



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “Júlio de Mesquita Filho”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

JAQUELINE BONFIM DE CARVALHO

**EQUAÇÕES ESTRUTURAIS APLICADAS AO ENTENDIMENTO DA DINÂMICA
DO CARBONO DO SOLO EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS NO CERRADO
BRASILEIRO**

**Ilha Solteira
2019**



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “Júlio de Mesquita Filho”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

JAQUELINE BONFIM DE CARVALHO

**EQUAÇÕES ESTRUTURAIS APLICADAS AO ENTENDIMENTO DA DINÂMICA
DO CARBONO DO SOLO EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS NO CERRADO
BRASILEIRO**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Agronomia. Especialidade: Sistema de Produção.

Alan Rodrigo Panosso
Orientador

Elton Gean Araújo
Co-orientador

**Ilha Solteira
2019**

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

C331e Carvalho, Jaqueline Bonfim de.
Equações estruturais aplicadas ao entendimento da dinâmica do carbono do solo em sistemas agroflorestais no cerrado brasileiro / Jaqueline Bonfim de Carvalho. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2019
83 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Sistema de Produção, 2019

Orientador: Alan Rodrigo Panosso

Coorientador: Elton Gean Araújo

Inclui bibliografia

1. AEE. 2. Estoque de carbono. 3. Modelagem. 4. Sistemas agrícolas complexos. 5. PLS-SEM.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: EQUAÇÕES ESTRUTURAIS APLICADAS AO ENTENDIMENTO DA DINÂMICA DO CARBONO DO SOLO EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS NO CERRADO BRASILEIRO

AUTORA: JAQUELINE BONFIM DE CARVALHO

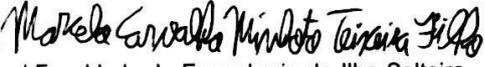
ORIENTADOR: ALAN RODRIGO PANOSSO

COORDENADOR: ELTON GEAN ARAUJO

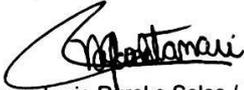
Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em AGRONOMIA, área: Sistemas de Produção pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. ALAN RODRIGO PANOSSO 

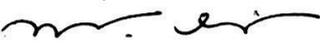
Departamento de Ciências Exatas / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal - UNESP

Prof. Dr. MARCELO CARVALHO MINHOTO TEIXEIRA FILHO 

Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. RAFAEL MONTANARI 

Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. NEWTON LA SCALA JUNIOR 

Departamento de Ciências Exatas / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal - UNESP

Prof. Dr. DANIEL DE BORTOLI TEIXEIRA 

Centro de Ciências Agrárias / Universidade de Marília - UNIMAR

Ilha Solteira, 01 de novembro de 2019

DEDICO

Á **Deus**, por sempre abençoar e iluminar minha vida, no qual sem sua graça jamais teria conseguido chegar até aqui.

Á minha família, em especial aos meus amados pais **Ednaldo Rocha de Carvalho** e **Evalita Rocha Bonfim de Carvalho**.

AGRADECIMENTOS

À Deus, com sua infinita bondade sempre iluminou meu caminhar, mesmo diante de todas as dificuldades e desafios, fez com que pessoas boas pudessem cruzar o meu caminho e me ajudar nesta jornada. Para todos os amigos, mestres e companheiros, gostaria de expressar, de forma simples, porém sincera, minha gratidão.

Aos meus pais, a quem devo o que sou hoje, agradeço a todos os ensinamentos sobre a vida, carinho, amor e dedicação a mim e aos meus irmãos Aline Bonfim de Carvalho e Emanuel Bonfim de Carvalho, no qual também sou grata por compartilhar o caminhar da vida comigo.

Ao Professor Alan Rodrigo Panosso, que me abraçou e, desde o começo acreditou no meu potencial e fez com que me tornasse uma profissional melhor, compartilhando não somente de seu vasto conhecimento, mas também de sua amizade. Obrigada pelo ombro amigo, orientações, incentivo e compreensão, você será sempre um espelho e fonte de inspiração para mim.

Ao Professor Elton Gean Araújo pela amizade, parceria, confiança e, principalmente por todas as horas de aulas e ensinamentos teóricos, onde aprendi um pouco a respeito dos fundamentos estatísticos utilizados nas análises do presente estudo. Agradeço imensamente por fazer parte deste trabalho, no qual não mediu esforços para contribuir. Também agradeço sua esposa Vânia, por me receber tão bem em sua casa.

Aos professores membros da Banca de Qualificação, Rafael Montanari e Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira Filho, mestres e amigos, cujas críticas e sugestões contribuíram, de forma significativa, para a melhoria do presente trabalho.

Aos professores da Banca de Defesa, Newton La Scala Júnior, Daniel de Bortoli Teixeira, Rafael Montanari e Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira Filho, mestres e amigos, cujas críticas e sugestões contribuíram, sendo importantes, para fortalecer e potencializar o presente trabalho.

Ao professor Marco Antonio Camillo de Carvalho pela amizade, tempo de convívio (mesmo que breve), experiência compartilhada e ensinamentos.

Aos demais professores e amigos do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, pelo tempo de convívio, experiência compartilhada e ensinamentos, em especial ao Professor Lázaro e as funcionárias da seção técnica de pós-graduação Márcia, Graciele e Thais.

Aos funcionários da Fazenda de Ensino, pesquisa e extensão, agradeço o apoio e suporte dado a nós durante a condução dos experimentos no campo.

Aos técnicos dos laboratórios de Fertilidade do solo, Física do Solo e Nutrição de plantas pelo auxílio nas análises realizadas, em especial os funcionários Carlinhos, Marcelo e Diego.

Aos meus amigos e companheiros dessa jornada, sem eles não seria possível desenvolver todo esse trabalho, em especial a equipe Panosso: Jean, Cris, Diego, Bruno, Laís, Fernando, Carla, Renan, Lud (Jaboticabal), Deise (Jaboticabal), Paulo (Jaboticabal). Agradeço o apoio, tempo, momentos compartilhados (muitos deles inusitados). Terão sempre minha eterna gratidão.

A minha amiga Poliana Rosa, por todo carinho, atenção, amizade, conselhos, dedicação e principalmente, pela confiança e incentivo.

Aos funcionários da Unesp, Campus de Ilha Solteira, minha gratidão a todos.

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

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (PROCESSO FAPESP nº. 16/03861-5) pelo apoio financeiro para a condução deste estudo.

RESUMO

O bioma Cerrado tem sofrido modificações nas últimas décadas, perdendo parte de sua cobertura original para culturas anuais, pastagens e florestas plantadas, tendo diferentes usos da terra. Neste trabalho, foram estudadas as interações entre os diferentes usos da terra em áreas do bioma Cerrado, bem como da dinâmica de carbono no solo e os fatores latentes formados pelos atributos físicos e químicos do solo, por meio de modelos de análise de equações estruturais, com auxílio das técnicas estatísticas multivariadas. Ensaios experimentais foram conduzidos na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão (FEPE/UNESP), localizada em Selvíria-MS: Floresta plantada de Eucalipto - *Eucalyptus camaldulensis* (EU); Floresta plantada de Pinus - *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (PI); Sistema silvipastoril (SI) com uma área contendo floresta plantada de Aroeira (*Myracrodruon urundeuva*) e capim Braquiária (*Brachiaria decumbens*, e Mata Nativa (MN). Foi estudado os efeitos dos atributos físicos: densidade do solo (Ds), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e químicos com ênfase especial nas propriedades relacionadas à dinâmica do carbono no solo: matéria orgânica do solo (MO), estoque de carbono do solo (EstC), estoque de nitrogênio do solo (EstN), relação carbono e nitrogênio (C/N) e o grau de humificação da matéria orgânica do solo (H_{LIFS}). A emissão de CO_2 do solo (FCO_2), umidade e temperatura do solo foram avaliados nas áreas durante três períodos distintos (definidos a partir do regime hídrico observado nas áreas) denominados de P1, P2 e P3, período de chuva, período de seca e transição, respectivamente, entre os meses de março e outubro do ano 2017. Diferenças significativas entre as médias ($P < 0,05$) foram observadas em que no período de chuva houve maior emissão de CO_2 nas áreas agrícolas, com maior média de FCO_2 na MN com $5,89 \mu mol m^{-2} s^{-1}$. A análise de equação estrutural indicou que o H_{LIFS} , MO e Ds, influenciaram negativamente a emissão de CO_2 no P1 e P3. Para Ca^{2+} , Mg^{2+} e P houve significância positiva para todos os períodos estudados. O uso da terra que apresentou os melhores resultados foi o SI, pois apresentou EstC semelhante a área de MN, com $21,35 Mg ha^{-1}$ e $21,57 Mg ha^{-1}$ respectivamente, porém menor FCO_2 que a MN, se mostrando um sistema agroflorestal viável para manutenção de carbono no solo e menor emissão de FCO_2 para atmosfera.

Palavras-chave: AEE. Estoque de carbono. Modelagem. Sistemas agrícolas complexos. PLS-SEM.

ABSTRACT

The Cerrado biome has undergone modifications in recent decades, losing part of its original cover to annual crops, pastures and planted forests, having different land uses. In this work, the interactions between the different land uses in areas of the Cerrado biome, as well as the soil carbon dynamics and the latent factors formed by the physical and chemical attributes of the soil through structural equation analysis models were studied, with the aid of multivariate statistical techniques. Experimental tests were performed at the Teaching, Research and Extension Farm (FEPE / UNESP), located in Selvíria-MS: Eucalyptus planted forest *Eucalyptus camaldulensis* (EU); Planted Pine Forest - *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (PI); Silvopastoral system (SI) with an area containing Aroeira (*Myracrodruon urundeuva*) and native grass (*Brachiaria decumbens*), and Mata Nativa (MN). The effects of physical attributes: soil density (Ds), macroporosity (Ma), microporosity (Mi) and chemical attributes were studied with special emphasis on properties related to soil carbon dynamics: soil organic matter (MO), soil carbon stock (EstC), soil nitrogen stock (EstN), carbon and nitrogen ratio (C / N), and the degree of soil organic matter (HLIFS). Soil CO₂ emission (FCO₂), soil moisture and temperature were evaluated in the areas during three distinct periods (defined from the water regime observed in the areas) called P1, P2 and P3, season rainfall, drought and transition, respectively, between March and October of 2017. Significant differences between the averages (P <0.05) were observed in that during the rainy season there was higher CO₂ emission in the agricultural areas, with higher FCO₂ average in the MN with 5.89 μmol m⁻² s⁻¹. Structural equation analysis indicated that HLIFS, MO and Ds negatively influenced CO₂ emissions in P1 and P3. For Ca²⁺, Mg²⁺ and P there was positive significance for all periods studied. The land use that presented the best results was the SI, since it presented an EstC similar to the MN area, with 21.35 Mg ha⁻¹ and 21.57 Mg ha⁻¹ respectively, but lower FCO₂ than MN, showing a viable agroforestry system for soil carbon maintenance and lower FCO₂ emission to atmosphere.

