emissão de CO_2, influxo de O_2, temperatura e umidade do solo. A seta vermelha indica o ponto que aconteceu a coleta de solo nos usos de: b) Pastagem; c) Eucalipto. Em d) coleta do solo para determinação dos atributos do solo. REN é reflorestamento com espécies nativas. Elaborado pelo autor.

2.3 Emissão de CO_2, temperatura e umidade do solo

As leituras da emissão de CO_2 (FCO2) foram registradas nos dias 13, 14, 15, 18, 19 e 20 de julho de 2022. Assim, foi atribuído do primeiro (13/07/2022) ao oitavo (20/07/2022) dia de estudo que corresponde aos dias de avaliações. Nas áreas foram distribuídos 6 pontos aleatórios, em cada ponto, foram alocados três colares de PVC medindo 0,05 m de altura e diâmetro de 0,10 m. Ao longo da área, foram alocados 18 colares.

As medidas da emissão de CO_2 do solo foram realizadas por meio de um sistema portátil Li-8100 denominado de Sistema Automatizado de Fluxo de CO_2 do Solo (Figura 4a) de fabricação da LI-COR Biosciences®, Nebraska, EUA. O sistema Li-8100 é acoplado a uma câmara modelo 8100-102 (Figura 4a) que fornece medições sobre a emissão de CO_2 do solo.

Essa câmara apresenta volume interno de 854,2 cm^3 com área de contato circular de 83,7 cm^2. Esse sistema verifica as mudanças nas concentrações de CO_2, usando o sensor IRGA (*Infrared Gas Analyzer*), por meio da espectroscopia de absorção óptica na região espectral do infravermelho próximo (*Near Infrared* - NIR). A câmara foi colocada sobre colares de PVC previamente foram inseridos no solo (24 horas antes) em cada ponto amostral a uma profundidade de 0,03 m. Para determinação da emissão de CO_2 do solo o padrão de leitura adotado foi de 90 segundos com *dead band* de 20 segundos. O resultado da variação do dióxido de carbono sobre o tempo no interior da câmera é dado em µmol m^{-2} s^{-1}.

A umidade do solo foi determinada por meio de um equipamento de TDR (Time Domain Reflectometry) (Figura 4b) um sensor portátil de umidade do solo modelo HidroSense II (HS2) fabricado por Campbell Scientific® que avaliou a umidade disponível do solo em porcentagem (volume/volume) com uso de uma dupla haste de 0,12 m. A temperatura do solo foi obtida por meio de um termômetro de infravermelho modelo GM320 posicionado sob no solo no local do colar de PVC que foram previamente instalados. A temperatura do solo obtida foi apresentada em graus Celsius.

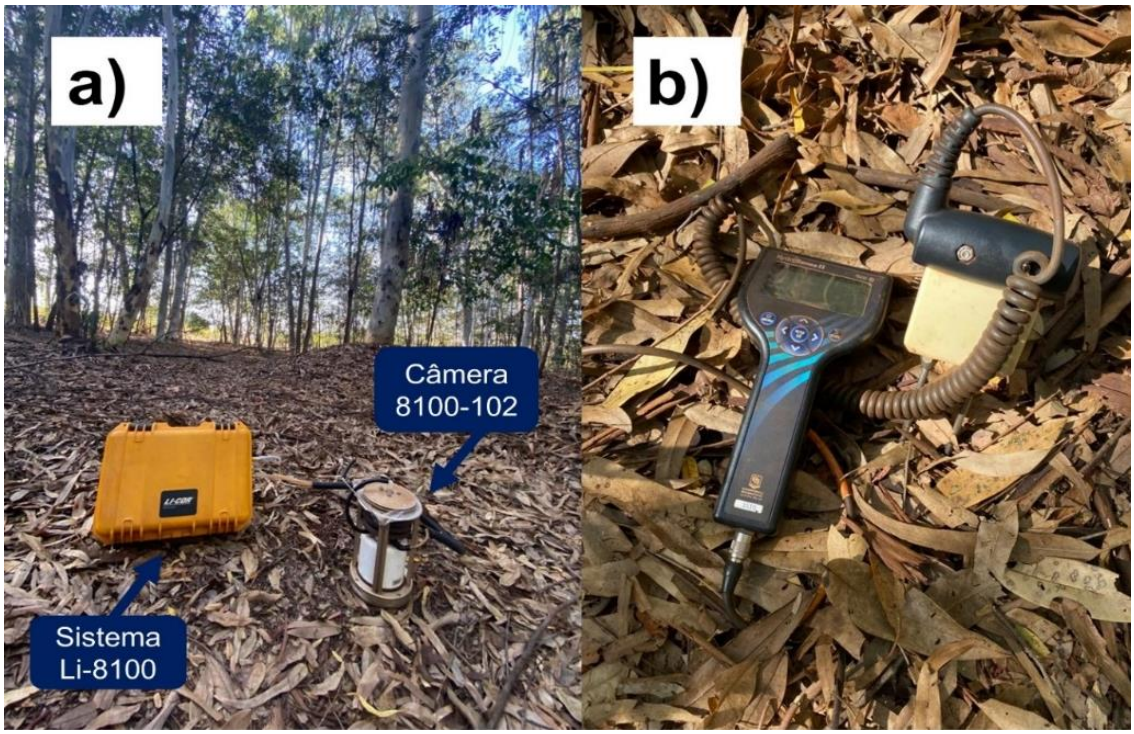


Figura 4. Equipamentos utilizados. Em a) Sistema portátil de análise de CO_2 do solo modelo Li-8100. b) Sensor portátil de umidade do solo modelo HS2.

2.4 Influxo de O_2 do solo

A determinação do influxo de O_2 do solo (iO2) foi realizada a partir de uma câmera de PVC acomplada a um Sensor Inteligente de Oxigênio UV Flux 25% modelo CM-42951 fabricado por CO2 METER®. Esse sistema é formado por um sensor portátil que mede a variação do oxigênio no interior da câmera usando o princípio da fluorescência com a luz ultravioleta (UV). Esse sistema fornece baixo desvio e sensibilidade cruzada. Assim, a câmera com o sensor foi acoplado a um computador portátil (laptop) via porta USB (*Universal Serial Bus*) e conectado por meio do software GasLab® para registro dos dados em tempo real (Figura 5a).

O influxo de O_2 do solo (Equação 1) foi calculado por interpolação linear dos valores de concentração do oxigênio no interior da câmera durante 300 segundos (5 minutos) de amostragem e considerando a pressão atmosférica, a temperatura absoluta do ar em Kelvin e o volume da câmera. Obtendo-se o decaimento de O_2 no interior da câmera durante o período amostrado (Figura 5b). O influxo de O_2 do solo obtido via equação 1 e foi apresentado em mg O_2 m^{-2} s^{-1}.

$$iO_2 = \frac{dO_2\ PM}{dt\ RT}\ H \qquad \text{Equação 1}$$

onde, dO_2/dt é a quantidade de O_2 (ppm) medida em função do tempo t (s); P é a pressão atmosférica (Pa); M é a massa molar do O_2 (g m^{-3}); R é a constante universal dos gases (8,314462 J mol^{-1} K^{-1}); T é a temperatura absoluta (K) e H = V/A, para volume (V) = 6,6 x 10^{-6} m^3 e área do colar (A) = 0,008 m^2 acima do solo. (Jassal et al., 2012; Giacomo et al., 2014; Almeida et al., 2018; Vicentini et al., 2019; De Lucena et al., 2023).

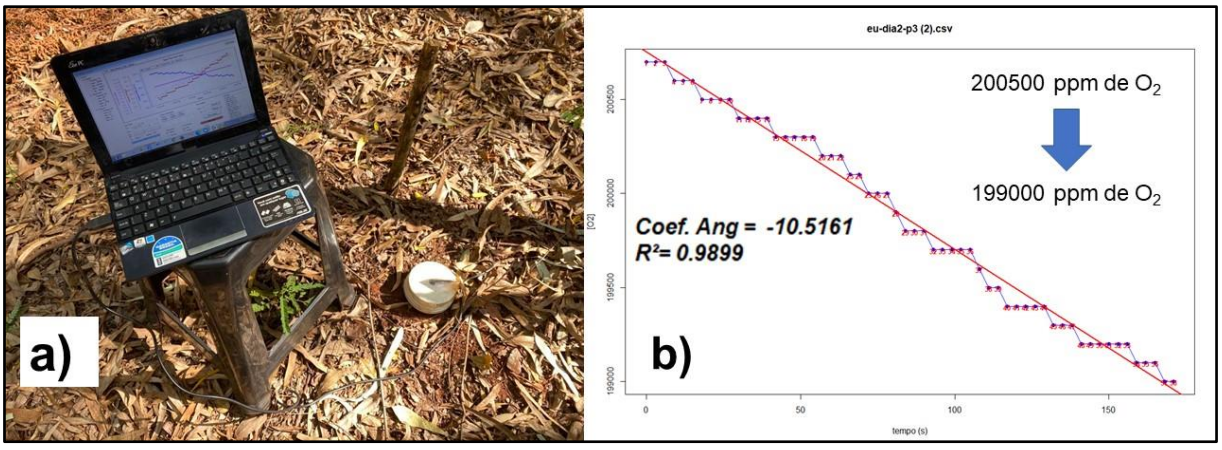


Figura 5. Equipamentos para determinação do influxo de O_2. Em a) sensor inteligente de oxigênio com câmera acoplada ao laptop. b) Regressão linear do decaimento do O_2 no interior da câmera

2.5 Cálculos do Quociente Respiratório do Solo

O quociente respiratório do solo (QRS) foi obtido pela razão entre a emissão de CO_2 solo e o influxo de O_2, ambos expressos em mol. Os valores do quociente respiratório normalmente se apresentam entre zero e um, mas podem acontecer valores superiores a um (Angert et al., 2015). Assim, os valores do quociente respiratório do solo foram calculados conforme proposto por Wolińska et al. (2011) e foi apresentado na Equação 2, tais valores foram expressos em mol mol^{-1}.

$$QRS = \frac{FCO_2}{iO_2} \qquad \text{Equação 2}$$

Em que, FCO_2 é a emissão de CO_2 em mol e iO_2 é o influxo de oxigênio em mol.

2.6 Caracterização dos atributos do solo nos agroecossistemas

Ao longo da área foram coletados seis pontos (n=6) para realização de análises de caracterização dos atributos de fertilidade e física do solo para a camada 0-0,40 m. As amostras deformadas foram encaminhadas para o laboratório de fertilidade do solo da Unesp-Ilha Solteira para realização de análises de rotina seguindo os procedimentos proposto por Raij et al., (2001). Enquanto, as amostras indeformadas para determinação dos atributos físicos do solo foram encaminhadas a Esalq/USP onde seguiu-se as recomendações propostas no Manual de Métodos de Análise de Solo (Teixeira et al., 2017). Esses dados foram submetidos a análise de variância[4] e teste de comparação de médias de Tukey a 5% de probabilidade (Tukey, 1949; Mendiburu, 2021).

2.7 Análise dos dados

2.7.1 Análise da variabilidade temporal da emissão de CO_2, influxo de O_2, temperatura e umidade do solo e quociente respiratório do solo

A variabilidade temporal foi determinada usando a análise de variância (ANOVA) para experimentos com medidas repetidas no tempo (Littell et al.,1998), assim, foram calculadas a médias geral e diárias para a emissão de CO_2, o influxo de

[4] A estatística descritiva contendo todas camadas está disponível para consulta nos apêndices B e C.

O_2, a temperatura do solo, a umidade do solo e para o quociente respiratório do solo para cada uso do solo.

Para realização da ANOVA foram aplicados os pressupostos considerando que os resíduos do modelo são normalmente distribuidos usou-se o teste de normalidade de Shapiro-Wilk ($p > 0,05$) (Shapiro e Wilk, 1965) e testada a hipótese da homocedasticidade (igualdade entre as variâncias), usando-se o teste de Bartlett ($p > 0,05$) (Bartlett, 1937). A hipótese nula de ambos os testes foram atendidas, isto é, existe normalidade dos resíduos e homogenidade nas variâncias.

Essa análise permite comparações múltiplas entre diferentes usos do solo ao d0eterminar a variabilidade ao longo do tempo, assim os resultados representam informações fidedignas da comparação entre os diferentes usos (Cecon et al., 2008), então, para facilitar o entendimento e visualização dessas comparações, os dados foram apresentados na forma de gráficos. Utilizou-se o teste de comparação de médias de Tukey (Tukey, 1949). O nível de significância adotado foi de 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

2.7.2 Análise dos atributos do solo sob diferentes usos

As diferenças estatísticas entre os atributos do solo sob os diferentes agroecossistemas foi verificada para a camada de 0,0 a 0,40 metros. Esses dados foram submetidos ao teste de comparação múltiplas de Tukey (Tukey, 1949). Método de comparação de médias que é considerado o mais rigoroso, pois consiste na diferença mínima significativa da comparação de médias duas a duas (Canteri et al., 2001).

As variáveis da fertilidade do solo selecionadas para essa análise foram, matéria orgânica do solo (MOS), potencial hidrogeniônico (pH) e soma de bases (SB), enquanto, as variáveis físicas selecionadas, foram, a densidade do solo (DS), macro e microporosidade do solo. Essas variáveis foram selecionadas por serem frequentemente relacionadas a dinâmica da respiração do solo (La Scala Jr et al., 2000; Moitinho et al., 2013; Silva et al., 2019a).

2.7.3 Análise de componentes principais com agrupamentos

A análise de componentes principais (ACP) com agrupamentos é uma técnica de análise multivariada que permite verificar as similaridades e conexões, observando o comportamento das variáveis e tratamentos. Esse método tem como princípio a

redução da complexibilidade ao explicar a estrutura de variância e covariância de um vetor aleatório, através de combinações lineares das variáveis originais. Assim, a ACP ajuda na identificação de padrões, o que pode contribuir na explicação das conexões estabelecidas pelos dados (Schneider, 2018).

Então, as variáveis selecionadas para realização da análise, foram: emissão de CO_2 do solo (FCO2), influxo de O_2 do solo (iO2), umidade do solo (Usolo), temperatura do solo (Tsolo), matéria orgânica do solo (MOS), potencial hidrogeniônico (pH), soma de bases (SB), Macroporosidade do solo (Macro) e Microporosidade do solo (Micro), densidade do solo (DS), temperatura média do ar (Temp), umidade relativa do ar média (UR), radiação fotossinticamente ativa (RFA), pressão atmosférica (Patm) e evapotranspiração de referência (ETo). Foram selecionados as componentes principais com autovetores maior ou igual a um, obedecendo o critério definido por Kaiser (1958). Enquanto, foi considerado para discussões as variáveis que possuem o poder de explicação (autovalor), em módulo, igual ou superior a 0,50.

Todas as análises estatísticas foram performadas em linguagem R (R Core Team, 2023). Com o auxílio dos pacotes: *ExpDes.pt* (Ferreira et al., 2021); *factoextra* (Kassambara e Mundt, 2020); *readxl* (Wickham e Bryan, 2022); *tidyverse* (Wickham et al., 2019); *rstatix* (Kassambara, 2021); *patchwork* (Pedersen, 2020); *nortest* (Gross e Ligges, 2015); *lawstat* (Gastwirth et al., 2020); *agricolae* (Mendiburu, 2021) e *ggplot2* (Wickham, 2016).

3. RESULTADOS

3.1 Variabilidade temporal da emissão de CO_2, influxo de O_2, temperatura e umidade do solo

A análise de variância de medidas repetidas no tempo para emissão de CO_2 (FCO_2) apresentou significância (Teste F= 2,1379; p<0,0001) para a interação entre os diferentes usos do solo (pastagem, eucalipto e reflorestamento com espécies nativas - REN) e o tempo (dias de avaliações). Portanto, existe uma variabilidade temporal a curto prazo nas taxas de emissões de CO_2 quando analisados os diferentes usos do solo (Figura 6). Em relação aos dados médios, a área de REN apresentou a maior emissão de CO_2 média (3,95 µmol m^{-2} s^{-1}) quando comparada a área de pastagem (3,36 µmol m^{-2} s^{-1}) (Figura 6). Enquanto, as emissões de CO_2 na aréa de eucalipto (3,69 µmol m^{-2} s^{-1}) não diferiu estatisticamente (p < 0,05) das áreas de pastagem e de REN.