Keywords: EAA. Carbon stock. Modeling. Complex agricultural systems. PLS-SEM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tipos comuns de relações teóricas de um modelo AEE.....	26
Figura 2. Etapas da AEE	27
Figura 3. Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão (FEPE) da Faculdade de Engenharia Câmpus de Ilha Solteira (UNESP), localizada no município de Selvíria-MS. Delimitação em vermelho, com destaque para as áreas experimentais: Floresta plantada de Eucalipto – <i>Eucalyptus camaldulensis</i> (EU), Floresta plantada de Pinus - <i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i> (PI), Sistema silvipastoril (SI) com uma área contendo floresta plantada de Aroeira (<i>Myracrodruon urundeuva</i>) e capim Braquiária (<i>Brachiaria decumbens</i>) e Mata Nativa (MN).	36
Figura 4. Áreas experimentais. A) Floresta plantada de Pinus - <i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i> (PI), B) Sistema silvipastoril (SI) com uma área contendo floresta plantada de Aroeira (<i>Myracrodruon urundeuva</i>) e capim Braquiária (<i>Brachiaria decumbens</i>), C) Floresta plantada de Eucalipto - <i>Eucalyptus camaldulensis</i> (EU), D) Mata Nativa (MN).....	37
Figura 5. Precipitação pluvial (mm) e Temperatura média do ar (°C) durante os períodos de avaliação (P1 – “chuva”; P2 “seca”; P3 “transição”) das áreas experimentais.....	38
Figura 6. Pontos experimentais distribuídos nas áreas. A) 102 pontos na área de eucalipto. B) 86 pontos área de sistema silvipastoril.....	39
Figura 7. Sistema automatizado portátil de fluxo de CO ₂ do solo LI-COR (LI-8100).	40
Figura 8. Amostragem do solo e determinação de nutrientes. A) Amostragem de solo no campo. B) Determinação dos nutrientes em laboratório.....	41
Figura 9. Coleta de solo para análise física. A) Amostras indeformadas coletadas no campo. B) Determinação em laboratório dos atributos físicos.....	43
Figura 10. Etapas da modelagem de Equações estruturais.....	44
Figura 11. Médias de emissão de CO ₂ do solo para cada período analisado nas áreas de: eucalipto (EU); mata nativa (MN); pinus (PI) e silvipastoril (SI), no Período 1 (chuva); Período 2 (seca) e Período 3 (transição). Para cada uso, médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. Minúsculas em relação ao período, maiúsculas ao uso da terra.	47
Figura 12. Médias de temperatura do solo para cada período analisado nas áreas de: eucalipto (EU); mata nativa (MN); pinus (PI) e silvipastoril (SI), no Período 1 (chuva); Período 2 (seca) e Período 3 (transição). Para cada uso, médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. Minúsculas em relação ao período, maiúsculas ao uso da terra.	48
Figura 13. Médias de umidade do solo para cada período analisado nas áreas de: eucalipto (EU); mata nativa (MN); pinus (PI) e silvipastoril (SI), no Período 1 (chuva); Período 2 (seca) e Período 3 (transição). Para cada uso, médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. Minúsculas em relação ao período, maiúsculas ao uso da terra.	49
Figura 14. Diagrama de caminhos das variáveis analisadas do modelo interno e externo com suas respectivas cargas (modelo externo, de mensuração) e coeficientes de caminho (modelo interno, estrutural) para o fluxo nos três períodos analisados (F_P1; F_P2; F_P3) em relação às suas variáveis latentes DC_Ds e AQ. DC_Ds = fator latente atributos dinâmica do carbono + densidade do solo; AQ = fator latente atributos químicos do solo; F_P1 = emissão de CO ₂ do solo no período 1; F_P2 = emissão de CO ₂ do solo no período 2;	

F_P3 = emissão de CO₂ do solo no período 3. Setas em azul indicam efeito positivo, setas em vermelho indicam efeito negativo..... 59

Figura 15. Diagrama de caminhos das variáveis analisadas do modelo interno e externo com suas respectivas cargas (modelo externo, de mensuração) e coeficientes de caminho (modelo interno, estrutural) para a emissão total (FT) na área de Silvipastoril (SI) dentro dos períodos analisados em relação às suas variáveis latentes DC_Ds e AQ. DC_Ds = fator latente atributos dinâmica do carbono + densidade do solo; AQ = fator latente atributos químicos do solo; FT = emissão total no período analisado na área de SI. Setas em azul indicam efeito positivo, setas em vermelho indicam efeito negativo..... 62

Figura 16. Diagrama de caminhos das variáveis analisadas do modelo interno e externo com suas respectivas cargas (modelo externo, de mensuração) e coeficientes de caminho (modelo interno, estrutural) para a emissão total (FT) na área de Eucalipto (EU) dentro dos períodos analisados em relação às suas variáveis latentes DC_Ds e AQ. DC_Ds = fator latente atributos dinâmica do carbono + densidade do solo; AQ = fator latente atributos químicos do solo; FT = emissão total no período analisado na área de EU. Setas em azul indicam efeito positivo, setas em vermelho indicam efeito negativo..... 63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Médias e seus respectivos coeficientes de variação (%) dos atributos físicos e químicos do solo, profundidade 0-0,10 m, área de Eucalipto (EU), Mata nativa (MN), Pinus (PI) e Silvipastoril (SI).	52
Tabela 2. Medidas de ajuste da AEE dos modelos PLS-SEM, para os períodos analisados.	57
Tabela 3. Medidas de ajuste da AEE dos modelos PLS-SEM, para as áreas de Silvipastoril (SI) e Eucalipto (EU) dentro dos períodos analisados.	61

SUMÁRIO

1	CAPÍTULO 1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	12
1.2.	OBJETIVOS	14
1.2.1	Objetivos gerais.....	14
1.2.2	Objetivos específicos.....	14
1.3	REVISÃO DE LITERATURA.....	15
1.3.1	Cerrado brasileiro e diferentes usos da terra	15
1.3.2	Dinâmica do Carbono no solo	18
1.3.3	Estatística Multivariada.....	21
1.3.3.1	<i>Análise de modelos de equações estruturais (AEE) em ciência do solo</i>	<i>24</i>
2	CAPÍTULO 2. MODELAGEM DA EMISSÃO DE CO₂ DO SOLO EM ÁREAS AGROFLORESTAIS NO CERRADO BRASILEIRO A PARTIR DE EQUAÇÕES ESTRUTURAIS.....	30
2.1	INTRODUÇÃO	32
2.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	34
2.2.1	Local de estudo e áreas experimentais	34
2.2.2	Periodicidade das avaliações	37
2.2.3	Amostragem e avaliações físicas e químicas do solo	40
2.2.4	Forma de análise dos resultados.....	43
2.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
2.3.1	Emissão de CO₂, temperatura e umidade do solo	46
2.3.2	Atributos químicos do solo	51
2.3.3	Atributos físicos do solo.....	56
2.3.4	Análise de Equação estrutural	57
2.4	CONCLUSÕES	64
3	CAPÍTULO 3. CONSIDERAÇÕES FINAIS	66
	REFERÊNCIAS.....	67

1. CAPÍTULO 1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

Com aproximadamente 2 milhões de km² no território brasileiro, o Cerrado é um bioma que ocorre em várias regiões do país, detendo cerca de 5% da biodiversidade do planeta sendo reconhecido como a savana mais rica do mundo (BRASIL, 2019). Características do solo e do clima, quando construído uma fertilidade adequada do solo, favoráveis ao desenvolvimento de produtos agrícolas com altos valores econômicos atraem novos investidores, colocando esta região no foco de potenciais mudanças nos ecossistemas para a expansão das áreas de produção agrícola (GMACH *et al.*, 2018).

Com isso, esse bioma tem sofrido modificações nas últimas décadas, perdendo parte de sua cobertura original para culturas anuais, pastagens e florestas plantadas. Certamente essa ação antrópica tem contribuído para o aumento das emissões de carbono para a atmosfera e, conseqüente redução de C do solo. A perda de carbono do solo para a atmosfera ocorre na forma de dióxido de carbono (CO₂), e sua emissão é um dos principais agentes do efeito estufa adicional, que teve o aumento de sua concentração no decorrer dos anos, desde o período pré-industrial (ASSAD *et al.*, 2019).

De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC, 2019), os impactos recentes relacionados sobre o clima evidenciam a vulnerabilidade e a exposição significativas de vários ecossistemas à variabilidade climática. Impactos de tais extremos relacionados ao clima incluem interrupção da produção de alimentos e abastecimento de água, danos à infraestrutura, além de conseqüências para a saúde mental e bem-estar humano.

A emissão de CO₂ do solo (FCO₂) relaciona-se diretamente à atividade microbiana, decomposição dos restos vegetais, respiração das raízes, oxidação da matéria orgânica do solo e aplicações de calcário para correção do pH do solo (FUENTES *et al.*, 2006; ALMARAZ *et al.*, 2009). Além disso, o manejo do solo tem influência na quantidade de CO₂ emitido para atmosfera, logo o uso e manejo adequado do solo poderia, além de mitigar as emissões, remover grandes quantidades de CO₂ da atmosfera por meio do sequestro de carbono pela matéria orgânica do solo (FARINA *et al.*, 2016).

Para evitar, reduzir ou reverter a degradação do solo, as atividades relacionadas ao seu manejo podem ser selecionadas para mitigar o impacto e adaptar-se às mudanças climáticas. Os tipos e a intensidade do uso da terra e os impactos da mudança climática nos solos afetam seus estoques de carbono e sua capacidade de operar como sumidouros de carbono. Em solos agrícolas manejados, a degradação pode resultar em reduções nos estoques de carbono orgânico do solo, o que também afeta adversamente a produtividade agrícola e os reservatórios de carbono no solo (IPCC, 2019). De acordo com Brito *et al.* (2009), a importância da agricultura neste cenário não está relacionada apenas aos processos de perda de carbono do solo via respiração, mas também está relacionada ao seu significativo potencial de mitigação de carbono atmosférico.

Diante deste cenário e da relevância o entendimento das alterações do carbono no solo, uma vez que tal dinâmica é influenciada de maneira diferente pelos atributos físicos, químicos e manejo adotado do solo, faz-se necessário avaliar o grau de associação entre a dinâmica do carbono, expressa pela emissão de CO₂ e pelo estoque de carbono do solo, além dos atributos físicos e químicos do solo. Considerando o solo como um sistema complexo, resultante da interação de fatores geológicos, topográficos e climáticos, químicos, biológicos entre outros, que unidos formam indicadores que caracterizam o solo, é possível utilizar técnicas de análise multivariada para explorar mais eficientemente as correlações entre essas variáveis e determinar aqueles que mais colaboram para a caracterização do solo e/ou mudança do uso da terra (CARVALHO *et al.*, 2018).

Análise multivariada se refere a todas as técnicas estatísticas que simultaneamente analisam múltiplas medidas sobre indivíduos ou objetos sob pesquisa. Portanto, qualquer análise simultânea de mais do que duas variáveis a priori pode ser considerada como multivariada, sendo um conjunto de técnicas para análise de dados que está sempre em expansão e que engloba um vasto domínio de possíveis situações de pesquisa (HAIR *et al.*, 2009).

Pesquisas internacionais por meio do ferramental das técnicas multivariadas na área de ciência do solo têm sido frequentes, como as análises de componentes principais e correlação canônica aliadas à krigagem ordinária, entre variáveis do solo; análise de agrupamentos, análise fatorial e análise de equações estruturais, como poderosas ferramentas para estudar relações e inter-relações entre as

variáveis encontradas e resultados obtidos (JIANG; THELEN, 2004; BRAHIM *et al.*, 2011; LEON *et al.*, 2014; TRESCH *et al.*, 2019).

A despeito de todos os esforços, são poucas as pesquisas nacionais na área de ciência do solo, a fim de estudar a inter-relação distintos usos e manejos do solo e dinâmica do carbono com atributos do solo, por meio de modelos complexos, ou seja, multivariados. Diante deste cenário e da relevância o entendimento da dinâmica do carbono no solo, uma vez que tal dinâmica é influenciada de maneira diferente pelos atributos físicos e químicos do solo, dependendo do manejo adotado.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivos gerais

O objetivo geral desse trabalho foi avaliar o grau de associação entre a dinâmica do carbono, expressa pela emissão de CO₂ e pelo estoque de carbono do solo, e os atributos físicos e químicos do solo, em quatro usos da terra por sistemas agroflorestais na região do Cerrado de Mato Grosso do Sul (entre 20 e 30 anos de conversão), por meio da verificação e proposição de modelos de equações estruturais, visando a identificação e confirmação de fatores latentes e suas interdependências.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos foram: (i) quantificar, comparar e relacionar a emissão de CO₂ com os atributos químicos e físicos do solo em sistemas agroflorestais no Cerrado; (ii) avaliar a influência de diferentes usos e manejos agroflorestais na quantidade e qualidade do carbono, expressos por meio de seus acúmulos no solo e potenciais de estabilidade; (iii) propor modelos conceituais para o melhor entendimento da forma com a qual os fatores formados pelos atributos físicos e químicos do solo influenciam, de forma simultânea, as emissões de CO₂ e o acúmulo estoque de carbono do solo em áreas agroflorestais no Cerrado.

1.3 REVISÃO DE LITERATURA

1.3.1 Cerrado brasileiro e diferentes usos da terra

Sendo um dos biomas brasileiros mais ameaçados em função de sua conversão para usos alternativos do solo, o Cerrado possui elevada perda de sua cobertura vegetal nativa original para distintas utilizações. A dinâmica de substituição, que compreende tanto o desmatamento quanto os incêndios florestais, acarreta alteração da paisagem entre outros aspectos como: fragmentação dos habitats com extinção de espécies, invasão de espécies exóticas, poluição dos aquíferos, erosão dos solos, assoreamento dos rios e desequilíbrio no ciclo de carbono, entre outros problemas (MMA, 2011).

Estudos como os de Grecchi *et al.* (2014), reportaram que durante um período longo o Cerrado foi considerado impróprio para a agricultura devido a presença de solos menos férteis, porém, devido a avanços agronômicos e tecnológicos, incentivos governamentais, e características favoráveis a mecanização, e baixo preço da terra contribuíram para transformar o Cerrado numa região agrícola em expansão (GOEDERT, 1983; BICKEL; DROS, 2003). De acordo com Dias (2008) o Cerrado é considerado um dos biomas mais ameaçados do planeta, no qual sua história de uso e ocupação da terra revela hoje intensa ação antrópica no bioma, no qual o uso insustentável dos recursos ambientais trouxe elevado grau de degradação. O mesmo autor citou que nos últimos 40 anos, mais de 40% da área total do Cerrado foi completamente desmatada e convertida para uso antrópico acentuado. Vale ressaltar que a substituição da vegetação nativa por ecossistemas agrícolas podem alterar a qualidade e quantidade da matéria orgânica do solo, sendo que a intensidade dessas mudanças depende do tipo de solo que se está trabalhando, do clima e o uso da terra (FREITAS *et al.*, 2017).

Devido à mudança do cenário original e à perda do bioma, esse tem sido alvo de diferentes estudos e pesquisas, em buscas de alternativas para atenuar e recuperar o ambiente degradado. Dias *et al.* (2019) citaram que a expansão da agricultura no bioma Cerrado ocorre em detrimento da substituição de florestas nativas por pastagens e ou cultivos agrícolas. Os autores estudando diferentes sistemas de manejo agrícola sobre os atributos químicos do solo e frações da matéria orgânica do solo de um Latossolo em uma área de Hidrolândia - GO

encontraram resultados que demonstraram que os agroecossistemas são uma alternativa que reduzem a mobilização do solo e aumenta os insumos orgânicos, como o cultivo orgânico e o plantio direto sem mobilização, parecendo ser opções adequadas para a atividade agrícola no Cerrado brasileiro.

Avaliando diferentes usos da terra (vegetação nativa, plantio direto, pastagens, área reflorestada de *Eucalyptus urophylla*) em áreas de Latossolo no Cerrado, localizadas no nordeste brasileiro, Gmach *et al.* (2018) determinaram os estoques de carbono e frações químicas e físicas da matéria orgânica do solo, e constataram que a pastagem foi o uso da terra que apresentou melhores resultados em termos de manutenção de *pools* de C, conseqüentemente, poderia restaurar os estoques de C no solo, sendo uma alternativa de manejo viável para o solo.

Também foram estudados cinco diferentes sistemas agroflorestais (SAF), no bioma Cerrado, no qual Martinelli *et al.* (2019) avaliaram o potencial de aquecimento global (GWP) com emissão de gases para atmosfera. Estes autores identificaram que os SAF possuem valores negativos para GWP, além de que o elevado número de árvores frutíferas nos SAF contribui positivamente para os resultados, além de permitir que os agricultores consumissem e colhessem os frutos. Sant-Anna *et al.* (2017) pesquisaram as mudanças no carbono orgânico do solo em áreas com Latossolo que possuíam 22 anos de condução com pastagens, culturas ou sistemas de integração lavoura-pecuária próximo a Planaltina, Cerrado brasileiro e encontraram os maiores estoques de carbono em áreas com a integração lavoura-pecuária.

Em relação aos atributos biológicos e dinâmica da matéria orgânica em Latossolos na região do Cerrado Pragma *et al.* (2012) obtiveram resultados que mostraram que a substituição do cerrado nativo por culturais anuais sob o sistema plantio direto reduz os teores de carbono da biomassa microbiana e de nitrogênio total. Esses atributos são mais sensíveis às alterações no solo promovidas pela substituição do Cerrado nativo por culturas anuais.

A transformação do Cerrado em áreas agrícolas de cultivo em relação aos atributos do solo foi estudada por Hunke *et al.* (2015) no qual os pesquisadores concluíram que a conversão do uso da terra degradou as propriedades físicas do solo, deixando os solos cultivados mais suscetíveis à erosão superficial, com o potencial de erosão de nutrientes para a rede de córregos.

A dinâmica do carbono no solo em áreas de transição de pastagem de baixa produtividade para um sistema agroflorestal, usando uma vegetação nativa como referência, sob um Latossolo no Cerrado no Distrito Federal foi estudado por Coser *et al.* (2018). Os resultados dos autores propuseram que o sistema agroflorestal conseguiu atingir a meta de acumular C orgânico do solo e aumentar a qualidade da matéria orgânica do solo, mostrando sua potencialidade para ser usada como prática agrícola sustentável, além de proporcionar a melhoria da qualidade do solo e sequestro de carbono em curto prazo.

Siqueira Neto *et al.* (2011) citaram que a conversão de áreas nativas com o corte e queima de vegetação seguida do cultivo do solo resultam em mudanças na dinâmica da matéria orgânica do solo, com alterações nas emissões dos gases causadores do efeito estufa (GEE) da biosfera para a atmosfera. Os autores pesquisaram as relações entre os fluxos de GEE com a umidade, biomassa microbiana e as formas inorgânicas de N no solo com diferentes usos das terras no bioma Cerrado, no município de Rio Verde - GO. A umidade do solo foi a variável que apresentou maior correlação com o fluxo dos três GEE, e a pastagem foi à única situação em que os fluxos de CO₂ e N₂O apresentaram correlação com as quantidades de N-inorgânico. Outro fator observado foi que os resultados sugerem que os fluxos dos GEE foram dependentes do regime pluvial no bioma Cerrado.

Estudando as alterações no carbono orgânico, biomassa e atividade microbiana do solo em dois tipos de solo de Cerrado (Neossolo e Latossolo) sob diferentes manejos no entorno do Parque Nacional das Emas, Carneiro *et al.* (2008) encontraram resultados que mostraram que os sistemas de manejo do solo promoveram alterações nos atributos bioquímicos, nos dois solos estudados. Dentre os sistemas de manejos avaliados, a pastagem proporcionou melhorias nos atributos avaliados nos dois solos.

A dinâmica do carbono orgânico do solo devido às mudanças no uso da terra reduz as perdas de carbono orgânico no solo após a conversão do uso de sistemas convencionais de cultivo em monocultura, por exemplo. No entanto, esses estudos se concentram em uma camada superficial do solo. É necessário que, para melhor estimar a possível mitigação do aquecimento global com a agricultura no Cerrado, são necessários estudos mais abrangentes que analisem os GEE, além de um sistema integrado de modelagem para analisar a dinâmica do carbono orgânico do

solo, para possíveis mudanças no uso e manejo (BATLLE-BAYER; BATJES; BINDRABAN, 2010).

1.3.2 Dinâmica do Carbono no solo

O carbono (C) é um componente considerado básico para carboidratos, lipídeos, proteínas, DNA, e outros compostos orgânicos fundamentais para vida. O seu ciclo baseia-se no dióxido de carbono (CO₂), que compõe 0,038% do volume da troposfera e também está dissolvido na água. Ou seja, o CO₂ é considerado componente-chave do termostato da natureza. O CO₂ da atmosfera é fixado pelos produtores terrestres, que utilizam o processo de fotossíntese para transformá-lo em carboidratos complexos, como a glicose (C₆H₁₂O₆). As células nos produtores que consomem oxigênio, nos consumidores e decompositores, realizam, então, a respiração aeróbica. Tal processo quebra a glicose e outros compostos orgânicos complexos e converte o carbono novamente em CO₂ na atmosfera ou na água para ser reaproveitado pelos produtores. Esses processos fazem parte do ciclo do carbono, fazendo com ele circule na biosfera (BRAGA *et al.*, 2005; PEREIRA *et al.*, 2013)

Quando nos referimos ao solo, o C é um dos principais componentes da matéria orgânica do solo (MO) (GUEDES, 2009), e os seus estoques variam em função das taxas de adição, por resíduos vegetais e, ou, animais, e de perda, dentre elas, as decorrentes da erosão e da oxidação pelos microrganismos do solo (PEREIRA *et al.*, 2013). Os microrganismos do solo são heterogêneos e, mesmo sob forte limitação de substrato, podem continuar a explorar os recursos da MO para atender às suas demandas nutricionais (JOERGENSEN; WICHERN, 2018).

Assim, a forma de manejo adotado para as culturas agrícolas é de suma importância, pois interfere a quantidade e a qualidade da MO, influenciando na distribuição e composição química das frações (SHRESTHA *et al.*, 2008). Além disso, Souza *et al.* (2009) citaram que para compreender-se a dinâmica da matéria orgânica no solo deve-se levar em consideração o tempo, pois a evolução dos seus teores no solo e as respectivas interações consequentes das práticas de manejo empregadas tendem a ser lentas.

Considera-se que o carbono orgânico do solo seja perdido em sistemas de produção agrícola que utilizam sistemas convencionais de cultivos. Isso ocorre porque as práticas convencionais de cultivo reduzem a proteção física da MO, expondo-a a fatores de degradação, ocasionando à perda de C, juntamente com processos erosivos (RAZAFIMBELO *et al.*, 2008; ASSUNÇÃO *et al.*, 2019).