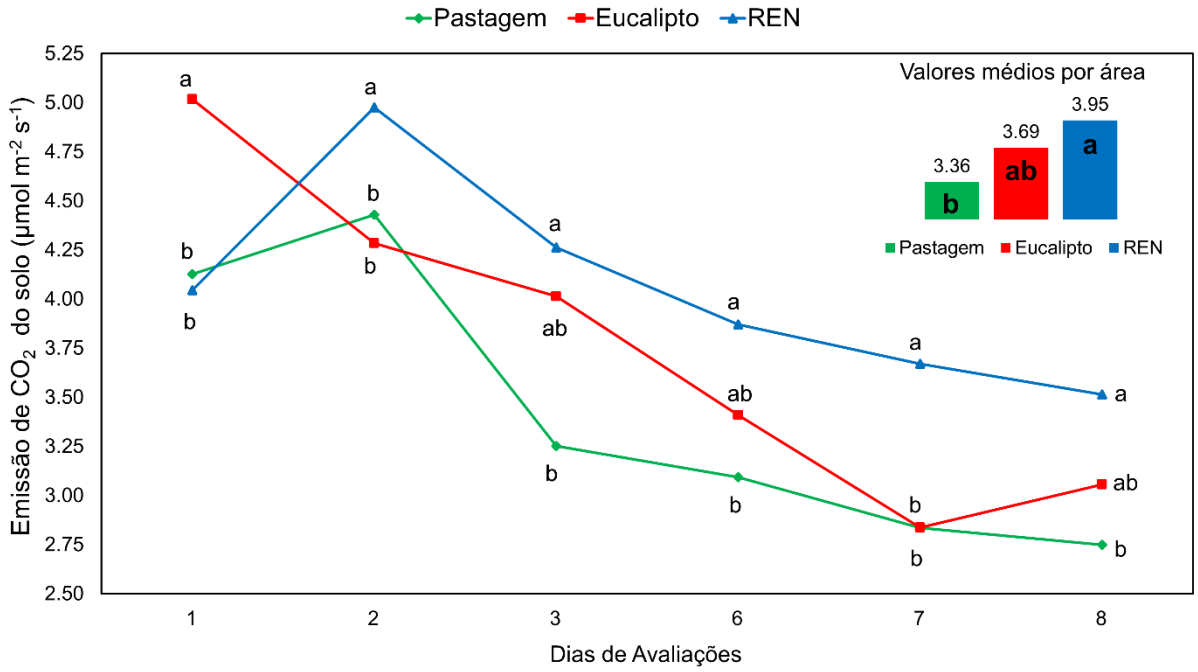


Figura 6. Emissão de CO_2 do solo (FCO2) ao longo do tempo (gráfico de linhas). Emissão CO_2 médio por área (gráfico de colunas). Ambos expressos em µmol m^{-2} s^{-1}. As letras indicam diferenças significativas entre usos do solo para o mesmo dia. Foi aplicado o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

No primeiro dia de avaliação, o solo sob a área de eucalipto apresentou maior emissão de CO_2 (5,02 µmol m^{-2} s^{-1}), seguidas das emissões de CO_2 das pastagens (4,13 µmol m^{-2} s^{-1}) e do REN (4,05 µmol m^{-2} s^{-1}) essas duas últimas não diferiram entre si, mas apresentaram diferenças quando comparadas com a emissão do eucalipto no primeiro dia para o teste de Tukey (p< 0,05). Quanto ao segundo dia de avaliação, a área de REN teve maior emissão de CO_2 e significativa quando comparada com

demais usos do solos (4,98 µmol m^{-2} s^{-1}) ($p < 0,05$), com acréscimo de 23% quando comprada com o primeiro dia nessa área. No entanto, não verificou-se diferenças significativas nas emissões de CO_2 entre a pastagem (4,43 µmol m^{-2} s^{-1}) e o eucalipto (4,28 µmol m^{-2} s^{-1}) no segundo dia ($p > 0,05$).

Ao longo do tempo a emissão de CO_2 do REN apresentou uma queda, contudo, manteve superior e significativa quando comparada com a pastagem para o teste de Tukey ($p< 0,05$). Entretanto, no terceiro, sexto e oitavo dia a emissão da área de eucalipto não diferiu estatíscamente quando comparadas as áreas de pastagem e REN. Enquanto, no sétimo dia de avaliação a emissão da área de eucalipto foi estatisticamente semelhante ao pasto e diferiu estatisticamente da área de REN ($p < 0,05$).

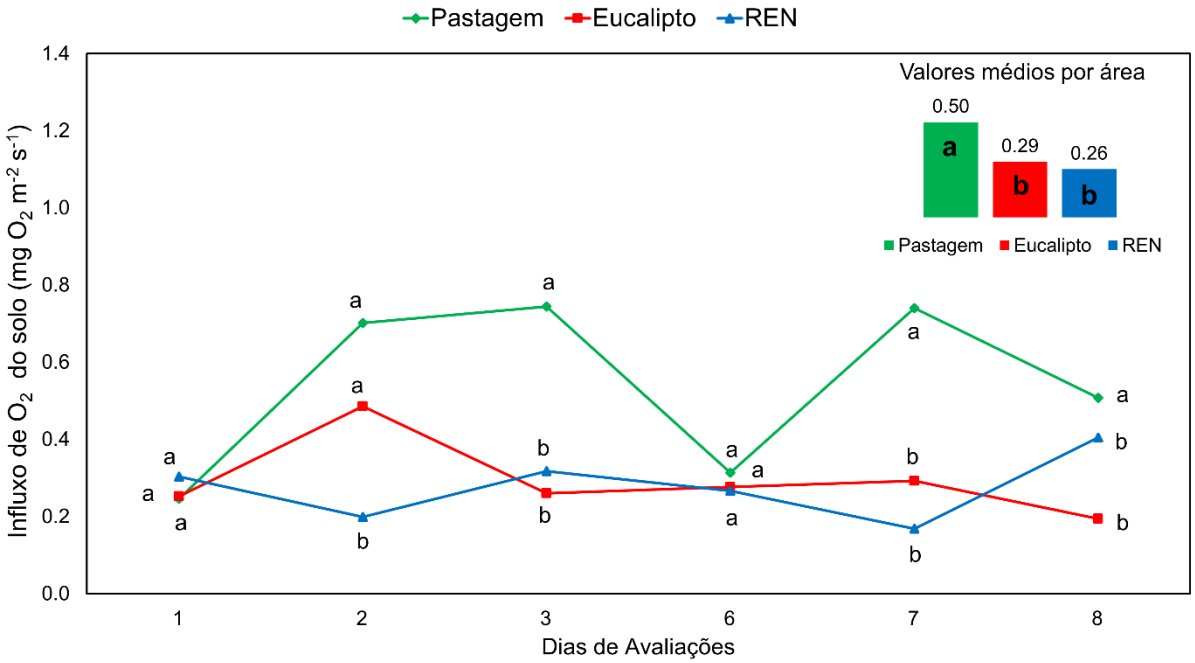


Figura 7. Influxo de O_2 do solo (iO2) ao longo do tempo (gráfico de linhas) e influxo de O_2 médio por área (gráfico de colunas). Ambos expressos em mg O_2 m^{-2} s^{-1}. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre os diferentes usos do solo para o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O influxo de oxigênio do solo (iO2) apresentou uma variabilidade temporal a curto prazo (teste $F= 6,8724$; $p< 0,001$) para o modelo de medidas repetidas no tempo, considerando a interação entre as áreas (diferentes usos do solo) e os dias de avaliações (fator tempo). Em relação ao influxo de O_2 nas áreas, a pastagem teve o maior influxo de O_2, e diferiu estatisticamente das áreas de REN e eucalipto ($p < 0,05$), enquanto, entre eucalipto e REN não foram observadas diferenças significativas entre si para o teste de Tukey ($p> 0,05$) (Figura 7).

No primeiro e sexto dia de avaliações não foram registradas diferenças estatísticas nas taxas de influxo de oxigênio do solo entre as áreas estudadas ($p < 0,05$). No segundo dia, o influxo de O_2 do solo nas áreas de pastagem (0,7 mg O_2 m^{-2} s^{-1}) e de eucalipto (0,5 mg O_2 m^{-2} s^{-1}) não diferiram entre si, mas apresentaram diferenças significativas quando comparadas a área de REN (0,2 mg O_2 m^{-2} s^{-1}). No terceiro, sétimo e oitavo dias o influxo de O_2 na pastagem (0,7; 0,7 e 0,5 mg de O_2 m^{-2} s^{-1}, respectivamente) foi superior as áreas de REN e eucalipto.

A análise de variância para medidas repetidas no tempo indicou diferenças significativas para a interação dos sistemas e dias avaliados em função da umidade do solo (Usolo), portanto existe uma variabilidade temporal a curto prazo para essa variável que responde ao manejo do solo (Teste $F = 1,913$; $p < 0,05$). A área de REN apresenta maior umidade média do solo com 6,2% (v/v), seguida da área de pastagem com 4,5% (v/v) e de eucalipto 2,4% (v/v) (Figura 8).

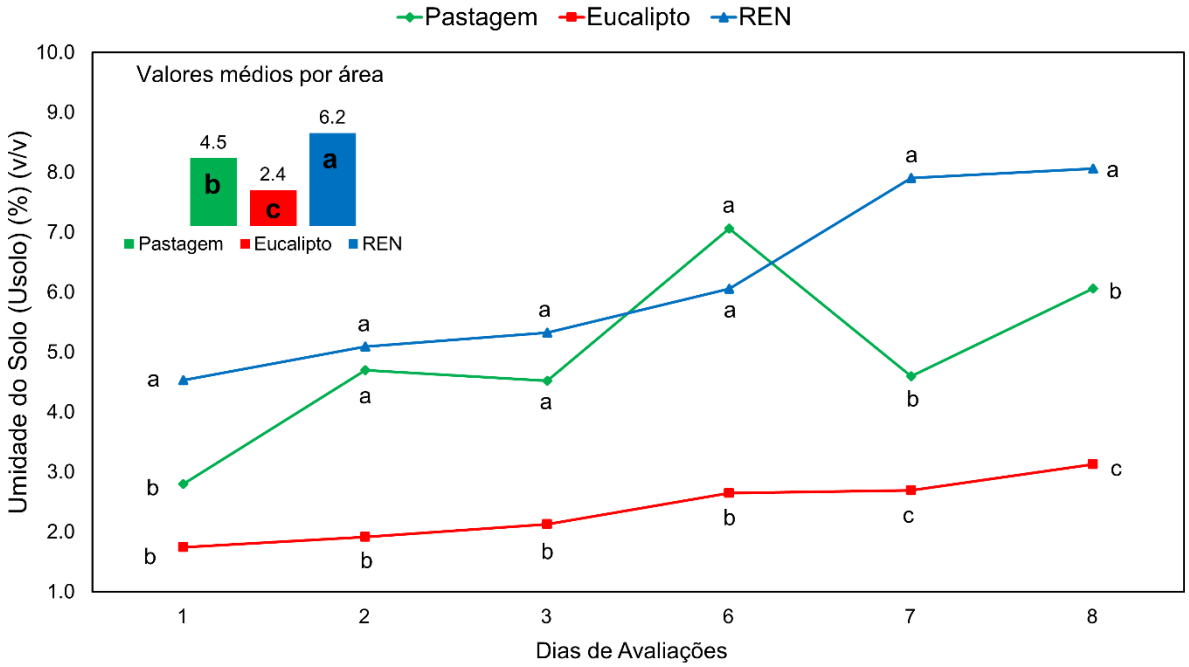


Figura 8. Umidade do solo (Usolo) ao longo do tempo (gráfico de linhas) e umidade do solo média por área (gráfico de colunas). Ambos expressos em porcentagem (volume/volume). Letras diferentes indicam diferenças significativas entre os diferentes usos do solo para o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

No primeiro dia, o maior teor de umidade do solo foi registrado na área com REN, que diferiu das áreas de eucalipto e pastagem. No segundo, terceiro e sexto dia a umidade do solo na pastagem se manteve semelhante estatisticamente a área de REN e ambas diferiram da área de eucalipto. Durante todos os dias avaliados o solo sob eucalipto registrou os menores teores de umidade. No sétimo e oitavo dia o teor de umidade do solo nas áreas apresentaram diferenças estatísticas ($p < 0,05$). O REN

registrou 7,9 e 8,1% (v/v), respectivamente. Enquanto, a pastagem registrou 4,6 e 6,1% (v/v), respectivamente.

Para a temperatura do solo (Tsolo) os resultados também indicam a existência de varibilidade temporal (Teste F = 44,976; p< 0,001). Na Figura 9 foram apresentadas as comparações para interação ao longo do tempo, entre os usos do solo e os valores médios por área, todas comparações são para o teste de Tukey a 5% de probabilidade. O solo sob pastagem apresentou maior temperatura média (26,5 ºC) quando comparado as demais áreas (p < 0,05). As áreas de eucalipto e de REN são estatisticamente semelhantes entre si (p > 0,05) com, respectivamente, 22,0 e 21,1 ºC. No primeiro dia, o REN e eucalipto apresentaram médias semelhantes, equivalestes a 22 ºC de temperatura do solo, porém diferiram da pastagem (16,9 ºC) (p < 0,05).

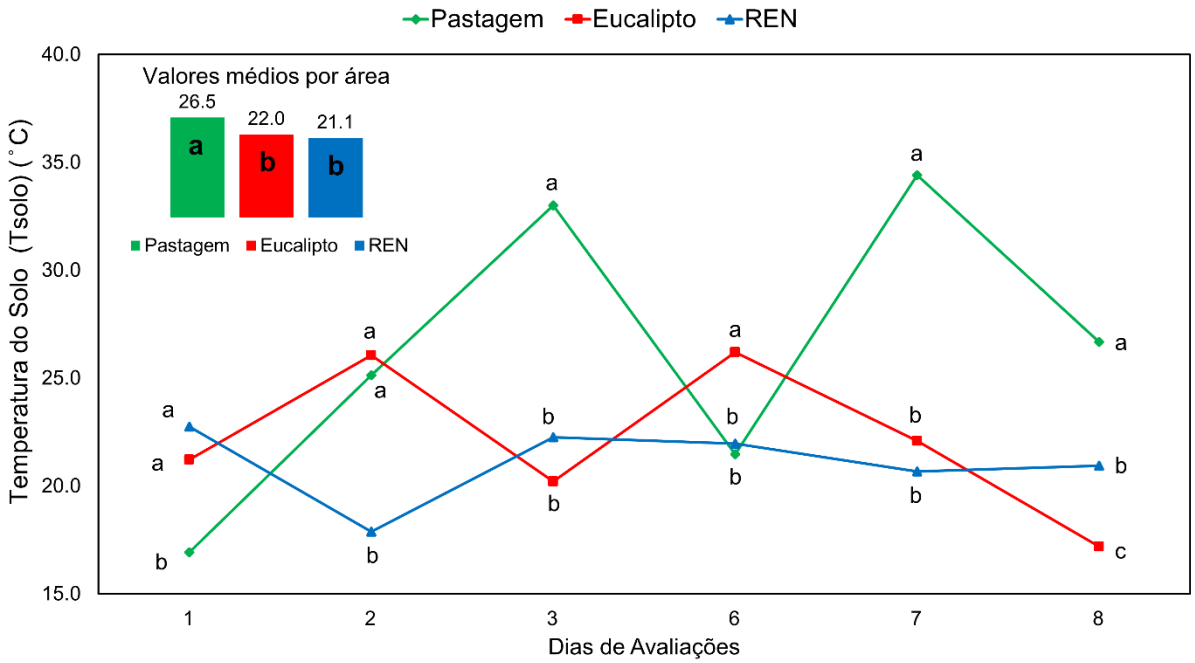


Figura 9. Temperatura do solo (Tsolo) ao longo do tempo (gráfico de linhas) e temperatura do solo média por área (gráfico de colunas). Ambos expressos em graus Celsius. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre os diferentes usos do solo para o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

No segundo dia, as áreas com eucalipto e a pastagem registraram as maiores temperaturas do solo (26,1 e 25,1 ºC, respectivamente), porém não diferiram entre si, mas diferiram da temperatura do solo no Tsolo no REN (17,9 ºC). No terceiro e sétimo dia a pastagem obteve as maiores temperaturas do solo (33,0 e 34,4 ºC, respectivamente), e apresentou diferenças significativas do REN e eucalipto. Entretanto, no sexto dia, foi observado maior temperatura do solo no eucalipto (26,2

ºC) diferindo do REN (22,0 ºC) e da pastagem (21,5 ºC). No último dia de leitura (8), as temperaturas do solo diferem entre as áreas, em ordem decrescente, pastagem (26,7 ºC), REN (20,9 ºC) e eucalipto (17,2 ºC).

3.2 Análise do quociente respiratório do solo (QRS)

O quociente respiratório do solo foi superior e significativo nas áreas de REN (0,59 mol mol^{-1}) e eucalipto (0,52 mol mol^{-1}), essas não diferem entre si, mas apresentam diferenças quando comparadas para área de pastagem (0,28 mol mol^{-1}) para o teste de Tukey ($p< 0,05$). No primeiro dia, não foram observadas variações significativas no QRS para as áreas de eucalipto, pastagem e REN 0,72; 0,62 e 0,47 mol mol^{-1}, respectivamente (Figura 13). No segundo dia, o REN (0,88 mol mol^{-1}) apresentou maior QRS e significativo quando comparadas com as áreas de pastagem (0,37 mol mol^{-1}) e eucalipto (0,31 mol mol^{-1}), essas duas últimas não diferem entre si, para o teste de Tukey ($p< 0,05$).

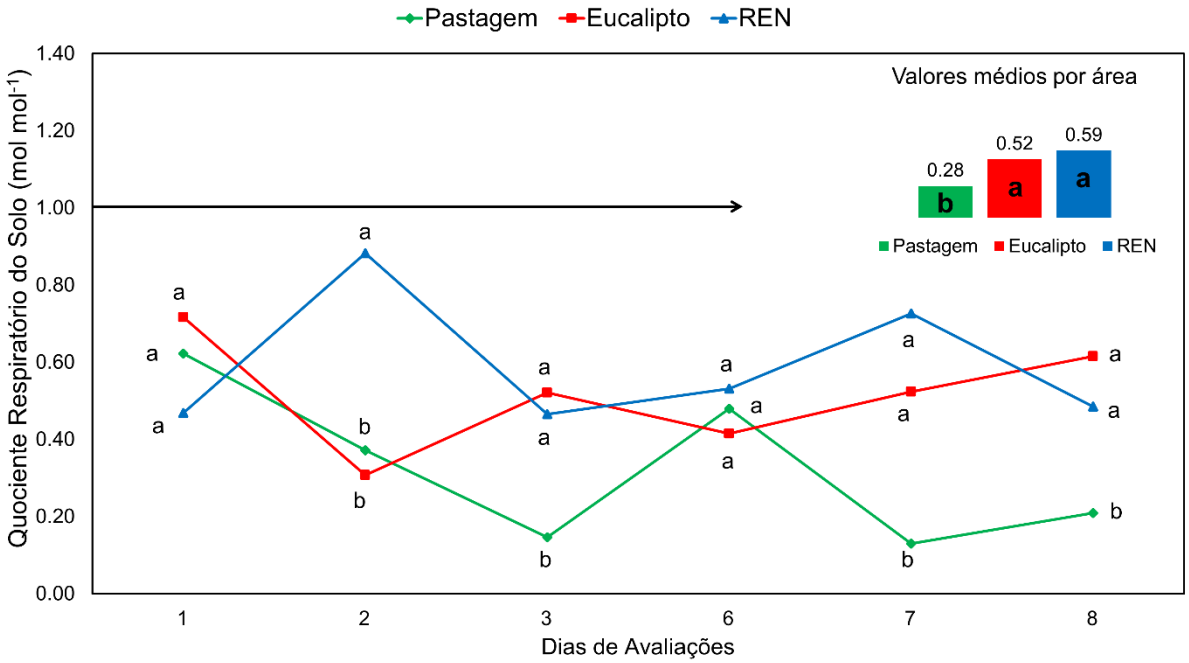


Figura 10. Quociente Respiratório do Solo (QRS) para as áreas de estudo. Quociente expresso em mol mol^{-1}. A seta indica a razão perfeita 1 mol mol^{-1}. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre os diferentes usos do solo para o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

No terceiro dia, o QRS foi superior nas áreas de eucalipto (0,52 mol mol^{-1}) e REN (0,47 mol mol^{-1}) essas não diferem entre si, mas apresenta diferenças significativas quando comparadas à pastagem (0,15 mol mol^{-1}). No sexto dia, não

foram observadas diferenças significativas entre as áreas de REN, pastagem e eucalipto apresentaram 0,53; 0,48 e 0,42 mol mol^{-1}, respectivamente.

No sétimo e oitavo dia o comportamento foi semelhante, com o REN e eucalipto sendo superiores e significativos estatisticamente quando comparadas com a pastagem. No dia sete o valor para o REN foi de 0,73 mol mol^{-1} seguido do eucalipto 0,52 mol mol^{-1} e pastagem 0,13 mol mol^{-1}. Enquanto, no dia oito, área de eucalipto apresentou QRS de 0,62 mol mol^{-1} seguido do REN com 0,49 mol mol^{-1} e por fim, pastagem com 0,21 mol mol^{-1}.

3.3 Atributos dos solos nos agroecossistemas

A pastagem apresentou maior conteúdo e siginificativo de matéria orgânica do solo (MOS) para a camada 0,0 a 0,4 m (20,11 g dm^{-3}) quando comprado a área de eucalipto (15,61 g dm^{-3}) ($p < 0,05$). O REN (18,28 g dm^{-3}) manteve um comportamento intermediário e não diferiu das demais áreas (Figura 11a). A pastagem apresentou o maior potencial hidrogeniônico (pH) (5,67) e diferiu estatisticamente das áreas de REN (4,34) e eucalipto (4,32) ($p < 0,05$), enquanto as áreas de REN e eucalipto não diferiram ($p > 0,05$) (Figura 11b). A área de pastagem também registrou teores superiores e significativo de soma de bases (SB) (33,26 $mmol_c$ dm^{-3}) e diferiu-se das áreas de REN (12,69 $mmol_c$ dm^{-3}) e eucalipto (11,44 $mmol_c$ dm^{-3}) ($p < 0,05$), porém não foi observada diferença entre REN e eucalipto para SB ($p > 0,05$) (Figura 11c).

A pastagem (1,66 g cm^{-3}) e o eucalipto (1,61 g cm^{-3}) apresentaram os maiores valores e significativo de densidade do solo (DS) e diferiram da área de REN que apresentou o menor teor de densidade do solo (1,46 g cm^{-3}) para o teste de Tukey ($p < 0,05$) (Figura 11d). A macroporosidade do solo (Macro), não diferiu estatisticamente entre as áreas estudadas ($p > 0,05$) (Figura 11e), por outro lado, a microporosidade do solo (Micro) diferiu para cada uma das áreas estudadas (Figura 11f). A maior microporosidade foi observada na área REN (0,32 m^3 m^{-3}), enquanto, a pastagem registrou a menor microporosidade (0,23 m^3 m^{-3}). Essas áreas diferiram entre si e diferiram também da microporosidade do solo sob o eucalipto (0,27 m^3 m^{-3}) ($p < 0,05$).

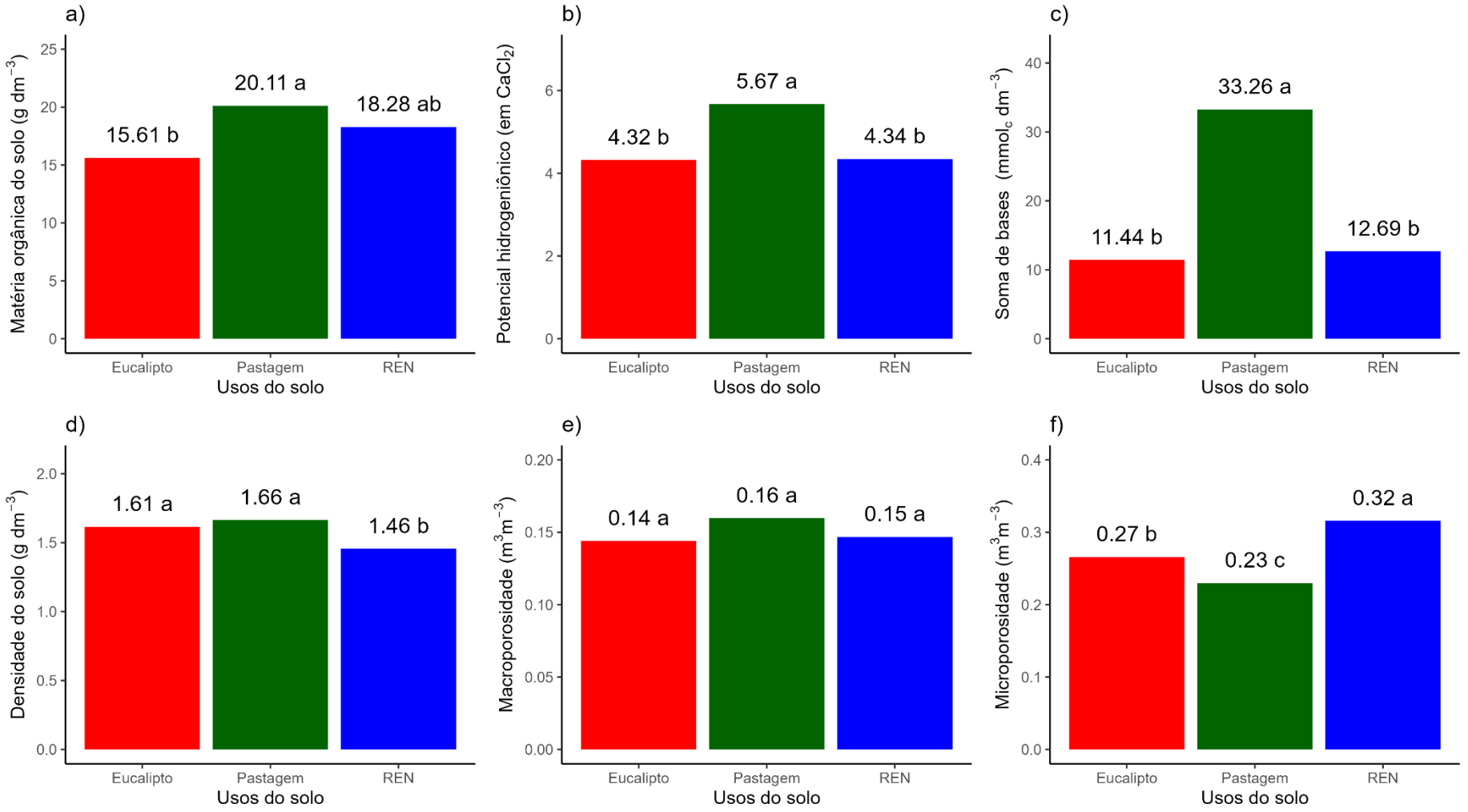


Figura 11. Atributos do solo nos agroecossistemas. Em a) Matéria Orgânica do Solo expressa em g dm^{-3}, b) pH é o potencial hidrogeniônico extraído em solução de $CaCl_2$, c) Soma de Bases em mmol$_c$ dm^{-3}, d) Densidade do solo expressa em g cm^{-3}; e) macroporosidade do solo expresso em m^3 m^{-3} e f) microporosidade do solo expresso em m^3 m^{-3}. Letras diferentes indicam diferenças significativas para o teste de Tukey ($p < 0,05$).

3.4 Análise de componentes principais para os diferentes usos do solo

No gráfico biplot (Figura 12) é possível identificar o agrupamento formado pelos diferentes usos do solo. Pode-se observar um agrupamento formado por REN junto com eucalipto impulsionado pela emissão de CO_2 do solo. É possível destacar uma associação FCO_2 nessas áreas com a UR, no entanto, Temp e a RFA também colaboram para formação desse grupo (Figura 12). Por outro lado, a microporosidade está mais associada a área de REN, contudo esse comportamento já foi observado na Figura 11f, enquanto, o eucalipto foi associado a ETo e a Patm.

A pastagem apresenta um grupo distinto ao agrupamento formado por REN e eucalipto. A pastagem foi associada ao influxo de O_2 do solo e agrupada com a MOS, (pH), (SB), (Tsolo), (DS), (Macro) e (Usolo). Contudo não foi evidenciado o agrupamento de REN com a pastagem. A pastagem não foi agrupada com eucalipto, embora as variáveis climáticas, como, pressão atmosférica e a radiação fotossinteticamente ativa.

Na Tabela 1 são apresentados os autovalores de cada variável, assim as componentes principais 1 e 2 são as que possuem os maiores autovetores, logo oferecem maior poder de explicação, portanto, são alvos de nossas avaliações. As CP1 e CP2, juntas, explicam 59,7% da variância encontrada nos dados.

Na CP1, com uma explicação de 34,0% foram agrupados diretamente com o influxo de O_2 do solo (-0,78) a temperatura do solo (-0,72), matéria orgânica do solo (-0,73), pH (-0,93), a soma de bases (-0,95), densidade do solo (-0,71) e microporosidade (0,83), conforme observado acima esta última é uma variável fortemente associada ao REN. As variáveis com maior poder discriminante em Dim1 indicam que essa componente é um índice associado aos fenômenos de transporte, ou seja, dinâmica do O_2 no solo.

A quantidade de variação total retida na CP2 é de 25,7%, nela verificar-se a formação do grupo de fatores que impulsionam a produção e transporte de CO_2 no solo (Figura 12), destacam-se, a emissão de CO_2 (-0,53) diretamente associada a umidade relativa (-0,88), pressão atmosférica (-0,79), macroporosidade (-0,59) e dificultada pela temperatura média do ar (0,90) e evapotranspiração (0,89).