A qualidade da MO em um clima tropical são aspectos-chave que regulam as emissões de CO₂ e mantêm o ciclo C. O manejo do solo influencia o acúmulo de C, regulando o equilíbrio entre a mineralização e ou humificação da MO (ASSUNÇÃO *et al.*, 2019). De acordo com Miranda, Canellas e Nascimento (2007) os resíduos vegetais quando chegam ao solo, é rapidamente transformado, podendo ainda sofrer sequestro pela fração mineral ou transformação bioquímica através do processo de humificação. Tanto a humificação quanto a mineralização são dependentes da atividade biológica.

Em relação ao reservatório de C no solo, Lal (2002) cita que o aumento no estoque de MO é proveniente do sequestro de C atmosférico, via fotossíntese, sendo do ponto de vista ambiental, muito importante na mitigação da emissão GEE. Béghin-Tanneau *et al.* (2019) reportaram que o sequestro de C orgânico em solos agrícolas é considerado um meio de suavizar o aumento da concentração de CO₂ na atmosfera, garantir a produção de alimentos, e que a adição de matéria orgânica exógena nos solos é uma forma de sequestrar o C orgânico. Em áreas agrícolas, as alterações no estoque de carbono ocorrem, especialmente, na camada de 0 a 0,30 m do solo e são graças às modificações na quantidade e na qualidade das restituições orgânicas, às transferências da matéria orgânica sob forma solúvel ou sólida, que podem ocorrer por meio da erosão, escoamento superficial, lixiviação ou preparo do solo, entre outros processos (JENKINSON *et al.*, 1992; CHAN, 2001).

Portanto, o balanço de C no solo é dependente da relação entre as adições de C fotossintetizado pelas plantas como parte aérea e raízes, e as perdas de C para a atmosfera, resultantes da oxidação microbiana do C orgânico a CO₂ (COSTA *et al.*, 2006). Simon (2018) menciona que o CO₂ produzido é transportado para a atmosfera por meio da difusão e do fluxo de massa. A difusão consiste no movimento do gás da zona de maior concentração para a zona de menor concentração, e o fluxo de massa, que ocorre em função de um gradiente de pressão. Vários fatores influenciam os processos de produção e transporte de CO₂,

sendo, portanto, condicionadores da variabilidade espacial e temporal da emissão solo-atmosfera.

Essa emissão é chamada de efluxo de CO₂ (FCO₂) e o manejo do solo influencia a atividade microbiana como a decomposição do material vegetal e respiração das raízes (ALMARAZ *et al.*, 2009). La Scala Júnior *et al.* (2006) citam que o preparo do solo e o manejo de culturas interferem nas taxas metabólicas dos microrganismos, processos de decomposição dos resíduos vegetais e MO, que sofrem influência de outros fatores como a temperatura e umidade do solo.

Assim, a agropecuária se destaca como atividade antrópica que pode influenciar diretamente as emissões de GEE para atmosfera, já que as técnicas de manejo nos sistemas de produção podem conduzir a mudanças significativas no solo, induzindo a diminuição e o aumento dos estoques de carbono em seus horizontes superficiais (ARROUAYS *et al.*, 2002). As ações humanas relacionadas ao manejo dos solos podem, portanto, interferir nos fluxos de carbono entre os ecossistemas terrestres e a atmosfera (BERNOUX *et al.*, 2005).

Salvo os aspectos biológicos e químicos, os atributos físicos também podem ser considerados como indicadores eficientes da qualidade do solo, isso quando manejados de forma apropriada nos sistemas agrícolas, resultantes de manejos contínuos e adequado do solo (SIMON, 2018). De acordo com Pragana *et al.* (2012) os indicadores mais usados para a qualidade são a resistência mecânica a penetração do solo, conteúdo de água no solo, densidade do solo e macro e microporosidade; sobretudo, por variarem de acordo com o sistema de manejo e o monitoramento contínuo.

Segundo Freitas *et al.* (2017) quando a vegetação nativa é substituída por áreas agrícolas, podem ocorrer alterações na qualidade e na quantidade da MO. Gmach *et al.* (2018) evidenciam que a mudança no uso da terra da vegetação nativa para a produção de alimentos por exemplo, é a principal responsável pelas perdas de carbono da MO para atmosfera.

Nesse contexto, que a agricultura contribui com cerca de 14% das emissões antrópicas de GEE, sendo adicionado uma emissão de aproximadamente 17%, quando a mudança do uso da terra para a produção agrícola (IPCC, 2007; LYBBERT; SUMNER, 2012). Por consequência, a maneira como os solos são manejados relaciona-se diretamente com a quantidade de C-CO₂ que venha a ser emitido por este.

O FCO₂ oriundo de ações antrópicas é grande, acarretando diferenças entre sistemas com vegetação nativa e agroecossistemas (LA SCALA JÚNIOR *et al.* 2012). Logo a caracterização de como os principais usos e manejos dos solos do País afetam a dinâmica de emissão de carbono é de suma importância, principalmente em regiões de Cerrado, para determinar de forma quantitativa, como a ação antrópica em ambientes agrícolas afeta no clima do planeta.

1.3.3 Estatística Multivariada

De maneira geral, o pesquisador dispõe para análise de dados dois métodos estatísticos, a estatística univariada que olha as variáveis de maneira isolada e a multivariada que observa as variáveis de maneira conjunta. A estatística multivariada tem caráter exploratório, estudando o comportamento de três ou mais variáveis simultaneamente, auxiliando o pesquisador a tomar decisões em relação ao conjunto dados analisados. É uma ferramenta que processa grande massa de informações em conhecimento, expondo uma visão mais global do fenômeno em um número menor de variáveis (VICINI, 2005).

Análise multivariada se refere a todas as técnicas estatísticas que simultaneamente analisam múltiplas medidas sobre indivíduos ou objetos (acessos) sob investigação. Portanto, qualquer análise simultânea de mais do que duas variáveis a priori pode ser considerada como uma análise multivariada. Assim, é considerada um conjunto de técnicas para análise de dados que está sempre em expansão e que engloba um vasto domínio de possíveis situações de pesquisa. As técnicas mais estabelecidas são: análise de componentes principais e análise de fatores comuns, regressão múltipla e correlação múltipla, análise discriminante múltipla e regressão logística, análise de correlação canônica, análise multivariada de variância e covariância, análise conjunta, análise de agrupamentos, mapeamento perceptual, análise de correspondência, modelagem de equações estruturais e análise fatorial confirmatória (HAIR *et al.*, 2009).

No contexto das análises multivariadas, o solo podem ser considerado um sistema complexo, resultante da relação de fatores geológicos, topográficos, climáticos, entre outros, que juntos formam os aspectos (variáveis) que o caracterizam. Com a técnica da análise multivariada é possível explicar o máximo de

correlação entre as variáveis e descobrir quais delas corroboram mais para a sua caracterização e, ou, alterações devido ao uso e manejo deste (FREITAS *et al.* 2014). Várias pesquisas têm aplicado técnicas multivariadas para análise de dados de solos (PRAGANA *et al.*, 2012; CUNHA *et al.*, 2012; SILVA *et al.*, 2015; ARAÚJO *et al.*, 2018; CARVALHO *et al.*, 2018; BARBOSA *et al.*, 2019).

Um exemplo disso é o trabalho realizado por Nicodemo, Borges e Souza (2018) que avaliando o efeito de quatro sistemas de uso da terra (dois agroflorestais, pastagem e mata nativa) em São Carlos, SP, sobre as características físicas do solo como densidade do solo, macroporosidade, microporosidade, porosidade total e estabilidade de agregados utilizaram a análise multivariada empregando os métodos de Ward e a distância Euclideana com variáveis padronizadas. Os autores conseguiram separar três grupos, por similaridade do conjunto de atributos físicos do solo, sendo esses: mata nativa; sistema silviagrícola e um grupo composto pelo sistema silvipastoril e pastagem. Avaliando óxidos de ferro do solo para estimar o FCO_2 em uma área de cana-de-açúcar colhida verde no sudeste do Brasil, Bahia *et al.* (2014) utilizaram a estatística multivariada por meio da Análise de Componentes Principais (ACP). Os resultados mostraram que os dois primeiros componentes permitiram representarem em conjunto 73,4% da variabilidade total dos dados, tendo o primeiro componente essencialmente relacionado com as propriedades físicas e mineralógicas do solo.

Outros trabalhos como o de Leon *et al.* (2014) investigaram a variação temporal e espacial da emissão de CO_2 do solo em um ecossistema mediterrâneo limitado por água no México em períodos de precipitação e veranico. Como ferramenta foi utilizada a abordagem exploratória da estatística multivariada, como análise hierárquica, cluster e ACP. O objetivo dessas análises foi fornecer informações sobre a relação entre todas as variáveis durante a estação chuvosa e seca, e como os dados poderiam se agrupar dependendo da relevância de diferentes variáveis durante as diferentes estações do ano.

Uma abordagem da estatística multivariada, como a de Gelsomino e Azzellino (2011), baseada em um grande conjunto de dados de variáveis abióticas e bióticas foi usada para classificar quatro solos de uso distintos e contrastantes: solo agrícola com calcário, solo de pastagem temperada em terras altas, solo agrícola moderadamente ácido, e solo ácido com florestas de pinheiros. O conjunto de dados das variáveis físicas, químicas e bioquímicas do solo foi reduzido em

dimensionalidade por meio da ACP e os resultados indicaram que, além do uso da terra ou cobertura vegetal, as condições físico-químicas pedogenéticas alteradas com o tipo e a profundidade do solo são os principais fatores que regulam o tamanho, estrutura genética e a atividade microbiana.

Determinando quais atributos de um Latossolo Vermelho de Cerrado sob produção orgânica foram mais impactados por sistemas de cultivo compostos por feijão e milho, semeadura direta e preparo convencional Cunha *et al.* (2012) aplicaram a ACP para analisar os resultados obtidos. A análise permitiu identificar os atributos mais relevantes na discriminação dos diferentes tratamentos, sendo eles os atributos físicos, teores de matéria orgânica, atributos químicos, carbono orgânico total, da biomassa microbiana e respiração basal do solo. Com esses atributos foi possível discriminar os sistemas de cultivos em relação à referência. Adicionalmente os autores utilizaram a também outra análise multivariada que é análise de agrupamento.

Avaliando a variabilidade de atributos físicos e químicos do solo e produção de feijoeiro cultivado em sistema de cultivo mínimo com irrigação no município de Selvíria (MS) Silva *et al.* (2015) utilizaram a análise multivariada (método de agrupamento hierárquico e não hierárquico em conjunto à ACP) como ferramental metodológico, o que permitiu identificar três grupos, no qual a ACP explicou 86,3% da variabilidade total dos dados, os quais foram compostos por atributos físicos (densidade do solo, porosidade total, umidade gravimétrica e umidade volumétrica) que se evidenciaram com maior poder de explicação da variação da produtividade da cultura.