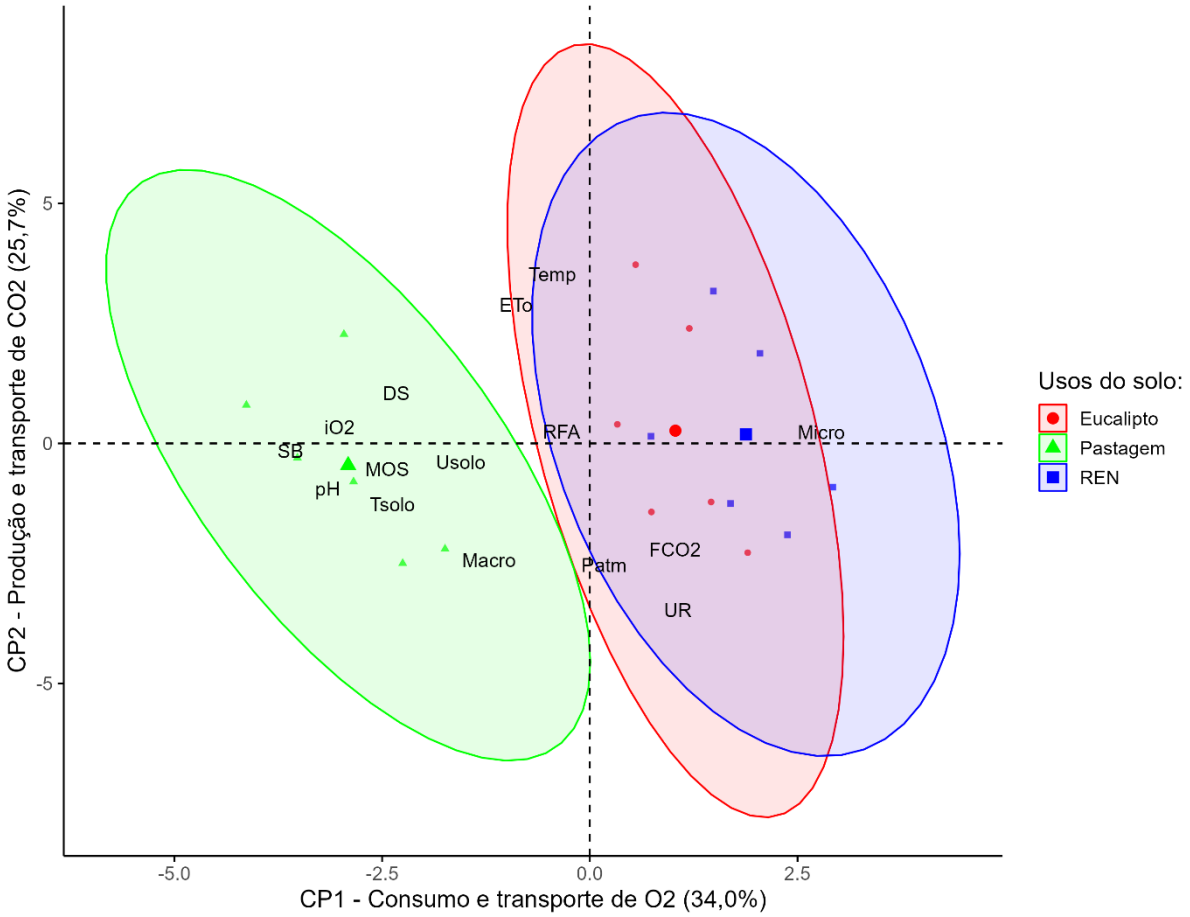


Figura 12. Análise de componentes principais e os agrupamentos formados. Em que: FCO2 é a emissão de CO_2 do solo; iO2 é o influxo de O2 do solo; Usolo é a umidade do solo; Tsolo é a temperatura do solo; MOS é a matéria orgânica do solo; pH é o potencial hidrogeniônico; SB é a soma de bases; DS é a densidade do solo; Macro é a macroporosidade do solo; Micro é a microporosidade do solo; Temp é a temperatura média do ar; UR é a umidade relativa média do ar; RFA é a radiação fotossinteticamente ativa; Patm é a pressão atmosférica e ETo é a evapotranspiração de referência. A pastagem na cor verde, o eucalipto na cor vermelha e REN na cor azul. Nota: as elipses formadas apresentam 95 % de confiança.

Tabela 1. Autovalores, autovetores e variância explicada da análise de componentes principais.

Variável	**CP 1**	**CP 2**
FCO2	0,34	-0,53*
iO2	-0,78*	0,01
Usolo	-0,33	-0,02
Tsolo	-0,72*	-0,27
MOS	-0,73*	-0,24
pH	-0,93*	-0,18
SB	-0,95*	-0,13
DS	-0,71*	0,20
Macro	-0,28	-0,59*
Micro	0,83*	0,15
Temp	-0,18	0,90*
UR	0,24	-0,88*
RFA	-0,15	-0,02
P_Atm	0,10	-0,79*
ETo	-0,19	0,89*
Autovetores	**5,1**	**3,9**
Variância Explicada (%)	**34,0**	**25,7**
Variância Explicada Acumulada (%)	**34,0**	**59,7**
Interpretação dos processos formados	*Consumo e transporte de O2*	*Produção e transporte de CO2*

Em que: FCO2 é a emissão de CO_2 do solo; iO2 é o influxo de O2 do solo; Usolo é a umidade do solo; Tsolo é a temperatura do solo; MOS é a matéria orgânica do solo; pH é o potencial hidrogeniônico; SB é a soma de bases; DS é a densidade do solo; Macro é a macroporosidade do solo; Micro é a microporosidade do solo; Temp é a temperatura média do ar; UR é a umidade relativa média do ar; RFA é a radiação fotossinteticamente ativa; P_Atm é a pressão atmosférica e ETo é a evapotranspiração de referência.

Os asteriscos (*) indicam significância para o critério de autovalor ≥ 0,50.

4 DISCUSSÃO

4.1 Análise da variabilidade temporal de FCO2, iO2, Usolo e Tsolo

Diversos autores relataram altas taxas de emissões de CO_2 em áreas com espécies nativas quando comparadas as áreas de pastagem ou áreas com sistemas integrados de lavoura, pecuária e florestas em áreas tropicais e subtropicais (Zanchi et al., 2012; Ramos 2018; Nogueira, 2021; Silva, 2021; Chen et al., 2021). Assim, a maior emissão de CO_2 média observada na área de REN pode se reflexo da vegetação nativa e suas interações com a alta biodiversidade e atividade biológica (Chen et al., 2021). Essa dinâmica ocorre devido a maior entrada de carbono na superfície do solo o que promove diversidade de microrganismos que atuam na decomposição do material orgânico (Ramos, 2018).

Essa observação é reportada devido a diminuição da biodiversidade associada ao cultivo de uma única espécie (Chen et al., 2021). Porém, as emissões de CO_2 do solo, ora mais elevadas no eucalipto, como visto no primeiro dia (Figura 6) pode ser explicada pois diferentemente da pastagem, no eucalipto, existe acúmulo de serrapilheira, e a degradação desse material na superficie do solo pode intensificar as emissões CO_2 do solo para esse uso. (Ramos, 2018; Vicentini et al., 2019).

No tempo, é possível que a fauna edáfica tem sido favorecida pelo microclima condicionado pelo REN que contribuiu para menores temperatura do solo (Feng et al. 2021), além do aumento da umidade do solo (Figura 8). Esse comportamento do transporte de CO_2 do solo para atmosfera, no tempo, é explicado devido sua dependência das condições de temperatura e umidade do solo (Lal, 2009; Lal, 2022). Portanto, esse fenômeno observado reforça a ideia sugerida por Davidson e Janssens (2006) de que restrições ambientais podem alterar a resposta biológica na emissão de CO_2. Dado que estes organismos dependem de condições favoráveis e são muito sensíveis às flutuações de temperatura e umidade, as restrições ambientais justificam uma redução nas emissões de CO_2.

Esse estudo avança na explicação do influxo de O_2 no solo (iO2) ao comprar áreas de pastagens com áreas com áreas reflorestadas. No entanto, Vicentini et al. (2019) ao análisar o influxo de O_2 do solo em áreas reflorestadas no Cerrado não verificou diferenças entre elas, comportamento semelhante foi observado nesse estudo na comparação entre REN e eucalipto. Esse efeito pode estar atrelado a

suposição de Dias (2006) que existe um suprimento adequado de O_2 no solo, assim como água e nutrientes que asseguram os processos bio-fisiólogicos no metabolismo das florestas. Essa suposição é reforçada ao fato das espécies florestais possuem um sistema respirátorio de demanda semelhantes entre si, porém essa demanda é compensada na forma de respiração heterotrófica dos decompositores (respiração aeróbica) da serrapilhheira e da matéria orgânica do solo (Holanda et al., 2015).

Com base nos avanços obtidos nesse estudo e considerando as contribuições de Ramos (2018) e Vicentini et al. (2019) que realizaram estudos em locais semelhantes e apoiado na idéia de Dias (2006) podemos sugerir que existe uma faixa de suprimente adequado de O_2 no solo. O que mantém uma faixa estável de crescimento, não sendo altamente demandate de água, nutrientes ou oxigênio do solo pois desenvolve mecanismos de reciclagem da matéria orgânica do solo e forte interrelação com microbiota edáfica (Primavesi, 2009).

No entanto, nas pastagens verificou-se elevado consumo de O_2 ao longo do tempo, o que releva que há um incremento maior de oxigênio nesses solos. De Lucena et al. (2023) também verificaram captura maior de O_2 em solos vegetados com grama (*Paspalum notatum*), quando comparados a solos nus ou solos cobertos com palhadas. Tal observação foi constatada devido a necessidade de incremento na respiração radicular associada ao crescimento vegetativo aumentando as demandas respiratórias das raízes, o maior crescimento das raízes também serve para amenizar o efeito do estresse hídrico no período mais seco. (Nabinger, 1997).

As pastagens constituem um conjunto de plantas que são adaptadas a intensa radiação solar com um aumento na eficiência da respiração para o crescimento radicular e aéreo, pois existe um metabolismo mais eficiente na incorporação do carbono na biomassa (matéria seca) (Guarda e Campos, 2014). Por causa desse metabolismo plantas do gênero *Urochloa* (Brachiaria) são mais adaptadas as condições edafoclimáticas tropicais (Silveira e Perez, 2014) e assim, requer alta demanda de oxigênio para respiração das raízes o que justifica influxo de O_2 maior na pastagens quando comparadas as demais áreas (Huang et al., 2006; Zhang et al., 2021).

Vale destacar que as áreas de pastagem e eucalipto estão em uma mesma topossequência (Figura 3), porém a umidade foi diferente entre elas, com a Usolo superior na pastagem, podendo ser reflexo da alta demanda hídrica do eucalipto quando comparada ás pastagens, isso ocorre pois no eucalipto por ser uma espécie

de rápido crescimento tem maior demanda por água para manter seus altos volumes de madeira (Andrade, 2021).

Nesse sentido, é preciso deixar de lado a idéia que eucalipto seca solos, porque a demanda hídrica do eucalipto é maior quando comparada com a pastagem o que justifica os menores umidades do solo achados nas áreas com eucalipto quando comparadas as pastagens (Vital, 2007), em especial, quando as pastagem são adaptadas as condições tropicais (Silveira e Perez, 2014). Em relação a área de REN apresenta uma topossenquência mais baixa localizada próxima a margem direita do Rio Paraná o que pode favorecer maior umidade de solo (Juhász et al., 2006).

A variabilidade temporal da temperatura do solo está associada as condições climáticas (La Scala Jr et al., 2000; De Lucena et al., 2023; Canteral et al., 2023). A Tsolo superior na área de pastagens demostra a influencia mais direta do ambiente sobre ás pastagens (Davidson e Janssens, 2006; Guarda e Campos, 2014). Contudo, a espécie *U. decumbens* apresenta elevada tolerância a temperatura do solo por ser considerada uma forrageira perene de verão, sendo mais adaptada a regiões tropicais, apresenta alta resistência a seca e oferece alta proteção ao solo (Silveira e Perez, 2014).

Os efeitos da radiação solar em solos descobertos podem elevar ainda mais a temperatura do solo, conforme relatado por La Scala Jr et al. (2000) e De Lucena et al. (2023), assim, a Tsolo em áreas florestais, como no REN e eucalipto são semelhantes as observadas nesse estudo (Figura 9). Essse comportamento também foi observado nos estudos de Vicentini et al. (2019) e Canteral et al. (2023) o que demonstra a importância do dossel de espécies florestais que atua na interceptação da radiação solar, auxiliando no fechamento do dossel que atua na diminuição da temperatura do ar e do solo abaixo do dossel, isto é, condiciona um microclima que regula o ambiente (Caron et al., 2012; Feng et al., 2021), assim como, o acúmulo de serrapilheira que fornece uma cobertura que atua na manutenção da temperatura e umidade do solo em florestas (Feng et al., 2021; De Lucena et al., 2023).

4.2 Quociente respiratório do solo

O quociente respiratório é uma razão importante para a compreensão do metabolismo do solo, isto é, a relação emissão de CO_2 com o influxo de oxigênio na atmosfera do solo, essa relação vem sido discutida na ciência desde sua proposta inicial por Quastel (1955), no entanto, apenas anos depois ganhou mais respaldo

cientifico quando foram apresentadas por Reichardt (1975), Luo e Zhou (2006) e Neira et al. (2015) e posteriormente avaliadas por Almeida et al. (2018); Almeida et al. (2019) e Vicentini et al. (2019), contudo a existência de relação entre esses fluxos no solo só foi apresentada por De Lucena et al. (2023), que constatou a existência de correlação linear entre a emissão de CO_2 e o influxo de O_2 em solos com cobertura vegetal viva e morta.

Ao identificar os maiores índices do quociente respiratório nos solos reflorestados o que signifca maior relação entre o influxo de O_2 com a emissão de CO_2 do solos nesses usos, pois, quocientes respiratórios mais elevados ou próximos de um apontam fortes indícios da dependência do influxo de O_2 no solo (Angert et al., 2015; De Lucena et al., 2023), enquanto, o que explica essa razão nesses ambientes com reflorestamentos é o grande número de entrelaçamento de raízes, além do acúmulo de uma densa camada de serrapilheira onde existe forte demanda de O_2 para reações de oxidação da matéria orgânica, obtenção de energia e fenômenos de imobilização e mineralização de nutrientes (Dilly e Zyakun, 2008; Singh e Gupta, 2018; Fonseca e Valadão, 2022).

Entretanto, ao verificar o baixo quociente respiratório médio da pastagem (0,28 mol mol^{-1}) (Figura 10), o que pode indicar pouca relação do oxigênio consumido com a emissão de CO_2, porém a pastagem registrou altas taxas de influxo de O_2 (Figura 7). Isso pode ser explicado porque o processo de entrada de oxigênio no solo dependente da difusão e é otimizado com efeito crescente da temperatura (Neira et al., 2015; Angert et al., 2015), assim a temperatura do solo superior nas pastagens (Figura 9) pode ter favorecido a difusão do O_2 aumentando o influxo de oxigênio nas pastagens (Zhang et al., 2021).

De fato, os resultados reforçam a idéia sugerida por Neira et al. (2015), como reflexo o quociente respiratório do solo responde a temperatura do solo. Esse efeito é potencializado quando se analisa área de pastagens, pois este uso do solo apresentou a maior temperatura média do solo quando comparada com os demais usos do solo, além de maior variabilidade temporal ao longo do estudo (Figura 9). Ao longo do tempo, as condições de temperatura e umidade do solo são controladoras da respiração do solo (Davidson e Janssens, 2006; Lal, 2009; Feng et al., 2021; Lal, 2022).

O QRS também é relacionado as condições abióticas (climática) devido o efeito temperatura descrito pela segunda lei de Fick (equação de difusão) que descreve o

processo de difusão dos gases no solo (Reichardt, 1975; Wolińska et al., 2011; Neira et al., 2015). Enquanto a umidade do solo atua na manutenção da respiração do solo influenciando a dinâmica de transporte de micorganismos e gases no solo, é portanto, entendida como potencializadora da atividade biológica (Luo e Zhou, 2006; Bini et al., 2013; Ronquim, 2020; Feng et al., 2021), mas limitante ao processo de difusão (Neira et al., 2015).

4.3 Efeito dos diferentes agroecossistemas nos atributos do solo

A área de pastagem apresentou o maior teor de MOS e significativo (20,11 g dm^{-3}) (Figura 11a) o que sugere uma área de pastagem mais manejada (Parente et al., 2019). Um estudo realizado pela Embrapa Agrobiologia na região do Cerrado, segure que, a diminuição do conteúdo da MOS em solos tropicais com pastagens pode está atrelado ao processo de degradação da pastagem (Braz et al., 2004). Assim, dado o importante papel que a MOS desempenha nos solos tropicais os teores mais elevados normalmente são associados ao maior potencial agrícola dos solos (Primavesi, 2009; Briedis et al., 2012; De Lucena et al., 2018).

A área de REN pode ser considerada uma área de referência para os teores de MOS e nutrientes do solo, mesmo sendo um sistema aberto (Mendonça, 2010; Santos et al., 2018), a dinâmica, dentro do agroecossistema que simula uma mata atuam para uma reciclagem permanente dos nutrientes deixando os teores de MOS mais elevados devido a biodiversidade associada e o manejo menos invasivo (De Lucena et al., 2018). Contudo, existe uma contradição sobre os ambientes reflorestados com uma só espécie, o que pode reduzir à biodiversidade associada (Lima et al., 2016), diminuindo assim o conjunto de mecanismos que mantém o equilíbrio dinâmico da ciclagem de nutrientes (Primavesi, 2009) e isso pode justificar o menor conteúdo de MOS observado na área de Eucalipto (15,61 g dm^{-3}).