Foram estudados diferentes usos da terra (mata nativa, cana-de-açúcar e áreas reflorestada) em um Latossolo Vermelho distrófico no município de Santa Ernestina-SP, e os autores utilizaram como auxílio dos dados coletados a análise multivariada. As técnicas empregadas foram método de agrupamentos hierárquico e ACP. Ambas as análises permitiram identificar a formação de dois grupos, um formado pela mata nativa e o outro pela área em reflorestamento e a área cultivada com cana-de-açúcar. Os resultados permitiram elucidar que o uso intensivo do solo diminui sua qualidade tendo como referência a vegetação nativa (FREITAS *et al.*, 2014).

Com o objetivo de avaliar os atributos físicos e químicos do solo por meio de técnicas estatísticas multivariadas Oliveira *et al.* (2015) buscaram a caracterização

de solos sob diferentes usos (terra preta arqueológica, floresta tropical densa, pastagem, agrofloresta, cana-de-açúcar e mandioca) na região sul do Amazonas. Aplicaram como ferramenta multivariada as análises de agrupamento, método de Ward, como complemento da análise de agrupamento e a ACP. Por se tratar de locais cultivados, as áreas de mandioca, cana-de-açúcar e pastagem apresentaram características físicas e químicas similares. O uso das técnicas de análises multivariadas foi eficiente para verificar as similaridades ou as diferenças, com base nos atributos químicos e físicos do solo em cada área investigada.

Estudando a modelagem usando correlação com mínimos quadrados parciais (PLS) da variabilidade interanual da respiração global do solo a partir do clima e propriedades do solo, Chen *et al.* (2010) avaliou um compilado de 657 publicações sobre respiração anual do solo, representando áreas agrícolas, pastagens, florestas e ecossistemas de tundra. Os autores concluíram que, melhores estimativas da respiração global anual do solo seriam obtidas com o novo modelo impulsionado pelo clima e propriedades do solo juntos. Ressaltam ainda que pode haver melhorias significativas nas previsões anuais globais de respiração do solo, uma vez que as medições da respiração do solo, juntamente com as propriedades do solo e as produtividades do local, são amplamente tomadas nos ecossistemas em todo o mundo.

Por fim Araújo (2016) estudando a modelagem de dados de cana-de-açúcar com uma abordagem multivariada empregou a análise de componentes principais, análise fatorial e análise de equações estruturais para melhor compreensão dos dados referentes aos atributos do solo, componentes de produção, dinâmica e estoque de carbono do solo. O autor reportou que a despeito de todos os esforços, são poucos os estudos realizados por meio de modelos mais complexos, no que se refere à correlação de produtividade agrícola e dinâmica do carbono com atributos do solo.

1.3.3.1 *Análise de modelos de equações estruturais (AEE) em ciência do solo*

A análise de modelagem de equações estruturais (AEE) é uma família de modelos estatísticos que buscam explicar as relações entre múltiplas variáveis. Fazendo isso, ela examina a estrutura de inter-relações expressas em uma série de equações, semelhante uma série de equações de regressão múltipla (HAIR *et al.*

2009). Com a AEE é possível avaliar de forma conjunta, as relações de dependência e independência entre uma ou mais variáveis, sendo uma extensão de outras técnicas multivariadas. Tal procedimento combina as técnicas de regressão e análise fatorial (ARAÚJO, 2016). A distinção entre a AEE e outras técnicas multivariadas é o uso das relações separadas para cada conjunto de variáveis dependentes. Em termos simples, AEE estima uma série de equações de regressão múltipla separadas, mas interdependentes, simultaneamente pela especificação do modelo estrutural usado pelo programa estatístico. Inicialmente, o pesquisador se baseia na teoria e experiências previamente adquiridas e nos objetivos da pesquisa para distinguir quais variáveis independentes preveem cada variável dependente (HAIR *et al.* 2009). Contudo, é necessário propor um modelo geral, sendo composto de dois submodelos, o qual um submodelo é relacionado a variáveis latentes ou não observáveis (fatores) e outro relacionado às variáveis observadas e as relações com variáveis latentes; no qual desenvolvem métodos de estimação para a estrutura de variância e covariância do modelo geral (BISTAFFA, 2010).

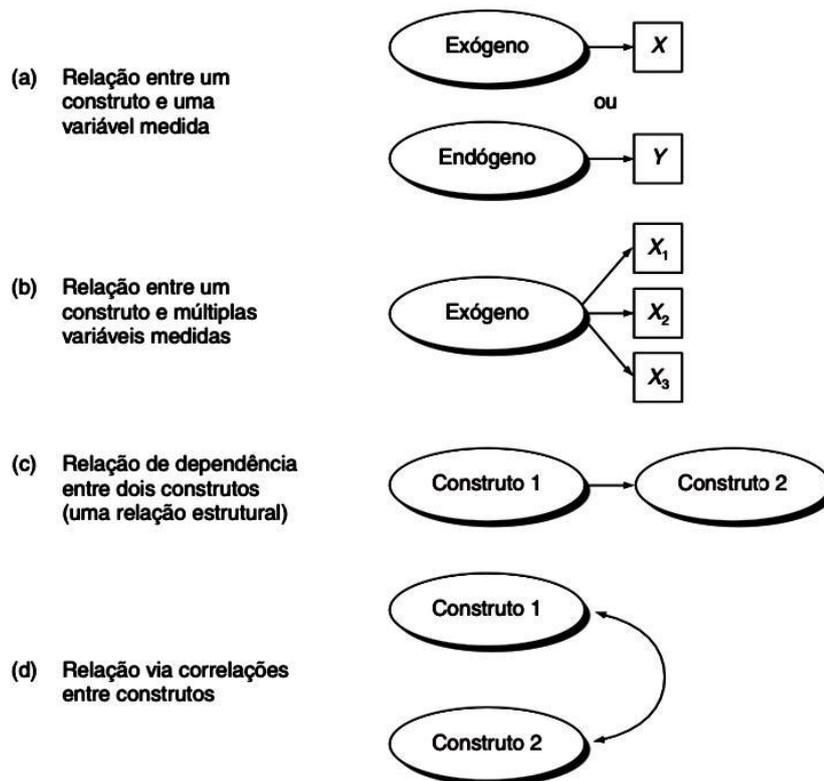
Sendo uma técnica de modelagem generalizada, Marôco (2010) cita que a AEE tem como objetivo testar a validade de modelos teóricos, os quais definem relações causais, hipotéticas, entre variáveis. Tais relações são medidas pelos parâmetros do modelo, os quais representam o tamanho do efeito das variáveis independentes sobre as variáveis dependentes.

A AEE pode ser diferenciada da modelagem linear clássica, graças algumas características do modelo, as quais: os modelos são construídos com variáveis não mensuráveis, denominadas variáveis latentes ou construtos; os modelos levam em conta erros de medição para cada variável observada, os quais são parâmetros que podem ser estimados e testados; os modelos são, no geral ajustados por matrizes de índices de inter-relacionamento, que são as matrizes de covariâncias ou correlações, entre todos os pares de variáveis observadas (RAIKOV; MARCOULIDES, 2006).

O modelo por sua vez é constituído de uma série de parâmetros estruturais e variáveis, sendo que os parâmetros estruturais medem a associação entre as variáveis inclusas no modelo, que são as variáveis observadas ou manifestas e as variáveis latentes ou construtos (não observadas diretamente). Em referência, à sua função no modelo de equações estruturais, as variáveis (quer latentes quer manifestas) podem ser classificadas em variáveis independentes ou exógenas,

quando não são influenciadas por outra variável no modelo; e variáveis dependentes ou endógenas, quando a variação dessas variáveis é explicada por variáveis presentes no modelo (MARÔCO, 2010).

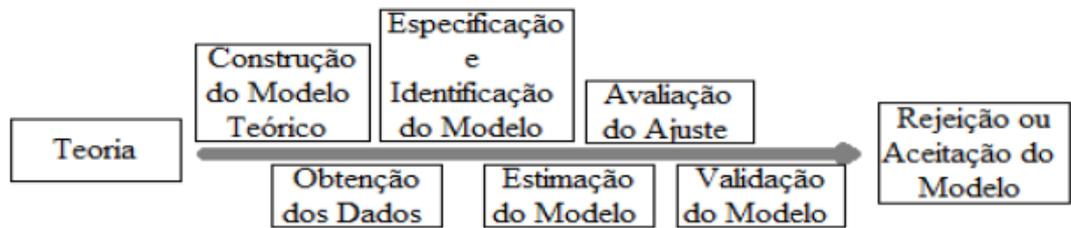
Figura 1 - Tipos comuns de relações teóricas de um modelo AEE.



Fonte: Hair *et al.* (2009).

Araújo (2016) reforça que na AEE o modelo teórico é o motor da análise, diferentemente da análise estatística clássica, em que os dados são a fonte principal. Para tanto, a primeira etapa neste caso, é a construção do modelo teórico, exigindo do pesquisador vasta revisão na literatura, a fim de compreender o fenômeno em estudo, bem como seus relacionamentos, por meio do modelo operacionalizado.

Figura 2 - Etapas da AEE



Fonte: Marôco (2010).

Após ser definido o modelo teórico e obtidos os dados, é necessário especificar e identificar o modelo teórico (ARAÚJO, 2016). Marôco (2010) determina a especificação do modelo como: decidir que variáveis manifestas operacionalizam que variáveis latentes, que relações causais entre variáveis latentes e/ou manifestas devem ser incluídas/excluídas, que associações (não causais) devem ser incluídas/omitidas do modelo, que erros ou resíduos devem ser correlacionados.

Em ciência do solo Carvalho *et al.* (2018) utilizaram a abordagem multivariada dos atributos do solo na caracterização do uso da terra no sul da Amazônia brasileira. Os quatro usos da terra avaliados no município de Alta Floresta (MT) foram: mata amazônica nativa, pastagem degradada, pastagem manejada renovada, área de preservação permanente em recuperação, área cultivada com arroz, área com cana-de-açúcar forrageira e área reflorestada com eucalipto. A abordagem multivariada utilizada foi: análise de agrupamentos hierárquicos e não hierárquicos, análise de componentes principais, correlação canônica e modelagem de equações estruturais (AEE). A abordagem multivariada para análise de atributos do solo mostrou-se eficiente na identificação de ações antrópicas nas áreas em comparação a condições naturais. Em especial a AEE indicou o fator latente do atributo químico teve influência três vezes maior do que o fator latente do atributo físico sobre o fator latente do atributo biológico. Portanto os autores citam que, ações antrópicas, principalmente a calagem, modificaram a qualidade do solo, reduzindo a acidez do solo, afetaram os microrganismos florais.

Estudando o efeito da combinação de plantio direto e adubação mineral na mineralização do carbono e nitrogênio do solo, Vazquez *et al.* (2019) utilizaram a AEE para avaliar o efeito direto e indireto de cada prática agrônômica nos processos biogeoquímicos do solo e determinar as relações causais entre as variáveis

estudadas. A AEE indicou que a mineralização de C do solo foi afetada somente pelos manejos agrícolas, enquanto a mineralização líquida de N foi aumentada pela adoção de plantio direto e calagem. Além disso, a AEE revelou que, o impacto da prática de lavoura na mineralização de C e N foi mediado por mudanças na biomassa microbiana, o que destaca a importância das inclusões de parâmetros microbianos nos estudos de ciclagem de nutrientes e como são afetados por práticas agronômicas.