Embora, a pastagem apresentou o valor de pH superior (5,67) isso pode ser efeito do manejo do solo utilizado, que faz uso da técnica de calagem o que explica essa condição. Porém, os uso do solo com REN e eucalipto apresentaram valores de pH inferiores, mesmo assim, esses valores estão dentro da faixa esperada (variando de 4,0 a 5,5) para latossolos do Cerrado brasileiro (Sousa e Lobato, 2004). Pode-se observar que a SB foi favorecida pelo manejo de adubação na pastagem, se mostrando mais elevada quando comparada as áreas de REN e eucalipto (Figura 11c). Isso acontece porque durante a expansão da atividade agropecuária no Cerrado

brasileiro houve também a incorporação de solos com baixa fertilidade natural (Resende et al., 2014).

A macro e microporosidade do solo são frequentemente usadas em estudos sobre a dinâmica dos gases no solo pois esses fatores podem influenciar na estrutura do solo, propriedade importante para a dinâmica dos gases (Silva et al., 2019a) e, assim, são associadas a capacidade de aeração do solo (Stolf et al., 2011). A microporosidade do solo diferente entre as áreas (Figura 11c) e superior na área de REN (0,32 m^{-3} m^3), enquanto a menor microporosidade na pastagem pode ser reflexo da elevada densidade do solo (1,66 g cm^{-3}) registrada nessa área (Figura 11d). No entanto, as pastagens são frequentemente associadas com altas densidades do solo devido a condição de pisoteio animal nesses agroecossistemas (Guarda; Campos, 2014; Silveira; Perez, 2014).

Embora não houveram diferenças entre os valores de macroporosidade para as áreas estudadas (Figura 11e), os resultados estão acima do limite crítico (0,10 m^{-3} m^3) estabelecido por Hakansson e Lipiec (2000). Valores de macroporosidade abaixo do limite crítico podem resultar em má drenagem, baixa capacidade de aeração, aumento da resistência à penetração das raízes no solo, o que resulta na degradação do ambiente (Stolf et al., 2011) e consequentemente uma limitação para o metabolismo do solo.

4.4 Análise de componentes principais e dos agrupamentos

O agrupamento entre o reflorestamento com espécies nativas e com eucalipto, também foi observado por Vicentini et al. (2019) e Silva (2021) em áreas reflorestadas no Cerrado brasileiro. Verificou-se que a pastagem foi associada aos atributos de fertilidade do solo, como, a soma de bases, pH e matéria orgânica do solo (Figura 12). Tal comportamento foi observado por Nogueira (2021) ao destacar o agrupamento da pastagem, no geral, com fatores relacionados ao manejo do solo. Uma vez que, a fertilidade do solo é influenciada diretamente pelo manejo de adubação o que resulta numa rápida resposta da pastagem para o aumento da capacidade produtiva impulsionado pela ativação das raízes (Briedis et al., 2012; Ronquim, 2020).

Assim, na pastagem manejada, a fertilidade do solo exerce importante papel na decomposição microbiana o que pode resultar em fator regulatório da atividade biológica do solo (Six et al., 2006; Bini et al., 2013). Desta forma, a atividade biológica no solo é demandante de oxigênio e influenciada diretamente pelo conteúdo de

matéria orgânica, pH, temperatura e umidade do solo, além das condições favorecidas pela disponibilidade de nutrientes (soma de bases) e densidade do solo (Figura 12) (Fang e Moncrieff, 1999). Essa afirmação é apoiada por Nogueira (2021) em um estudo conduzido em pastagens no Cerrado brasileiro.

Embora, florestas são frequentemente associadas ao armazenamento de carbono via fotossíntese (Wink, 2009). À medida que esses sistemas se consolidam ao longo do tempo na natureza, a taxa de capturas do dióxido de carbono via fotossíntese pode não compensar a taxa metabólica da respiração do solo, incluindo a respiração de raízes (Oikawa et al., 2017). Nas pastagens, devido à necessidade de revitalização vegetal a fotossíntese é sempre mantida na faixa ativa, o que contribui para maior fixação do dióxido de carbono na biomassa vegetal (Kuyah et al., 2023).

5 CONCLUSÕES

A pastagem, ao longo do tempo, apresenta as menores taxas de emissão de CO_2 do solo. Tais resultados foram associados as melhorias dos atributos do solo condicionadas pelo manejo quando comparados aos demais usos do solo.

O influxo de O_2 do solo respondeu com as oscilações na temperatura do solo em áreas de pastagens. Enquanto, em agroecossistemas de florestas tropicais em que a temperatura do solo é favorecida pelo microclima do dossel o que explicou o efeito não significativo para essas áreas.

O quociente respiratório do solo nos diferentes agroecossistemas estudados respondeu as variações da temperatura e umidade do solo. Assim, as variações na temperatura e umidade do solo, ao longo do tempo, explicam a variabilidade do quociente respiratório do solo em áreas de reflorestamentos.

Assim, o entendimento dessas conexões solo-planta-atmosfera se mostrou essencial para a promoção de estratégias para a sustentabilidade dos agroecossistemas tropicais. Como alternativa, a adoção de pastagens manejadas principalmente na conversão de áreas de pastagens anteriormente degradadas (como foi o caso da área de estudo) constitui-se uma importante estrátégia para mitigação de gasses de efeito estufa antrópico.

REFERÊNCIAS

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements. FAO. Irrigation and drainage paper 56. Food and Agriculture Organization, Rome. 1998.

ALMEIDA, R.F.; TEIXEIRA, D.B.; MONTANARI, R.; BOLONHEZI, A.C.; TEIXEIRA, E.B.; MOITINHO, M.R.; PANOSSO, A.R.; SPOKAS, K.A.; LA SCALA JR, N. 2018. Ratio of CO_2 and O_2 as index for categorising soil biological activity in sugarcane areas under contrasting straw management regimes**. Soil Research.** 56(4): 373-381 https://doi.org/10.1071/SR16344.

ALMEIDA, R.F.; SPOKAS, K.A. TEIXEIRA, D.B.; LA SCALA JR, N. 2019. Biochar insights from laboratory incubations monitoring O_2 consumption and CO_2 production. **Biochar.** 1: 249-258. https://doi.org/10.1007/s42773-019-00021-6

ANDRADE, G. C. 2021. **Eucalipto.** Embrapa Florestas. Disponível em< https://www.embrapa.br/en/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/eucalipto/pre-producao/aspectos-ambientais/agua#:~:text=Dados%20referentes%20a%20taxas%20de,2%20litros%20de%20%C3%A1gua%2F%C3%A1rvore.>. Acesso em 29/09/2023.

ANGERT, A.; YAKI, D.; RODEGHIERO, M.; PREISLER, Y.; DAVIDSON, E.A.; WEINER, T. Using O_2 to study the relationships between soil CO_2 efflux and soil respiration. **Biogeosciences.** 2015.

BARTLETT, M.S. Properties of sufficiency and statistical tests. **Proceedings of the Royal Society of London.** 1937.

BINI, D.; SANTOS, C. A.; CARMO, K. B.; KISHINO, N.; ANDRADE, G.; ZANGARO, W.; NOGUEIRA, M. A. 2013. Effects of land use on soil organic carbon and microbial processes associated with soil health in southern Brazil. **European Journal of Soil Biology.** 55: 117–123. http://dx.doi.org/10.1016/j.ejsobi.2012.12.010.

BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos.** 3ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 704p.

BRAZ, S.P.; URQUIAGA, S.; ALVES, B.J.R.; BODDEY, R.M. **Degradação de pastagens, matéria orgânica do solo e a recuperação do potencial produtivo em sistemas de baixo "input" tecnológico na região dos Cerrados.** Seropédica: Embrapa. 2004.

BRIEDIS, C.; SÁ, J. C. de M.; CAIRES, E. F.; NAVARRO, J. de F.; INAGAKI, T. M.; FERREIRA, A. de O. 2012. Carbono do solo e atributos de fertilidade em resposta à calagem superficial em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira.** 47(7): 1007-1014. https://doi.org/10.1590/S0100-204X2012000700018.

CANTERAL, K.F.F.; VICENTINI, M.E.; DE LUCENA, W.B.; DE MORAES, M.L.T.; MONTANARI, R.; FERRAUDO, A.S.; PERUZZI, N.J.; LA SCALA JR, N.; PANOSSO, A.R. Machine learning for prediction of soil CO_2 emission in tropical forests in the Brazilian Cerrado. **Environmental Science and Pollution Research.** 2023. https://doi.org/10.1007/s11356-023-26824-6.

CANTERI, M. G.; ALTHAUS, R. A.; VIRGENS FILHO, J. S.; GIGLIOTI, E. A.; CLÁUDIA V. GODOY, C. V. 2001. Sistema para análise e separação de médias em experimentos agrícolas pelos métodos Scott-Knott, Tukey e Duncan. **Revista Brasileira de Agrocomputação.** 1(2): 18-24.

CAMPOS, M.O.; CERRI, C.E.P.; LA SCALA JR, N. Atmospheric CO_2, soil carbon stock and control variables in managed and degraded pastures in central Brazil. **Remote Sensing Applications: Society and Environment.** 2022. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100848.

CARNEIRO, J.S.S.; SANTOS, A.C.M.; FIDELIS, R.R.; SILVA NETO, S.P.; SANTOS, A.C.; SILVA, R.R. Diagnóstico e manejo da variabilidade espacial da fertilidade do solo no Cerrado do Piauí. **Revista de Ciências Agroambientais.** 2016. https://doi.org/10.5327/rcaa.v14i2.1469.

CARON, B.O.; SOUZA, V.Q.; COSTA, E.C.; ELOYI, E.; BEHLING, A.; TREVISAN, R. Interceptação da radiação luminosa pelo dossel de espécies florestais e sua relação com o manejo das plantas daninhas. **Ciência Rural.** 2012. https://doi.org/10.1590/S0103-84782012000100013.

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.** 1999. https://doi.org/10.1590/S0100-06831999000400027.

CECON, P.A.; SILVA, F.F.; FERREIRA, A.; FERRÃO, R.G.; CARNEIRO, A.P.S.; DETMANN, E.; FARIA, P.N.; MORAIS, T.S.S. Análise de medidas repetidas na avaliação de clones de café Conilon. **Pesquisa Agropecuária Brasileira.** 2008. https://doi.org/10.1590/S0100-204X2008000900011.

CERRI, C. E. P.; ABBRUZZINI, T. F.; CARVALHO, J. L. N.; CHERUBIN, M. R.; FRAZÃO, L. A.; MAIA, S. M. F.; OLIVEIRA, D. M. S. 2023. Matéria orgânica do solo e o equilíbrio global de carbono. **In:** BETTIOL, W.; SILVA, C. A.; CERRI, C. E. P.; MARTIN-NETO, L.; ANDRADE, C. A. (Org.). Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical. Brasília: Embrapa. p. 211-254.

CHEN, X.; LIU, M. XU, Z. WEI, H. Influences of temperature and moisture on abiotic and biotic soil CO_2 emission from a subtropical forest. **Carbon Balance Manage.** 2021. https://doi.org/10.1186/s13021-021-00181-8.

CHEN, S.; ZOU, J.; YAO, X.; WANG, J.; HU, Z.; LU, Y. A biophysical model to simulate seasonal variations of soil respiration in agroecosystems in China. **Agricultural and Forest Meteorology.** 2023. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109524.

DAVIDSON, E.; JANSSENS, I. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. **Nature.** 2006. https://doi.org/10.1038/nature04514.

DE LUCENA, W.B.; VICENTINI, M.E.; SANTOS, G.A.A.D.; SILVA, B.O.; COSTA, D.V.M.; CANTERAL, K.F.F.; NEIRA ROMÁN, J.A.; ROLIM, G.S.; PANOSSO, A.R.; LA SCALA JR, N. Temporal variability of the CO_2 emission and the O_2 influx in a tropical soil in contrasting coverage conditions. **Journal of South American Earth Sciences.** 2023. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.104120.

DE LUCENA, W. B.; TAVARES, M. A.; CARMO, P. H. O.; PERÔNICO, B.W.C.; SANTOS, J. M.; FERREIRA, G. B. Agricultura sustentável e atributos biológicos do solo: uma breve revisão sobre os indicadores da qualidade agrícola-ambiental. **In:**

Oliveira, A.C. (Ed). Ensaios nas Ciências Agrárias e Ambientais. 1ed. Ponta Grossa: Atena. 2018. p.45-52. https://doi.org/10.22533/at.ed.079182907.

DIAS, J.A. Fluxo de CO_2 proveniente da respiração do solo em áreas de floresta nativa da Amazônia. Piracicaba, 2006. 87 p. Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (Esalq), Universidade de São Paulo.

DIAS-FILHO, M.B. **Degradação de pastagens:** o que é e como evitar. Brasília: Embrapa, 2017. 19 p.

FANG, C.; MONCRIEFF, J. B. 1999. A model for soil CO_2 production and transport 1: Model development. **Agricultural and Forest Meteorology.** 95: 225-236. https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00036-2.

FENG, H.; GUO, J.; MALGHANI, S.; HAN, M.; CAO, P.; SUN, J.; XU, X.; XU, X.; WANG, W. 2021. Effects of soil moisture and temperature on microbial regulation of methane fluxes in a poplar plantation. Forests. 12:407. https://doi.org/10.3390/f12040407.

FERREIRA, E.B.; CAVALCANTI, P.P.; NOGUEIRA, D.A. **ExpDes.pt:** Pacote Experimental Designs (Portuguese). R package version 1.2.0. https://CRAN.Rproject.org/package=ExpDes.pt. 2018.

FONSECA, C. O.; VALADÃO, R. C. 2017. Dinâmica espacial da Serra do Gandarela e entorno: uma análise a partir de representações coremáticas. **Sociedade & Natureza.** https://doi.org/10.14393/SN-v29n2-2017-9.

GARDA, V. D. A.; CAMPOS, L. J. M. **Bases ecofisiológicas da assimilação de carbono e suas implicações na produção de forragem.** Palmas: Embrapa Pesca e Aquicultura, 2014. 48p.

GASTWIRTH, J.; GEL, Y.; HUI, W.; LYUBCHICH, V.; MIAO, W.; NOGUCHI, K. **lawstat:** tools for biostatistics, public policy and law. R package version 3.4. 2020. https://CRAN.R-project.org/package=lawstat.

GIACOMO, G.; ANGELO, F.; FABIO, B.; STEFANO, B.; RICCARDO, M. Measurements of soil carbon dioxide emissions from two maize agroecosystems at harvest under different tillage conditions. **Scientific World Journal**. 2014.

GROSS, J.; LIGGES, U. **nortest:** tests for normality. R package version 1.0-4. 2015. https://CRAN.R-project.org/package=nortest.

HAKANSSON, I.; LIPIEC, J. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. **Soil and Tillage Research.** 2000. http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00095-1.

HOLANDA, A.C.; FELICIANO, A.L.P.; MARANGON, L.C.; FREIRE, F.J.; HOLANDA, E.M. Decomposição da serapilheira foliar e respiração edáfica em um remanescente de Caatinga na Paraíba. **Revista Árvore.** 2015. https://doi.org/10.1590/0100-67622015000200004.

HUANG, C.H.; OUYANG, Y.; ZHANG, J.E. Effects of a compact layer on soil O_2. **Geoderma.** 2006. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.12.006.

IAMAGUTI, J.L.; MOITINHO, M.R.; TEIXEIRA, D.B.; BICALHO, E.S.; PANOSSO, A.R.; LA SCALA JR, N. Preparo do solo e emissão de CO_2, temperatura e umidade do solo em área canavieira. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental.** 2015.

IPCC. **Synthesis Report.** Sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, United Kingdom and New York. 2023. 85p.

JASSAL, R.S.; BLACK, T.A.; NESIC, Z.; GAUMONT-GUAY, D. Using automated non-steady state chamber systems for making continuous long-term measurements of soil CO_2 efflux in forest ecosystems. **Agricultural and Forest Meteorology.** 2012.

JENSEN, J.L.; SCHJØNNING, P.; WATTS, C.W.; CHRISTENSEN, B.T.; PELTRE, C.; MUNKHOLM, L.J. Relating soil C and organic matter fractions to soil structural stability. **Geoderma.** 2018. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.10.034.

JUHÁSZ, C.E.P.; CURSI, P.T.; COOPER M.; OLIVEIRA T.C.; RODRIGUES R.R. Dinâmica físico-hídrica de uma toposseqüência de solos sob savana florestada (cerradão) em Assis, SP. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** 2006. https://doi.org/10.1590/S0100-06832006000300002.

KAISER, H.F. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. **Psychometrika.** 1958. https://doi.org/10.1007/BF02289233.

KASSAMBARA, A.; MUNDT, F. **factoextra:** extract and visualize the results of multivariate data analyses. R package version 1.0.7. 2020. https://CRAN.R-project.org/package=factoextra.

KASSAMBARA, A. **rstatix:** pipe-friendly framework for basic statistical tests. R package version 0.7.0. 2021. https://CRAN.R-project.org/package=rstatix.

KUYAH, S.; BULETI, S.; DIMOBE, K.; NKURUNZIZA, L.; MOUSSA, S.; MUTHURI, C.; ÖBORN, I. Farmer-managed natural regeneration in Africa: evidence for climate change mitigation and adaptation in drylands. **In:** DAGAR, J.C.; GUPTA, S.R.; SILESHI, G.W. (eds). Agroforestry for sustainable intensification of agriculture in Asia and Africa. Sustainability Sciences in Asia and Africa. 2023. https://doi.org/10.1007/978-981-19-4602-8_3.

LA SCALA JR, N.; MARQUES JR, J. PEREIRA, G.T.; CORÁ, J.E. Carbon dioxide emission related to chemical properties of a tropical bare soil. **Soil Biology & Biochemistry**, 2000.

LAL, R. 2009. Challenges and opportunities in soil organic matter research. **European Journal of Soil Science**.

LAL, R. 2022. Reducing carbon footprints of agriculture and food systems. **Carbon Footprints.** 1:3, 1-19. https://dx.doi.org/10.20517/cf.2022.05.

LIMA, E.F.; SILVA FILHO, J.P.; ARAÚJO, A.F.S. **Dicionário dos termos usados em ecologia.** Parnaíba, 2016. 180p.

LISBOA, B.B.; VARGAS, L.K.; SILVEIRA, A.O.D.; MARTINS, A.F.; SELBACH, P.A. Indicadores microbianos de qualidade do solo em diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** 2012. https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000100004.

LITTELL, R.C.; HENRY, P.R.; AMMERMAN, C.B. Statistical analysis of repeated measures using SAS procedures. **Journal of Animal Science.** 1998. https://doi.org/10.2527/1998.7641216x.

LIU, J.; TANG, W.; CHEN, G.; LU, Y. FENG, C.; TU, X. M. (2016). Correlation and agreement: overview and clarification of competing concepts and measures**.** **Shanghai Arch Psychiatry.** 28(2): 115-20. https:// 10.11919/j.issn.1002-0829.216045.

LUO, Y.; ZHOU, X. Soil respiration and the environment. San Diego: **Academic Press**; 2006. 316p.

MENDONÇA, J.F.B. **Solo:** substrato da vida. 2. ed. Brasília: Embrapa, 2010. 129 p.

MENDIBURU, F. 2021. **agricolae:** Statistical Procedures for Agricultural Research. R package version 1.3-5. https://CRAN.R-project.org/package=agricolae.

MOSS, R.; EDMONDS, J.; HIBBARD, K. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. **Nature.** 2010. https://doi.org/10.1038/nature08823.

MOITINHO, M.R.; PADOVAN, M.P.; PANOSSO, A.R.; LA SCALA JR, N. 2013. Efeito do preparo do solo e resíduos da colheita de cana-de-açúcar sobre a emissão de CO_2. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** 37: 1720-1728. https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000600028.

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 JR, N. Effects of burned and unburned sugarcane harvesting systems on soil CO_2 emission and soil physical, chemical, and microbiological. **Catena.** 2021. https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104903.

MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O. **Microbiologia e bioquímica do solo.** Lavras: Editora da UFLA, 2.ed., 2006, 729p.

NABINGER, C. Eficiência do uso de pastagens: disponibilidade e perdas de forragem. **In:** PEIXOTO, A.M.; MOURA, J.C.; FARIA, V.P. (Orgs.). Fundamentos do pastoreio rotacionado. Piracicaba: FEALQ, p.213-251. 1997.

NEIRA, J.; ORTIZ, M.; MORALES, L.; ACEVEDO, E. Oxygen diffusion in soils: understanding the factors and processes needed for modeling. **Chilean Journal of Agricultural Research**, 2015.

NOGUEIRA, D.C.S. Variabilidade da emissão de CO2 e atributos do solo em pastagem e sistema silvipastoril. Jaboticabal, 2021. 164 p. **Tese (Doutorado)**. Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV), Universidade Estadual Paulista.

OIKAWA, P.Y.; STURTEVANT, C.; KNOX, S.H.; VERFAILLIE, J.; HUANG, Y.W.; BALDOCCHI, D.D. Revisiting the partitioning of net ecosystem exchange of CO_2 into photosynthesis and respiration with simultaneous flux measurements of $^{13}CO_2$ and CO_2, soil respiration and a biophysical model, CANVEG. **Agricultural and Forest Meteorology.** 2017. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.12.016.

PARENTE, L.; MESQUITA, V.V.; MIZIARA, F.; BAUMANN, L.R.F.; FERREIRA, L. Assessing the pasturelands and livestock dynamics in Brazil, from 1985 to 2017: A novel approach based on high spatial resolution imagery and Google Earth Engine cloud computing. **Remote Sensing of Environment.** 2019. https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111301.

PEDERSEN, T. **patchwork:** the composer of plots. R package version 1.1.1, 2020. https://CRAN.R-project.org/package=patchwork.

PRIMAVESI, A. M. 2009. **Cartilha do solo:** como reconhecer e sanar seus problemas. São Paulo: Movimento dos Trabalhadores Rurais Sem Terra (MST).

QUASTEL, J.H. Soil metabolism. **Proc R Soc Lond B Biol Sci.** 1955. https://doi.org/10.1098/rspb.1955.0002.

QUOOS, J.H. Geodiversidade e Paisagem: uma abordagem interpretativa para a área de proteção ambiental da Baleia Franca (SC). Santa Maria, 2023. 208 p. **Tese (Doutorado).** Centro de Ciências Naturais e Exatas – Universidade Federal de Santa Maria.

R CORE TEAM. **R:** A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2023. URL https://www.R-project.org/.

RAMOS, J.C.A. Emissão de CO_2, quantidade e qualidade do carbono do solo em sistemas agrícolas na região do Cerrado do Mato Grosso do Sul. Ilha Solteira, 2018.

83p. **Dissertação (Mestrado).** Faculdade de Engenharia (Fies), Universidade Estadual Paulista.

RAIJ, B.V, ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais.** Campinas, Instituto Agronômico, 2001. 285 p.

REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera.** 3. ed. Piracicaba: Centro de Energia Nuclear na Agricultura/USP e Fundação Cargill. 1975, 286 p.

RESENDE, J.M.A.; MARQUES JÚNIOR, J.; MARTINS FILHO, M.V.; DANTAS, J.S.; SIQUEIRA, D.S.; TEIXEIRA, D.B. Variabilidade espacial de atributos de solos coesos do leste maranhense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** 2014. https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000400004.

ROLIM, G.S.; CAMARGO, M.B.P.; LANIA, D.G.; MORAES, J.F.L. Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas agroclimáticas para o Estado de São Paulo. **Bragantia.** 2007. https://doi.org/10.1590/S0006-87052007000400022.

RONQUIM, C.C. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais.** Campinas: Embrapa Territorial. 2ed. 2020. 34p.

SANTOS, G.A.A.; MOITINHO, M.R.; SILVA, B.O.; XAVIER, C.V.; TEIXEIRA, D.B.; CORÁ, J.E.; LA SCALA JR, N. Effects of long-term no-tillage systems with different succession cropping strategies on the variation of soil CO_2 emission. **Science of the Total Environment.** 2019.

SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C.; OLIVEIRA, V.A.; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A. ARAUJO FILHO, J.C.; OLIVEIRA, J.B.; CUNHA, T.J.F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** 5ed. Brasília: Embrapa. 2018. 356p.

SCHNEIDER, V.M. Análise multivariada aplicada no estudo de dentifrícios comercializados no Brasil. Santa Maria, 2018. 78p. **Dissertação (Mestrado).** Centro de Ciências Naturais e Exatas. Universidade Federal de Santa Maria.

SILVA, B. O.; MOITINHO, M. R.; SANTOS, G. A. A.; TEIXEIRA, D. B.; FERNANDES, C.; LA SCALA JR, N. 2019a. Soil CO_2 emission and short-term soil pore class distribution after tillage operations. **Soil and Tillage Research.** 189: 224-232. https://doi.org/10.1016/j.still.2018.10.019.

SILVA, D. A. P.; CAMPOS, M. C. C.; MANTOVANELLI, B. C.; SANTOS, L. A. C.; SOARES, M. D. R.; CUNHA, J. M. 2019b. Variabilidade espacial da emissão de CO_2, temperatura e umidade do solo em área de pastagem na região Amazônica, Brasil. **Revista de Ciências Agroveterinárias.** 18 (1): 119-126. https://doi.org/10.5965/223811711812019119.

SINGH, J. S.; GUPTA, V. K. 2018. Soil microbial biomass: A key soil driver in management of ecosystem functioning. **Science of The Total Environment.** 634:497-500. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.373.

SILVA, B.O.; MOITINHO, M.R.; SANTOS, G.A.A.; TEIXEIRA, D.B.; FERNANDES, C.; LA SCALA JR, N. 2019. Soil CO_2 emission and short-term soil pore class distribution after tillage operations. **Soil and Tillage Research.** 189: 224-232. https://doi.org/10.1016/j.still.2018.10.019.

SILVA, B.O. Emissão de CO_2, estoque e humificação do carbono do solo em áreas convertidas do bioma Cerrado, Brasil Central. Jaboticabal. 2021. 89p. **Tese (Doutorado).** Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV), Universidade Estadual Paulista.

SILVEIRA M.C.T.; PEREZ N.B. **Informações sobre plantas forrageiras C4 para cultivo em condições de deficiência de drenagem e tolerância a frio.** Bagé: Embrapa Pecuária Sul. 2014. 32p.

SIX, J.; FREY, S.D.; THIES, R.K.; BATTEN, K.M. 2006. Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems. **Soil Science Society of America Journal**. https://doi.org/10.2136/sssaj2004.0347.

SOUZA, Z.M.D.; ALVES, M.C. Propriedades químicas de um latossolo vermelho distrófico de Cerrado sob diferentes usos e manejos**. Revista Brasileira de Ciência do Solo.** 2003. https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000100014.

SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. **Cerrado:** correção do solo e adubação. 2ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica. 2004. 416p.

STOLF, R.; THURLER, A.M.; BACCHI, O.O.S.B.; REICHARDT, K. Method to estimate soil macroporosity and microporosity based on sand content and bulk density. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** 2011. https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000200014.

SHAPIRO, S.S.; WILK, M.B. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika.**1965. https://doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591.

TEIXEIRA, P.C.; DONAGEMMA, G.K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W.G. **Manual de métodos de análise de solo.** 3ed. Brasília: Embrapa. 2017. 574p.

THORNTHWAITE, C. W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review.** 38: 55-94. https://www.jstor.org/stable/210739.

TUKEY, J.W. Comparing individual means in the analysis of variance. **Biometrics.** 1949. https://doi.org/10.2307/3001913.

VENABLES WN, RIPLEY BD. **Modern Applied Statistics with S.** Fourth Edition. Springer, New York. 2002.

VICENTINI, M.E.; PINOTTI, C.R.; HIRAI, W.Y.; MORAES, M.L.T.; MONTANARI, R.; TEIXEIRA FILHO, M.C.M.; MILORI, D.M.B.P.; LA SCALA JR, N.; PANOSSO, A.R. 2019. CO_2 emission and its relation to soil temperature, moisture, and O_2 absorption in the reforested areas of Cerrado biome Central Brazil. **Plant and Soil.** 444: 193-211. https://doi.org/10.1007/s11104-019-04262-z.

VITAL, M.H.F. Impacto ambiental de florestas de eucalipto. **Revista do BNDES.** 2007. https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/12554.

ZANCHI, F.B.; WATERLOO, M.J.; KRUIJT, B.; KESSELMEIER, J.; LUIZÃO, F.J.; MANZI, A.O.; DOLMAN, A.J. Soil CO_2 efflux in Central Amazonia: environmental and methodological effects. **Acta Amazonica.** 2012. https://doi.org/10.1590/S0044-59672012000200001.

WINK, C. Estoque de carbono em plantações de *Eucalyptuus* sp. Implantados em campo nativo. Santa Maria. 2009. 130p. **Dissertação (Mestrado).** Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria.

WICKHAM, H. **ggplot2:** elegant graphics for data analysis, 2nd ed. Springer, New York, NY. 2016. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24277-4_5.

WICKHAM, H.; AVERICK, M.; BRYAN, J.; CHANG, W.; MCGOWAN, L.D.; FRANÇOIS, R.; GROLEMUND, G.; HAYES, A.; HENRY, L.; HESTER, J.; KUHN, M.; PEDERSEN, T.L.; MILLER, E.; BACHE, S.M.; MÜLLER, K.; OOMS, J.; ROBINSON, D.; SEIDEL, D.P.; SPINU, V.; TAKAHASHI, K.; VAUGHAN, D.; WILKE, C.; WOO, K.; YUTANI, H. Welcome to the tidyverse. **Journal of Open Source Software.** 2019. https://doi.org/10.21105/joss.01686.

WICKHAM, H.; BRYAN, J. **readxl:** read excel files. R package version 1.4.0, 2022. https://CRAN.R-project.org/package=readxl.

WOLIŃSKA, A.; STEPNIEWSKA, Z.; SZAFRANEK-NAKONIECZNA, A. 2011. Effect of selected physical parameters on respiration activities in common Polish mineral soils. **Polish Journal of Environmental Studies**. 20: 1075–1082.

Zhang, X.; Gregory, A. S.; Whalley, W. E.; Coleman, K.; Neal, A.L.; Bacq-Labreuil, A.; Mooney, S. J.; Crawford, J. W.; Soga, K.; Illangasekare, T. H. 2021. Relationship between soil carbon sequestration and the ability of soil aggregates to transport dissolved oxygen. **Geoderma.** 403:115370. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115370.

CAPÍTULO IV – CONSIDER:AÇÕES FINAIS: Quais os próximos passos para os estudos em respiração do solo?

A ciência é mutável e muda à medida que o mundo e as sociedades mudam e novos conhecimentos são adicionados à lista de conhecimentos já existentes, assim, novas descobertas proporcionam as respostas por tanto tempo esperadas e impulsionam ainda mais outras novas descobertas e assim a ciência e a evolução do conhecimento acontece.

O principal avanço em respiração do solo é entender que os processos não são tão homogêneos como se parece, a respiração do solo ocorre em diferentes compartimentos e é estimulada por fatores climáticos-ambientais e pela a ação direta da interferência humana sobre os diferentes usos do solo e o manejo empregado nas práticas agrícolas.

Entender que, respiração não é apenas o efluxo (saída) do dióxido de carbono do solo para atmosfera terrestre. É preciso está claro na associação que a respiração é um processo bioquímico de dois sentidos, isto é, uma entrada e uma saída. Avançar no estudo da dinâmica de entrada de oxigênio no solo é linear definitivo para abranger novos caminhos no entendimento do metabolismo respiratório do solo.

Compreender as diferentes fontes de demanda de oxigênio no solo, e quando possível quantifica-las em faixas cada vez mais especificas será um objetivo muito dificultoso, mas muito útil. À medida que se conhece cada compartimento da respiração do solo os modelos de estimativas poderão ser melhores ajustados ao incluírem fontes antes despercebidas. Esses ajustes poderão impulsionar as estimativas das emissões de CO_2 do solo em larga escala, fazendo que, os erros estimatórios sejam reduzidos ou até mesmo tender a zero.