Analisando a decomposição da serapilheira impulsionada pela fauna do solo, diversidade de plantas e manejo do solo em 170 hortas urbanas na cidade de Zurique, Suíça, Tresch *et al.* (2019) aplicaram a AEE para investigar os efeitos ambientais diretos e indiretos e as práticas de manejo na decomposição da serapilheira e na qualidade dos resíduos de serapilheira. A AEE permitiu elucidar que a diversidade de espécies da fauna do solo influenciou positivamente a decomposição sendo afetada pela riqueza de espécies de plantas nos jardins, e negativamente pelo teor de antimônio do solo, explicando no total 39% da variação na riqueza de espécies. Solos de jardim com maior conteúdo de biomassa microbiana e bactérias também apresentaram atividade microbiana elevada que afetou positivamente a decomposição da serapilheira. Ou seja, a riqueza de espécies de plantas influenciou indiretamente a decomposição de serapilheira por meio do aumento de espécies de fauna do solo e atividade microbiana.

Testando a associação entre a diversidade bacteriana do solo e armazenamento do solo Yang, Dou e An (2018) usaram forma adicional a AEE. Foi possível observar com a AEE que a diversidade bacteriana do solo esteve intimamente relacionada com o armazenamento de C do solo, sendo diretamente afetado pelas propriedades do solo e indiretamente afetado pela diversidade bacteriana do solo. Investigando a contribuição das variáveis ambientais (localização geográfica, clima, tipo de solo e tipo de uso da terra) para o acúmulo de carbono orgânico e inorgânico no solo nas camadas de 0 -1 m também no Planalto de Loess na China, Zhao *et al.* (2019) aplicaram a AEE para distinguir os efeitos diretos dos indiretos de fatores no acúmulo de carbono do solo com base nas estruturas de covariância. Os resultados mostraram que a temperatura e umidade do ambiente foram os principais controles da variação da densidade do carbono orgânico do solo.

Fei *et al.* (2018) estudaram a perda de carbono orgânico e pastagens degradadas no planato Qinghai-Tibet, China, investigando mais precisamente a

vegetação, o microclima do solo, as propriedades do solo e a respiração de pastagens com diferentes graus de degradação, utilizando a AEE para compreensão dos dados. Os resultados obtidos sugeriram que as mudanças nos fatores abióticos do solo, como a densidade do solo e o pH, são os principais fatores que controlam a mudança do SOC com a degradação da terra.

De acordo com Eisenhauer *et al.* (2015) que estudaram a AEE em ecologia do solo, a AEE é particularmente adequada para fornecer o quadro estatístico para direcionar o caminho, tanto testando hipóteses estatísticas que representam previsões de hipóteses mecanicistas, como também gerando novas hipóteses que poderiam ser testadas após o desenvolvimento de métodos experimentais inovadores. Concluem ainda que a AEE é mais do que outra ferramenta, ao contrário, é uma maneira alternativa de conduzir a ciência.

De acordo com Angelini *et al.* (2016) é difícil prever um grande número de atributos do solo simultaneamente, preservando as relações entre elas, e que os modelos de previsão predominantes usam o conhecimento pedológico apenas de uma maneira muito rudimentar. Diante desses impasses, os mesmos autores investigaram a AEE de modo a distinguir as variáveis endógenas e exógenas, onde na aplicaram para variáveis endógenas as propriedades do solo e as últimas os fatores externos formadores do solo (clima, relevo e organismos) com um estudo de caso nos pampas argentinos. Concluem que a AEE pode ser utilizada para incluir explicitamente o conhecimento pedológico na previsão de propriedades do solo e na modelagem de suas inter-relações. Isto preenche a lacuna entre os métodos empíricos e mecanicistas para a modelagem da paisagem do solo, sendo uma ferramenta que pode ajudar a produzir mapas de solo pedologicamente mais sólidos. Finalmente Bardgett e van der Putten (2014) reforçam que novos modelos teóricos devem ser desenvolvidos para compreender os direcionadores da composição das comunidades abaixo do solo, bem como seus múltiplos impactos nos processos ecossistêmicos e na biodiversidade acima do solo.

2. CAPÍTULO 2. MODELAGEM DA EMISSÃO DE CO₂ DO SOLO EM ÁREAS AGROFLORESTAIS NO CERRADO BRASILEIRO A PARTIR DE EQUAÇÕES ESTRUTURAIS

Mudanças na cobertura da terra têm contribuído para o aumento dos gases do efeito estufa (GEE) na atmosfera, fazendo com que o solo atue como fonte, ao invés de um sumidouro, de GEE atmosférico, especialmente devido à perda de carbono do solo. O objetivo deste trabalho foi modelar o comportamento da emissão de CO₂ do solo (FCO₂) através da análise de equações estruturais em estações contrastantes em diferentes usos da terra no Cerrado brasileiro. Os usos da terra foram: floresta plantada de eucalipto (EU), floresta plantada de pinus (PI), sistema silvipastoril (SI – consórcio aroeira e capim braquiária), e mata nativa (MN). Foram estudados os efeitos dos atributos físicos e químicos com ênfase especial nas propriedades relacionadas à dinâmica do carbono no solo (MO, EstC, EstN, C/N, H_{LIFS}). O FCO₂, umidade e temperatura do solo foram avaliados em campo durante três períodos distintos (definidos a partir do regime hídrico observado nas áreas) denominados de P1, P2 e P3 (período de chuva, período de seca e transição, respectivamente), entre os meses de março e outubro do ano 2017. Diferenças significativas (P <0,05) foram observadas quando comparadas as propriedades nos períodos analisados, com maior emissão na estação chuvosa (P1). Em SI foi observado menor perda de carbono via FCO₂ quando comparado a MN, cerca de 42% a menos em todos os períodos. A análise de equações estruturais explicou o FCO₂ negativamente a DC_DS (H_{LIFS}, MO e Ds) no P1 e P3, com coeficientes -0,304; e -0,234, respectivamente. Em relação aos atributos químicos (Ca²⁺, Mg²⁺ e P) houve relação positiva (p <0,05) com a FCO₂ para todos os períodos analisados. Um modelo geral foi determinado para explicar como a dinâmica do FCO₂ nas áreas, permitindo elucidar que a qualidade da matéria orgânica influencia principalmente a emissão de CO₂ do solo nos usos da terra e condições climáticas.

Palavras-chave: Mudanças climáticas. Respiração do solo. Uso da terra. Métodos multivariados.

ABSTRACT

These changes in land cover contributed to the increase of greenhouse gases (GHG) emission resulting as soil being a source, instead of a sink, of atmospheric GHG, especially due to soil carbon loss. The objective of this work was to model the behavior of soil CO₂ emission (FCO₂) through the analysis of structural equations at contrasting seasons in different soil uses in the Brazilian Cerrado. The land uses were: forest planted with eucalyptus (EU), forest planted with pine (PI), silvipastoral system (SI - aroeira consortium and brachiaria grass), and native forest (MN). Were studied the effects of the physical and chemical attributes with especial emphasis to properties related to the soil carbon dynamics (MO, EstC, EstN, C/N, H_{LIFS}). The FCO₂, soil moisture and temperature were also evaluated at three different periods (defined as based on the water regimes observed in the studied area), referred as P1, P2 and P3 (rainy season, dry season and transition period respectively), between the months of March and October of the year 2017. Significant differences (P <0.05) were observed when properties in the analyzed periods were compared, with higher emission in the rainy season (P1). In the SI site, lower carbon loss was observed via FCO₂ when compared to MN, about 42% lesser in all studied period. The analysis of structural equations explained FCO₂ negatively related to - DC_DS (H_{LIFS}, MO and Ds) in P1 and P3 with coefficients -0,304; and -0,234 respectively. Regarding chemical attributes (Ca²⁺, Mg²⁺ and P), there was a positive relationship (p <0.05) with FCO₂ in all periods analyzed. A general model was determined to explain as FCO₂ dynamics in both areas, allowing to elucidate that the quality of the organic matter mostly influences the emission of CO₂ from the soil in that land uses and climate conditions. .

Keywords: Climactic changes. Soil respiration. Land use. Multivariate techniques.

2.1 INTRODUÇÃO

As concentrações de gases do efeito estufa (GEE), especialmente o dióxido de carbono (CO_2), têm aumentado constantemente desde o ano de 1900. O bioma Cerrado é a maior região de savana tropical do continente Sul Americano, e inclui grande parte do Brasil Central, cerca de 24% de todo território do país. Nele são encontrados diversos tipos de solos, relevos e fitofisionomias, formado por florestas, savanas e áreas campestres (BRASIL, 2011).

Nas últimas décadas vêm ocorrendo mudanças aceleradas nesse cenário, com substituição de extensas áreas de Cerrado original por culturas anuais e pastagens, contribuindo para o aumento das emissões de gases do efeito estufa (GEE) para a atmosfera (Paiva *et al.* 2011; Roitman *et al.* 2018), principalmente o CO_2 . Vários autores tem estudado como a mudança do uso da terra afeta a dinâmica do carbono do solo, seja por medidas de variação no estoque ou perdas via emissão de CO_2 do solo nessas áreas (BUTLER *et al.*, 2012; PEIXOTO *et al.*, 2017; COSER *et al.*, 2018; GMACH *et al.*, 2018).

Utilizar as medidas de emissão de CO_2 como indicativo futuro das perdas de carbono no solo é uma estratégia interessante melhorando a compreensão da ciclagem de carbono do solo (PHILLIPS *et al.*, 2017), sendo fundamental para a tomada de decisões como, por exemplo, quais opções de manejo e uso da terra resultariam na mitigação dessas emissões. Segundo Trumbore (2006) no sistema terrestre a principal transferência de C para a atmosfera é pela respiração do solo. Esse fenômeno varia espacialmente e temporalmente, em função de diversos fatores abióticos, como temperatura e umidade do solo, acidez potencial, teor de matéria orgânica do solo e entre outros (SOTTA *et al.*, 2006; HAN *et al.*, 2007; FARHATE *et al.*, 2018).

Em âmbito do processo de produção do gás no interior do solo, FCO_2 é o resultado direto da atividade microbiana, a partir da decomposição dos restos vegetais, da respiração das raízes, da oxidação da matéria orgânica do solo aplicações de calcário em áreas agrícolas (FUENTES *et al.*, 2006; ALMARAZ *et al.*, 2009). Além dos fatores biológicos e químicos, os atributos físicos do solo como a porosidade e a densidade do solo associam-se ao fenômeno de FCO_2 ,

principalmente quanto ao processo de transporte relacionado a entrada de O₂ e saída de CO₂ produzido no interior do solo para a atmosfera.

Como principal reservatório de carbono em um ecossistema, o solo possui o carbono como um componente dinâmico e vulnerável ao manejo realizado. Seu conteúdo encontra-se estável sob condições de vegetação nativa, porém com a retirada da vegetação natural e posteriores operações de preparo do solo ocorre uma redução no seu teor, no qual um ecossistema pode se transformar de sumidouro a fonte de carbono para a atmosfera (DALAL; MAYER, 1986; LAL, 2004). Assim, a conversão da vegetação natural para agricultura é a mudança mais significativa no uso da terra em escala global. Essa conversão leva a mudanças na dinâmica dos nutrientes do solo e aumenta as emissões de CO₂ (ALAVAISHA; MANZONI; LINDBORG, 2019; LI *et al.*, 2018; FRANCAVIGLIA *et al.*, 2014).