Os futuros trabalhos deverão considerar que existem diferentes horários em que as interações solo-planta-atmosfera afetam a respiração do solo. A princípio dividir o dia de leitura em três períodos, a saber: noturno (sem radiação solar), início e final do dia (pouca radiação solar) e o meio do dia (horário entre 10h e 16h), desta forma será possível. Assim será possível criar modelos específicos para cada faixa de horário tornando possível esclarecer quais variáveis mais atuam em faixas específicas de horários.

A expectativa é de um futuro desafiador, aliás será possível avaliar com precisão a respiração oriunda da atividade microbiana da rizosfera? Ou continuará como efeito da respiração de raiz? Isso abrirá uma janela de estudos sem precedentes, bom com a tecnologia hoje presente não é tão claro responder essas questões, mas há uma esperança que esse entendimento seja mais notável aos leitores científicos.

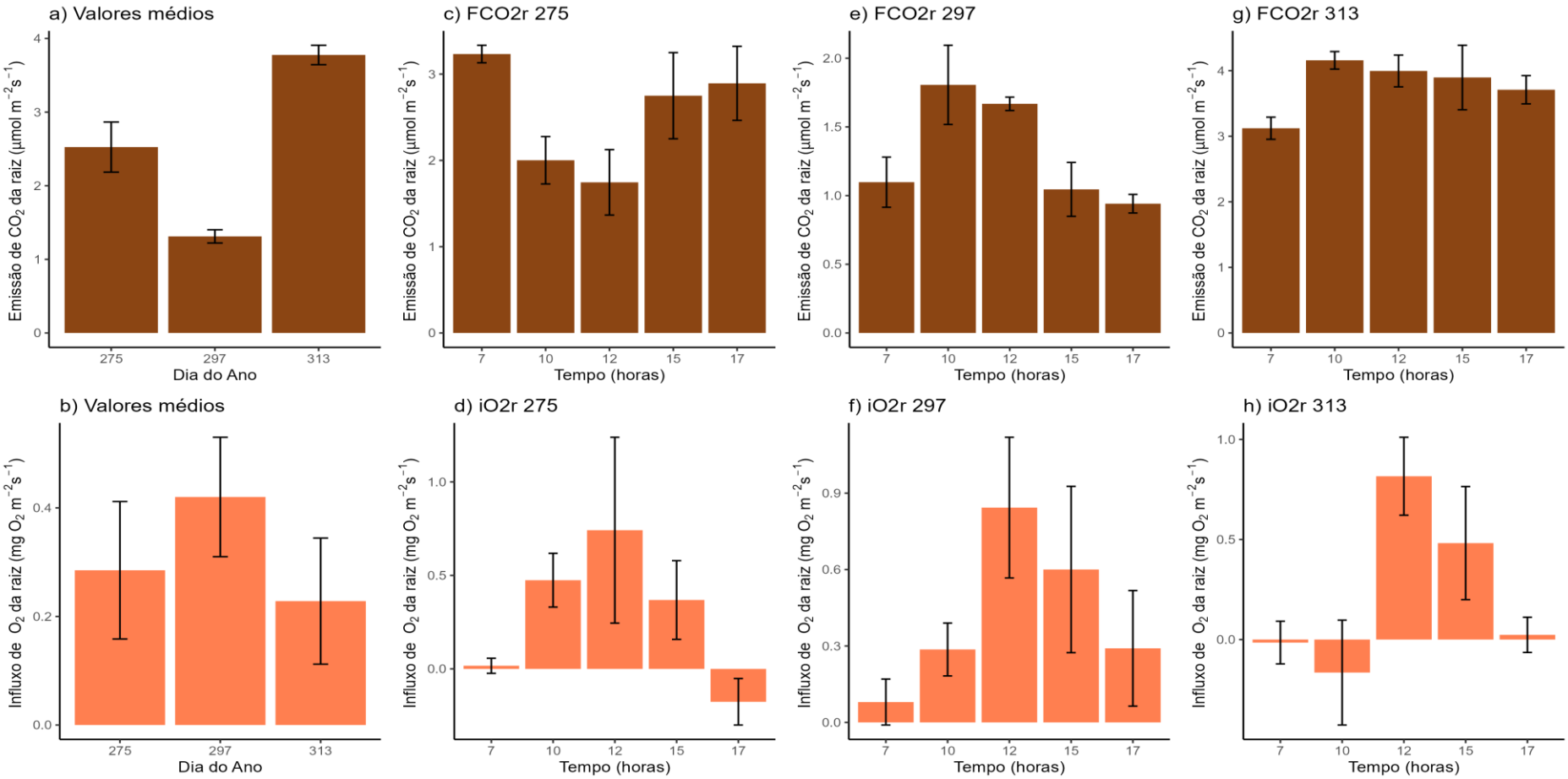
A determinação mais especializada da respiração de raízes trará como consequência a eficiência dos cálculos de fixação de carbono via fotossíntese nas plantas, pois assim será possível estimar com erros mínimos o quanto de carbono é fixado pelo processo e o quanto de carbono é perdido via respiração radicular, isso será indispensável para as técnicas de balanço do carbono e atenderá ao mercado de carbono global pois poderá contribuir na melhoria das estimativas.

Em suma, a contribuição desse estudo para a ciência e para estudos futuros no campo de respiração do solo é centrar na avaliação simultânea do efluxo de CO_2 e no influxo de O_2 do solo, fazendo isto numa faixa de horário em que permita conhecer e medir as variáveis meteorológicas que mais afetam a respiração, em especial, quando o componente planta e solo forem avaliados juntos. Entender que diferentes usos dos solos implicam em diferentes conexões, e essas conexões se tornam mais complexas à medida que a complexidade do agroecossistema alvo do estudo é aumentada.

APÊNDICES

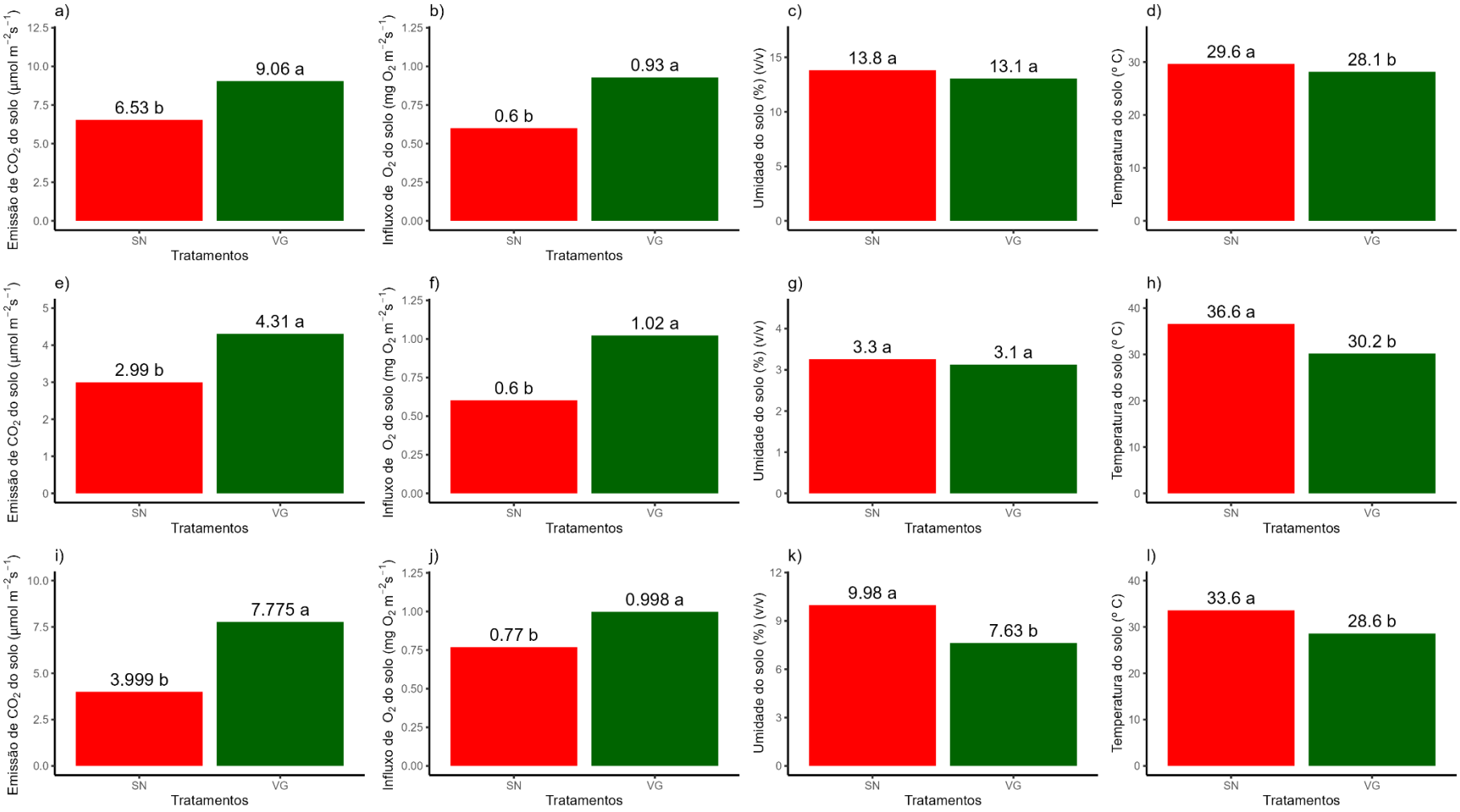
Apêndice A: Fluxos de gases atribuído ao efeito das raízes.

Figura A1. Emissão de CO_2 das raízes em (µmol m^{-2} s^{-1}) e influxo de O_2 da raiz (mg O_2 m^{-2} s^{-1}). Elaborado pelo autor após uso da equação de respiração total do solo de Luo e Zhuo (2006).



Apêndice B: **Valores médios por momentos.**

Figura B1. Valores médios por momentos. Dia 275 (a, b,c,d). Dia 297 (e, f, g, h). Dia 313 (i, j, k, l). Elaborado pelo autor.



Apêndice C: Interpretação dos coeficientes de correlação linear.

Valor de r (para coeficientes positivos ou negativos)	**Interpretação:**
0,00	Nula
0,01 a 0,09	Muito Fraca
0,10 a 0,29	Fraca
0,30 a 0,49	Fraca-Moderada
0,50 a 0,69	Moderada
0,70 a 0,89	Forte
0,90 a 1,00	Muito Forte

adaptado de Pimentel Gomes (1990)

Apêndice D: Caracterização dos atributos da fertilidade do solo nos agroecossistemas em diferentes camadas.

Tabela D1. Estatística descritiva da caracterização dos atributos de fertilidade do solo na camada de 0,0 a 0,1 m para as áreas de estudo.

Camada 0 - 0,1m			**Eucalipto**			
Variáveis	**Média**		**EPM**	**Mínimo**	**Máximo**	**CV** (%)
P (mg dm^{-3})	2,67	b	0,33	2,00	4,00	30,6
MO (g dm^{-3})	19,67	b	0,80	17,00	22,00	10,0
pH (em $CaCl_2$)	4,28	b	0,06	4,10	4,50	3,4
K ($mmol_c$ dm^{-3})	0,95	a	0,06	0,70	1,10	16,0
Ca ($mmol_c$ dm^{-3})	3,67	c	0,62	1,00	5,00	41,1
Mg ($mmol_c$ dm^{-3})	9,67	b	1,17	7,00	15,00	29,7
H+Al ($mmol_c$ dm^{-3})	36,83	b	1,87	31,00	42,00	12,4
Al ($mmol_c$ dm^{-3})	8,00	a	0,73	6,00	11,00	22,4
SB ($mmol_c$ dm^{-3})	14,28	b	1,66	10,00	21,10	28,4
CTC ($mmol_c$ dm^{-3})	51,12	b	1,13	46,70	54,10	5,4
Camada 0 - 0,1m			**Reflorestamento com Espécies Nativas**			
Variáveis	**Média**		**EPM**	**Mínimo**	**Máximo**	**CV** (%)
P (mg dm^{-3})	2,00	b	0,52	1,00	4,00	63,3
MO (g dm^{-3})	22,00	b	1,29	18,00	27,00	14,4
pH (em $CaCl_2$)	4,50	b	0,09	4,30	4,90	5,1
K ($mmol_c$ dm^{-3})	0,65	a	0,11	0,40	1,10	39,8
Ca ($mmol_c$ dm^{-3})	10,00	b	1,88	6,00	19,00	46,1
Mg ($mmol_c$ dm^{-3})	10,83	b	2,09	6,00	20,00	47,2
H+Al ($mmol_c$ dm^{-3})	40,50	a	2,83	31,00	52,00	17,1
Al ($mmol_c$ dm^{-3})	6,00	a	1,41	1,00	11,00	57,7
SB ($mmol_c$ dm^{-3})	21,48	b	3,98	14,40	40,10	45,4
CTC ($mmol_c$ dm^{-3})	61,98	a	2,32	57,40	71,10	9,2
Camada 0 - 0,1m			**Pastagem Manejada**			
Variáveis	**Média**		**EPM**	**Mínimo**	**Máximo**	**CV** (%)
P (mg dm^{-3})	30,83	a	5,02	14,00	50,00	39,9
MO (g dm^{-3})	26,17	a	0,79	24,00	29,00	7,4
pH (em $CaCl_2$)	5,62	a	0,10	5,30	5,90	4,4
K ($mmol_c$ dm^{-3})	1,15	a	0,40	0,60	3,10	84,1
Ca ($mmol_c$ dm^{-3})	26,83	a	2,01	21,00	34,00	18,3
Mg ($mmol_c$ dm^{-3})	17,17	a	1,52	11,00	21,00	21,6
H+Al ($mmol_c$ dm^{-3})	16,50	b	0,67	15,00	18,00	10,0
Al ($mmol_c$ dm^{-3})	0,00	b	0,00	0,00	0,00	0,0
SB ($mmol_c$ dm^{-3})	45,15	a	3,14	32,60	53,80	17,0
CTC ($mmol_c$ dm^{-3})	61,65	a	3,18	50,60	71,80	12,6

N= 6. Onde: EPM é erro padrão da média, Mínimo é o valor mínimo observado, Máximo é máximo valor obeservado, CV é coefiente de variação (%). Os valores médios seguidos pela mesma letra não direm entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. P é fosforo, MO é matéria orgânica, pH é potencial hidrogênioionico, K é teor de potássio, Ca é teor de cálcio, Mg é teor de magnésio, H+Al é acidez potencial, Al é teor de alumínio, SB é soma de bases, CTC é capacidade de troca de cations.

Tabela D2. Estatística descritiva da caracterização dos atributos de fertilidade do solo na camada de 0,1 a 0,2 m para as áreas de estudo.