Por outro lado, o manejo apropriado pode recuperar parte do carbono do solo em áreas agrícolas. Freitas *et al.* (2017) avaliaram a qualidade da matéria orgânica em cronossequências do cultivo de *Jatropha* spp. (pinhão-manso) em diferentes condições edafoclimáticas e constataram que o cultivo proporcionou um aumento nos estoques de carbono e nas concentrações de C nas frações de MO, e aumento nos teores de C e N na biomassa microbiana de acordo com o maior tempo de desenvolvimento, indicando o potencial de sistemas de longo prazo para melhorar a qualidade da matéria orgânica do solo. Panosso *et al.* (2011) analisando distintos manejos de acordo com o corte para a cana-de-açúcar encontraram maiores emissões na área de cana-de-açúcar queimada em comparação com a área de cana-de-açúcar crua.

Logo, práticas de uso e manejo adequado da terra podem remover grandes quantidades de CO₂ da atmosfera por meio do acúmulo de carbono pela matéria orgânica do solo (FARINA *et al.*, 2016), se adotado uma condução racional em sistemas agroflorestais, já que há uma necessidade pela busca de práticas cada vez mais sustentáveis. De acordo com Balbino, Barcellos e Stone (2011) a adoção de sistemas de produção arborizados se amplia no Brasil, porém carece de informações a respeito das alterações nos atributos do solo, com usos da terra em sistemas agroflorestais (NICODEMO; BORGES; SOUZA, 2018).

Em relação à grandeza de variáveis que se relacionam ao uso da terra, técnicas para análise de dados como a estatística multivariada têm sido utilizadas por diversos autores. Entre as análises que são empregadas em ciências do solo

temos as análises de componentes principais (ACP) e correlação canônica (CC), muitas vezes aliadas à krigagem ordinária (KO), entre os atributos da produtividade vegetal com os atributos do solo; análise fatorial (AF) e análise de equações estruturais (AEE), como poderosas ferramentas para estudar relações e inter-relações entre os atributos do solo (BARBOSA *et al.*, 2019; CARVALHO *et al.*, 2018; ARAÚJO *et al.*, 2018). Brahim *et al.* (2011), desenvolveram dois modelos para o teor de carbono orgânico em solos argilosos e arenosos na região semiárida do Mediterrâneo (Tunísia), utilizando a AEE, concluindo que, para solos argilosos, o acúmulo de carbono orgânico foi controlado pelos atributos químicos do solo (pH, MO, teor de nitrogênio) e a densidade do solo e em solos arenosos, o acúmulo de carbono orgânico foi controlado pelos atributos químicos (pH e MO). Os autores concluem que tais resultados indicam que atributos físicos e químicos do solo apresentam efeitos independentes no teor de carbono orgânico do solo nessas áreas.

A hipótese de nossa pesquisa é que as complexas relações entre FCO_2 e demais atributos do solo podem ser modelada a partir de equações estruturais globais. Dentro desse contexto o objetivo desse trabalho foi avaliar o comportamento do FCO_2 em diferentes períodos sazonais, estabelecendo a inter-relação dos atributos e a emissão de CO_2 .

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Local de estudo e áreas experimentais

As áreas experimentais utilizadas nesse trabalho são pertencentes à Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão (FEPE) da Faculdade de Engenharia Câmpus de Ilha Solteira (UNESP), localizada no município de Selvíria-MS, à margem direita do rio Paraná, com coordenadas $20^{\circ} 22' 31''$ de latitude Sul e $51^{\circ} 24' 12''$ de longitude Oeste, com 363 m acima do nível do mar (Figura 3). O clima da região de acordo com o Sistema Internacional de Köppen é classificado como tropical úmido (Aw), com estações chuvosas no verão e seca no inverno, apresentando médias anuais de precipitação 1370 mm, umidade relativa do ar entre 70 e 80% e média de temperatura de $23,5^{\circ}\text{C}$. O solo nas áreas experimentais foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico, típico argiloso (DEMATTÊ, 1980; EMBRAPA, 2018).

Originalmente, as áreas apresentavam cobertura vegetal predominantemente do tipo Cerrado, isso até meados da década de 70, sendo que no ano 1978 houve o desmatamento do Cerrado para a condução de culturas anuais como a soja, o milho, o algodão e adubos verdes, até o ano de 1986. Após esse período as áreas experimentais foram destinadas a diversos usos, que além da condução de culturas anuais, foram cultivadas florestas plantadas (pinus, eucalipto, mata ciliar com espécies nativas) e pastagens (CAVENAGE *et al.*, 1999).

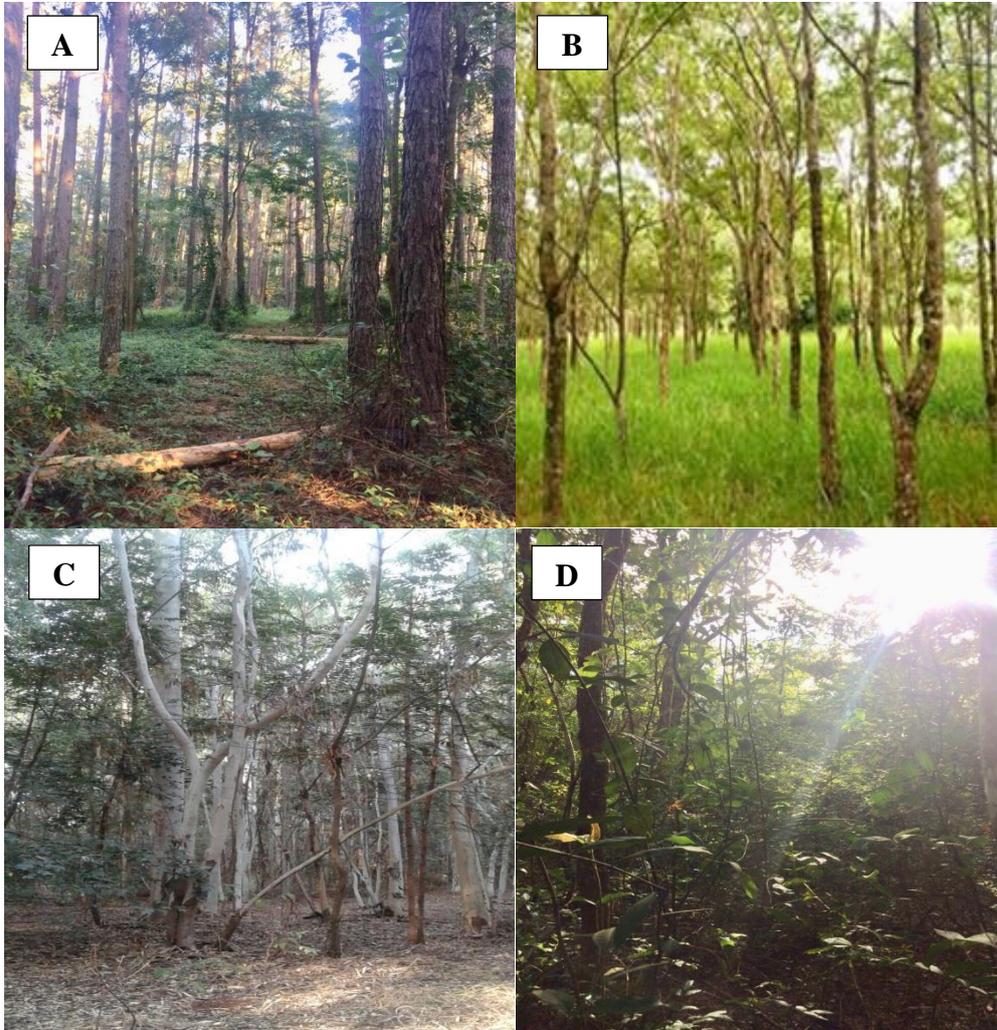
Dentre as áreas convertidas em diversos usos, as utilizadas nesse trabalho foram: Floresta plantada de Eucalipto - *Eucalyptus camaldulensis* (EU), Floresta plantada de Pinus - *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (PI) e Sistema silvipastoril (SI) com uma área contendo floresta plantada de Aroeira (*Myracrodruon urundeuva*) integrado com capim Braquiária (*Brachiaria decumbens*). Como área de referência, ou seja, servindo como linha de base para o trabalho foi avaliado uma área de bioma Cerrado, considerada de transição entre os biomas Mata Atlântica e Cerrado, denominada de mata nativa (MN), representando a condição anterior às mudanças do uso da terra em relação aos diferentes manejos na fazenda experimental (Figura 3 e 4).

Figura 3. Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão (FEPE) da Faculdade de Engenharia Câmpus de Ilha Solteira (UNESP), localizada no município de Selvíria-MS. Delimitação em vermelho, com destaque para as áreas experimentais: Floresta plantada de Eucalipto – *Eucalyptus camaldulensis* (EU), Floresta plantada de Pinus - *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (PI), Sistema silvipastoril (SI) com uma área contendo floresta plantada de Aroeira (*Myracrodruon urundeuva*) e capim Braquiária (*Brachiaria decumbens*) e Mata Nativa (MN).



Fonte: Google Earth (2019).

Figura 4. Áreas experimentais. A) Floresta plantada de Pinus - *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (PI), B) Sistema silvipastoril (SI) com uma área contendo floresta plantada de Aroeira (*Myracrodruon urundeuva*) e capim Braquiária (*Brachiaria decumbens*), C) Floresta plantada de Eucalipto - *Eucalyptus camaldulensis* (EU), D) Mata Nativa (MN).



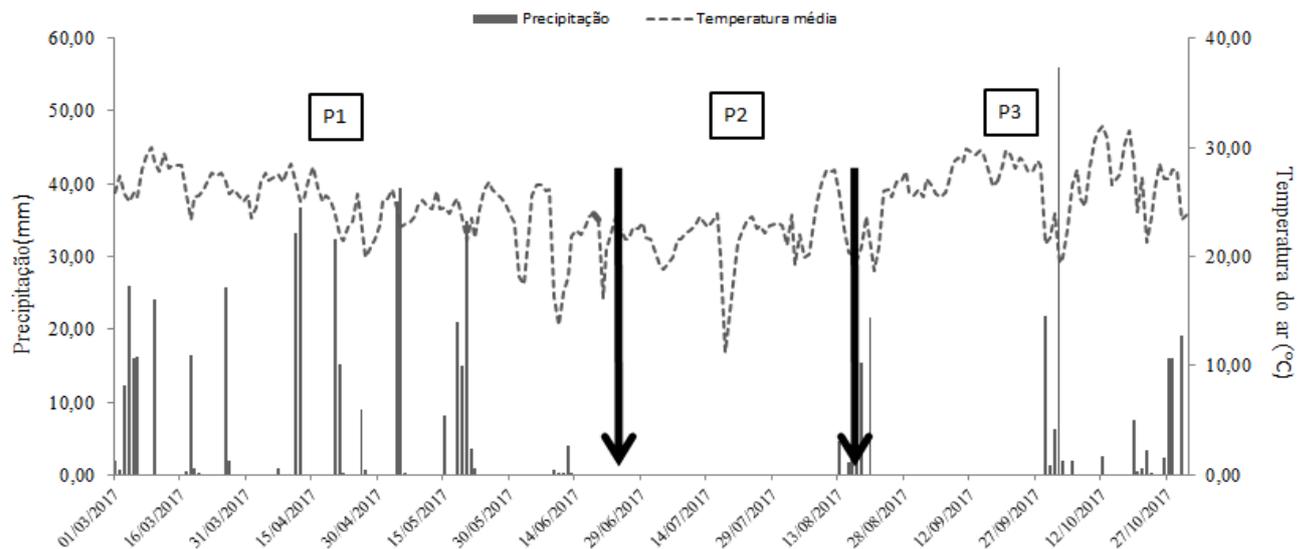
Fonte: Próprio autor.