Camada 0,1 - 0,2m			**Eucalipto**			
Variáveis	**Média**		**EPM**	**Mínimo**	**Máximo**	**CV** (%)
P (mg dm^{-3})	1,00	b	0,00	1,00	1,00	0,0
MO (g dm^{-3})	14,50	b	0,43	13,00	16,00	7,2
pH (em $CaCl_2$)	4,33	b	0,02	4,30	4,40	1,2
K ($mmol_c$ dm^{-3})	0,55	a	0,08	0,40	0,90	33,8
Ca ($mmol_c$ dm^{-3})	1,00	b	0,00	1,00	1,00	0,0
Mg ($mmol_c$ dm^{-3})	9,33	a	0,56	8,00	12,00	14,6
H+Al ($mmol_c$ dm^{-3})	29,50	b	1,29	25,00	34,00	10,7
Al ($mmol_c$ dm^{-3})	7,00	b	0,52	5,00	8,00	18,1
SB ($mmol_c$ dm^{-3})	10,88	b	0,63	9,50	13,90	14,1
CTC ($mmol_c$ dm^{-3})	40,38	a	1,04	37,50	44,40	6,3
Camada 0,1 - 0,2m	**Reflorestamento com Espécies Nativas**					
Variáveis	**Média**		**EPM**	**Mínimo**	**Máximo**	**CV** (%)
P (mg dm^{-3})	1,17	b	0,17	1,00	2,00	35,1
MO (g dm^{-3})	16,17	b	0,60	14,00	18,00	9,1
pH (em $CaCl_2$)	4,25	b	0,02	4,20	4,30	1,3
K ($mmol_c$ dm^{-3})	0,37	a	0,07	0,20	0,60	44,8
Ca ($mmol_c$ dm^{-3})	4,17	b	1,25	2,00	10,00	73,4
Mg ($mmol_c$ dm^{-3})	4,33	b	0,92	2,00	8,00	51,9
H+Al ($mmol_c$ dm^{-3})	40,00	a	3,35	28,00	52,00	20,5
Al ($mmol_c$ dm^{-3})	11,83	a	1,08	8,00	15,00	22,3
SB ($mmol_c$ dm^{-3})	8,87	b	1,57	4,40	13,60	43,2
CTC ($mmol_c$ dm^{-3})	48,87	a	4,31	34,50	65,20	21,6
Camada 0,1 - 0,2m			**Pastagem**			
Variáveis	**Média**		**EPM**	**Mínimo**	**Máximo**	**CV** (%)
P (mg dm^{-3})	5,17	a	0,91	3,00	8,00	43,1
MO (g dm^{-3})	19,17	a	0,65	17,00	21,00	8,4
pH (em $CaCl_2$)	5,70	a	0,07	5,40	5,90	3,1
K ($mmol_c$ dm^{-3})	0,75	a	0,33	0,30	2,40	108,1
Ca ($mmol_c$ dm^{-3})	20,00	a	1,48	15,00	24,00	18,2
Mg ($mmol_c$ dm^{-3})	11,33	a	0,80	9,00	13,00	17,4
H+Al ($mmol_c$ dm^{-3})	17,50	c	0,50	15,00	18,00	7,0
Al ($mmol_c$ dm^{-3})	0,00	c	0,00	0,00	0,00	0,0
SB ($mmol_c$ dm^{-3})	32,08	a	2,03	26,40	37,50	15,5
CTC ($mmol_c$ dm^{-3})	49,58	a	1,83	44,40	55,50	9,0

N= 6, EPM é erro padrão da média, Mínimo é o valor mínimo observado, Máximo é máximo valor obeservado, CV é coefiente de variação (%). Os valores médios seguidos pela mesma letra não direm entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. P é fosforo, MO é matéria orgânica, pH é potencial hidrogênioionico, K é teor de potássio, Ca é teor de cálcio, Mg é teor de magnésio, H+Al é acidez potencial, Al é teor de alumínio, SB é soma de bases, CTC é capacidade de troca de cations.

Tabela D3. Estatística descritiva da caracterização dos atributos de fertilidade do solo na camada de 0,2 a 0,4 m para as áreas de estudo.

Camada 0,2 - 0,4m			**Eucalipto**			
Variáveis	**Média**		**EPM**	**Mínimo**	**Máximo**	**CV** (%)
P (mg dm^{-3})	1,00	a	0,00	1,00	1,00	0,0
MO (g dm^{-3})	12,67	b	0,42	12,00	14,00	8,2
pH (em $CaCl_2$)	4,35	b	0,04	4,20	4,50	2,4
K ($mmol_c$ dm^{-3})	0,33	a	0,07	0,20	0,60	52,6
Ca ($mmol_c$ dm^{-3})	1,00	b	0,00	1,00	1,00	0,0
Mg ($mmol_c$ dm^{-3})	7,83	a	0,87	5,00	10,00	27,3
H+Al ($mmol_c$ dm^{-3})	25,50	b	0,50	25,00	28,00	4,8
Al ($mmol_c$ dm^{-3})	6,33	b	0,49	5,00	8,00	19,1
SB ($mmol_c$ dm^{-3})	9,17	b	0,89	6,20	11,60	23,8
CTC ($mmol_c$ dm^{-3})	34,67	b	0,92	31,20	36,60	6,5
Camada 0,2 - 0,4m			**Reflorestamento com Espécies Nativas**			
Variáveis	**Média**		**EPM**	**Mínimo**	**Máximo**	**CV** (%)
P (mg dm^{-3})	1,00	a	0,00	1,00	1,00	0,0
MO (g dm^{-3})	16,67	a	1,41	14,00	23,00	20,7
pH (em $CaCl_2$)	4,28	b	0,07	4,00	4,50	4,0
K ($mmol_c$ dm^{-3})	0,23	a	0,03	0,10	0,30	35,2
Ca ($mmol_c$ dm^{-3})	4,17	b	2,06	1,00	14,00	120,9
Mg ($mmol_c$ dm^{-3})	3,33	b	0,62	1,00	5,00	45,2
H+Al ($mmol_c$ dm^{-3})	39,00	a	2,91	34,00	52,00	18,3
Al ($mmol_c$ dm^{-3})	9,33	a	1,31	4,00	12,00	34,3
SB ($mmol_c$ dm^{-3})	7,73	b	2,36	2,30	18,10	74,9
CTC ($mmol_c$ dm^{-3})	46,73	a	3,09	36,30	58,30	16,2
Camada 0,2 - 0,4m			**Pastagem**			
Variáveis	**Média**		**EPM**	**Mínimo**	**Máximo**	**CV** (%)
P (mg dm^{-3})	1,50	a	±0,34	1,00	3,00	55,8
MO (g dm^{-3})	15,00	ab	0,45	14,00	17,00	7,3
pH (em $CaCl_2$)	5,70	a	0,14	5,50	5,90	2,5
K ($mmol_c$ dm^{-3})	0,38	a	0,16	0,20	1,20	105,0
Ca ($mmol_c$ dm^{-3})	14,67	a	1,41	12,00	20,00	23,5
Mg ($mmol_c$ dm^{-3})	7,50	a	0,43	6,00	9,00	14,0
H+Al ($mmol_c$ dm^{-3})	17,00	c	0,63	15,00	18,00	9,1
Al ($mmol_c$ dm^{-3})	0,00	c	0,00	0,00	0,00	0,0
SB ($mmol_c$ dm^{-3})	22,55	a	1,72	19,20	29,30	18,7
CTC ($mmol_c$ dm^{-3})	39,55	ab	1,76	35,20	47,30	10,9

N= 6. EPM é erro padrão da média, Mínimo é o valor mínimo observado, Máximo é máximo valor obeservado, CV é coefiente de variação (%). Os valores médios seguidos pela mesma letra não direm entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. P é fosforo, MO é matéria orgânica, pH é potencial hidrogênioionico, K é teor de potássio, Ca é teor de cálcio, Mg é teor de magnésio, H+Al é acidez potencial, Al é teor de alumínio, SB é soma de bases, CTC é capacidade de troca de cations.

Apêndice E: Caracterização dos atributos físicos do solo nos agroecossistemas em diferentes camadas.

Tabela E1. Estatística descritiva da caracterização dos atributos físicos do solo na camada de 0,0 a 0,1 m para as áreas de estudo.

Camada 0,0 - 0,1m	**Eucalipto**					
Variáveis	**Média**		**EPM**	**Mínimo**	**Máximo**	**CV** (%)
Conteúdo de Areia (g kg^{-1})	648,78	a	10,73	614,70	691,30	4,1
Conteúdo de Silte (g kg^{-1})	26,44	a	2,29	18,90	34,10	21,2
Conteúdo de Argila (g kg^{-1})	324,78	a	10,55	280,80	355,30	8,0
Densidade do Solo (g cm^{-3})	1,54	ab	0,03	1,43	1,62	4,8
Porosidade Total (m^3 m^{-3})	0,44	ab	0,01	0,41	0,48	6,1
Carbono Orgânico (Mg ha^{-1})	9,71	b	1,00	6,95	14,08	25,2
Camada 0,0 - 0,1m	**Reflorestamento com Espécies Nativas**					
Variáveis	**Média**		**EPM**	**Mínimo**	**Máximo**	**CV** (%)
Conteúdo de Areia (g kg^{-1})	614,02	a	21,63	532,00	686,30	8,6
Conteúdo de Silte (g kg^{-1})	22,86	a	3,19	13,90	32,50	34,1
Conteúdo de Argila (g kg^{-1})	363,12	a	19,49	299,80	435,50	13,1
Densidade do Solo (g cm^{-3})	1,50	b	0,04	1,39	1,65	6,4
Porosidade Total (m^3 m^{-3})	0,45	a	0,01	0,40	0,49	7,7
Carbono Orgânico (Mg ha^{-1})	15,67	a	1,04	11,9	18,23	16,3
Camada 0,0 - 0,1m	**Pastagem**					
Variáveis	**Média**		**EPM**	**Mínimo**	**Máximo**	**CV** (%)
Conteúdo de Areia (g kg^{-1})	620,70	a	7,18	620,70	667,40	2,7
Conteúdo de Silte (g kg^{-1})	27,20	a	2,47	17,10	34,70	22,3
Conteúdo de Argila (g kg^{-1})	317,72	a	7,80	303,90	355,10	6,0
Densidade do Solo (g cm^{-3})	1,67	a	0,03	1,57	1,80	4,6
Porosidade Total (m^3 m^{-3})	0,40	b	0,01	0,35	0,43	6,8
Carbono Orgânico (Mg ha^{-1})	17,23	a	0,68	13,99	18,61	9,7

N= 6. EPM é erro padrão da média, Mínimo é o valor mínimo observado, Máximo é máximo valor obeservado, CV é coefiente de variação (%). Onde: Areia é o conteúdo de areia em g kg^{-1}, Silte é o conteúdo de silte em g kg^{-1}, Argila é o conteúdo de argila em g kg^{-1}, DS é a densidade do solo em g cm^{-3}, PT é a porosidade do solo em m^3 m^{-3}, CO é o carbono orgânico em Mg ha^{-1}. Os valores médios seguidos pela mesma letra não direm entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Tabela E2. Estatística descritiva da caracterização dos atributos físicos do solo na camada de 0,1 a 0,2 m para as áreas de estudo.

Camada 0,1 - 0,2 m	**Eucalipto**				
Variáveis	**Média**	**EPM**	**Mínimo**	**Máximo**	**CV** (%)
Conteúdo de Areia (g kg^{-1})	632,20 a	12,42	598,30	676,90	4,8
Conteúdo de Silte (g kg^{-1})	18,82 a	2,39	14,50	30,40	31,1
Conteúdo de Argila (g kg^{-1})	348,98 b	13,35	308,60	385,20	9,4
Densidade do Solo (g cm^{-3})	1,69 a	0,02	1,64	1,73	2,3
Porosidade Total (m^3 m^{-3})	0,38 b	0,006	0,36	0,40	3,7
Carbono Orgânico (Mg ha^{-1})	7,11 b	0,30	6,25	8,11	10,3
Camada 0,1 - 0,2 m	**Reflorestamento com Espécies Nativas**				
Variáveis	**Média**	**EPM**	**Mínimo**	**Máximo**	**CV** (%)
Conteúdo de Areia (g kg^{-1})	559,84 b	15,92	511,10	615,50	7,0
Conteúdo de Silte (g kg^{-1})	24,46 a	3,48	12,30	33,40	34,8
Conteúdo de Argila (g kg^{-1})	415,70 a	17,63	355,10	476,60	10,4
Densidade do Solo (g cm^{-3})	1,44 b	0,02	1,36	1,52	3,6
Porosidade Total (m^3 m^{-3})	0,47 a	0,008	0,45	0,50	4,0
Carbono Orgânico (Mg ha^{-1})	11,59 a	0,25	10,68	12,34	5,3
Camada 0,1 - 0,2 m	**Pastagem**				
Variáveis	**Média**	**EPM**	**Mínimo**	**Máximo**	**CV** (%)
Conteúdo de Areia (g kg^{-1})	612,68 a	11,37	579,40	663,40	4,5
Conteúdo de Silte (g kg^{-1})	21,56 a	3,29	15,30	37,40	37,4
Conteúdo de Argila (g kg^{-1})	365,76 ab	9,65	319,70	384,20	6,5
Densidade do Solo (g cm^{-3})	1,69 a	0,01	1,63	1,74	2,2
Porosidade Total (m^3 m^{-3})	0,38 b	0,006	0,37	0,41	3,7
Carbono Orgânico (Mg ha^{-1})	11,93 a	0,52	10,47	13,91	10,7

N= 6. EPM é erro padrão da média, Mínimo é o valor mínimo observado, Máximo é máximo valor obeservado, CV é coefiente de variação (%). Onde: Areia é o conteúdo de areia em g kg^{-1}, Silte é o conteúdo de silte em g kg^{-1}, Argila é o conteúdo de argila em g kg^{-1}, DS é a densidade do solo em g cm^{-3}, PT é a porosidade do solo em m^3 m^{-3}, CO é o carbono orgânico em Mg ha^{-1}. Os valores médios seguidos pela mesma letra não direm entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Tabela E3. Estatística descritiva da caracterização dos atributos físicos do solo na camada de 0,2 a 0,4 m para as áreas de estudo.

Camada 0,2 - 0,4 m		**Eucalipto**				
Variáveis	**Média**		**EPM**	**Mínimo**	**Máximo**	**CV** (%)
Conteúdo de Areia (g kg^{-1})	593,62	a	2,76	583,20	602,40	1,1
Conteúdo de Silte (g kg^{-1})	26,06	a	3,94	17,00	39,80	37,0
Conteúdo de Argila (g kg^{-1})	380,32	b	6,46	360,80	398,90	4,2
Densidade do Solo (g cm^{-3})	1,62	a	0,05	1,46	1,80	8,0
Porosidade Total (m^3 m^{-3})	0,41	b	0,019	0,34	0,46	11,8
Carbono Orgânico (Mg ha^{-1})	5,97	c	0,20	5,10	6,49	8,0
Camada 0,2 - 0,4 m	**Reflorestamento com Espécies Nativas**					
Variáveis	**Média**		**EPM**	**Mínimo**	**Máximo**	**CV** (%)
Conteúdo de Areia (g kg^{-1})	528,14	b	8,52	494,40	555,30	4,0
Conteúdo de Silte (g kg^{-1})	22,50	a	2,80	12,50	33,50	30,4
Conteúdo de Argila (g kg^{-1})	449,36	a	6,00	432,20	472,10	3,3
Densidade do Solo (g cm^{-3})	1,43	b	0,06	1,37	1,53	4,3
Porosidade Total (m^3 m^{-3})	0,46	a	0,009	0,43	0,49	5,0
Carbono Orgânico (Mg ha^{-1})	10,80	a	0,36	9,71	11,95	8,2
Camada 0,2 - 0,4 m	**Pastagem**					
Variáveis	**Média**		**EPM**	**Mínimo**	**Máximo**	**CV** (%)
Conteúdo de Areia (g kg^{-1})	585,78	a	7,74	567,90	614,30	3,2
Conteúdo de Silte (g kg^{-1})	16,48	a	1,55	12,80	23,00	23,0
Conteúdo de Argila (g kg^{-1})	397,74	b	6,88	371,50	413,60	4,2
Densidade do Solo (g cm^{-3})	1,64	a	0,07	1,51	1,74	4,5
Porosidade Total (m^3 m^{-3})	0,39	b	0,011	0,35	0,43	7,3
Carbono Orgânico (Mg ha^{-1})	9,11	b	0,26	8,38	10,11	6,9

N= 6. EPM é erro padrão da média, Mínimo é o valor mínimo observado, Máximo é máximo valor obeservado, CV é coefiente de variação (%). Onde: Areia é o conteúdo de areia em g kg^{-1}, Silte é o conteúdo de silte em g kg^{-1}, Argila é o conteúdo de argila em g kg^{-1}, DS é a densidade do solo em g cm^{-3}, PT é a porosidade do solo em m^3 m^{-3}, CO é o carbono orgânico em Mg ha^{-1}. Os valores médios seguidos pela mesma letra não direm entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.