2.2.2 Periodicidade das avaliações

No início de março de 2017 foram delimitados 15 pontos amostrais em cada uma das áreas experimentais. O primeiro monitoramento foi iniciado no dia 29 de março de 2017 e a partir daí, as demais avaliações foram realizadas com uma periodicidade quinzenal, pois eram evitadas avaliações em dias com altas precipitações pluviais, ou quando ocorria algum problema técnico nos aparelhos de monitoramento. Ao todo foram contabilizadas 18 avaliações para as áreas

experimentais até o mês de outubro de 2017, sendo a última avaliação realizada no dia 24 de outubro de 2017. As avaliações eram realizadas no mesmo dia e horário para as quatro áreas experimentais, sendo que tais avaliações foram divididas em três períodos distintos: Período 1 (P1) que ocorreu no momento de maior precipitação, sendo o período de chuva com 9 avaliações, Período 2 (P2) que ocorreu no momento de menor precipitação, considerado o período de seca com 5 avaliações, e Período 3 (P3), o período de transição, que foi no momento que compreendeu o início novamente da precipitação com 4 avaliações. Os períodos divididos podem ser conferidos na figura abaixo (Figura 5.), separados pelas setas, de acordo com a precipitação anual e temperatura observada nas áreas experimentais no ano de 2017.

Figura 5 - Precipitação pluvial (mm) e Temperatura média do ar (°C) durante os períodos de avaliação (P1 – “chuva”; P2 “seca”; P3 “transição”) das áreas experimentais.

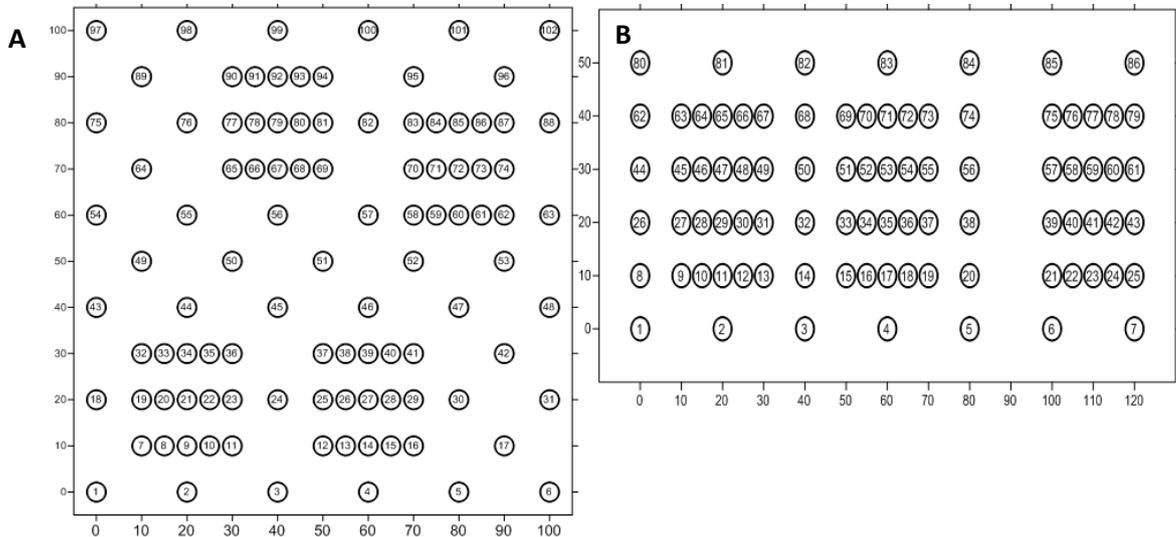


Fonte: Clima FEIS/UNESP (2019).

Em adição, de forma complementar com 9 dias de avaliações espaçados entre os períodos P1 a P3 (Figura 5), foram monitoradas as áreas de EU (Figura 6 A) e SI (Figura 6 B) através de pontos distribuídos com malhas amostrais de 100 × 100 m contendo 102 pontos na área de EU e malha de 50 × 120 m contendo 86 pontos amostrais em SI (Figura 6), tendo os pontos com distâncias mínimas de 5 m, permitindo então obter a emissão total durante o período avaliado. Essa avaliação

complementar permitiu obter a modelos individuais para as áreas experimentais (EU e SI) por meio da AEE, servindo de comparação ao modelo global encontrado.

Figura 6 - Pontos experimentais distribuídos nas áreas. A) 102 pontos na área de eucalipto. B) 86 pontos área de sistema silvipastoril.



Fonte: Próprio autor.

2.2.2.1 Emissão de CO_2 (FCO_2), umidade e temperatura do solo realizado nas avaliações

A emissão de CO_2 (FCO_2) foi monitorada por meio do sistema automatizado portátil de fluxo de CO_2 do solo LI-COR (LI-8100) (Figura 7) sendo realizado em cada avaliação. O sistema funciona monitorando as concentrações de CO_2 dentro da câmara através de espectroscopia na região do infravermelho. A câmara para solos apresenta volume interno de $854,2 \text{ cm}^3$ e área de contato circular de $83,7 \text{ cm}^2$. A câmara então é acoplada sobre os colares de PVC previamente inseridos no solo sobre cada ponto amostral delimitado, na profundidade de 3 cm. O fluxo de CO_2 é computado em cada ponto por um ajuste de concentração de CO_2 do ar dentro da câmara em função de uma regressão parabólica no tempo após o fechamento da mesma, durando cerca de 2 minutos por ponto.

Figura 7 - Sistema automatizado portátil de fluxo de CO₂ do solo LI-COR (LI-8100).



Fonte: Próprio autor.

A temperatura (°C) do solo (T_s) foi monitorada na camada superficial do solo por meio de um termômetro de haste de 11 centímetros, o qual é inserido no solo nos pontos onde foram colocados os colares de PVC para avaliação da emissão de CO₂. A umidade volumétrica do solo (U_s) foi determinada por meio de um equipamento de TDR (Time Domain Reflectometry - Hydrosense TM, Campbell Scientific, Austrália). O aparelho de TDR é constituído por uma sonda, apresentando duas hastes de 12 cm, que são inseridas no interior do solo a aproximadamente 5 cm dos colares de PVC.

2.2.3 Amostragem e avaliações físicas e químicas do solo

A amostragem de solo (Figura 8 A) foi realizada na camada de 0–0,10 m de profundidade nos 15 pontos amostrais onde já estavam sendo conduzidos os monitoramentos de FCO₂, T_s e U_s para as diversas áreas (EU, PI, SI, MN). As amostras deformadas foram conduzidas ao laboratório de fertilidade do solo, onde foram secas ao ar, homogeneizadas e peneiradas por peneiras de malha 2 mm (terra final seca ao ar – TFSA). Após esse prévio preparo das amostras foi realizado as seguintes determinações: potencial hidrogeniônico (pH), determinado em CaCl₂, determinação do teor de matéria orgânica do solo (MO), P disponível (P), Cálcio (Ca²⁺), Magnésio (Mg²⁺), Potássio (K⁺), soma de bases (SB) e acidez potencial (H+Al). Os teores de fósforo disponível, Ca²⁺, Mg²⁺ e K⁺ foram extraídos utilizando-se o método da resina trocadora de íons (RAIJ, 2001); a capacidade de troca de

cátions (CTC) e a saturação por base (V%) foram calculadas. O carbono orgânico foi determinado pelo método da combustão úmida, via colorimétrica (RAIJ *et al.* 1987), e a determinação do teor de nitrogênio foi realizada após a digestão sulfúrica, por meio do método semimicro-Kjeldahl (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997).

Figura 8. Amostragem do solo e determinação de nutrientes. A) Amostragem de solo no campo. B) Determinação dos nutrientes em laboratório.



Fonte: Próprio autor.

Uma vez que as amostras de solo foram coletadas em uma camada fixa, os estoques de C (EstC) foram ajustados para as mudanças na densidade do solo (Ds) que ocorreram após as mudanças do uso da terra. Para isso, foi utilizada a metodologia descrita por Ellert e Bettany (1995) e Moraes *et al.* (1996) para corrigir os estoques de carbono do solo em uma profundidade de massa equivalente, ou seja, a profundidade do solo nos diferentes usos estudados que contém a mesma massa de solo como a camada correspondente (0 – 0,40 m) na área de vegetação nativa de Cerrado (MN – usada como área de referência). Os cálculos da camada de solo equivalente, foram realizados de acordo com o apresentado por Carvalho *et al.* (2009) e Segnini *et al.* (2013):

$$\text{camada de solo equivalente (cm)} = \frac{M_{CE}}{M_{\text{área}}} \times 40 \quad (1)$$

onde M_{CE} é a média ponderada da densidade do solo (D_s) nas respectivas camadas de solo na área de vegetação nativa MN; $M_{área}$ é a média ponderada de D_s nas respectivas camadas do solo em cada área (EU, PI, e SI) e o valor 40 é relacionado com a profundidade do solo de 40 cm na área de referência. O estoque de carbono ($Mg\ ha^{-1}$) foi calculado para cada camada de solo multiplicando a concentração de Carbono (%) pela densidade do solo D_s ($g\ cm^{-3}$) e pela espessura da camada de solo equivalente (cm). Para o cálculo do estoque de nitrogênio do solo, foi utilizada metodologia semelhante.

Para a determinação do grau de humificação da matéria orgânica do solo (H_{LIFS}) e do teor de carbono das amostras de solos, foram utilizadas as análises de fluorescência induzida por laser (LIFS) e espectroscopia de emissão óptica com plasma induzido por laser (LIBS), respectivamente. Os espectros LIBS foram capturados utilizando um sistema comercial modelo LIBS2500, da Ocean Optics (USA), em parceria com a Embrapa Instrumentação Agropecuária. LIBS é uma técnica analítica avançada para análise elementar semiquantitativa, baseada na medida da emissão de espécies excitadas em um plasma produzido por um laser (FERREIRA *et al.*, 2009). A técnica de fluorescência induzida por laser (LIFS) tem como princípio básico a excitação das amostras do solo com um laser de emissão, na região do ultravioleta/azul, resultando na fluorescência de grupos funcionais da matéria orgânica, relacionados com o processo de humificação (MILORI *et al.*, 2006).

Para as análises físicas do solo foram coletadas amostras indeformadas com amostrador adaptado a cilindros com dimensões médias de 0,05 m de diâmetro interno e 0,04 m de altura (EMBRAPA, 2017). A macroporosidade (Ma) e microporosidade (Mi) foram determinados utilizando-se a mesa de tensão com 0,60 m de altura de coluna d'água em amostras previamente saturadas. O volume de água retido na amostra nesta condição corresponde à Ma. A Mi foi determinada após a retirada dos anéis saírem da estufa à 105°C num período de 24 h e posterior pesagem. Já a porosidade total foi calculada pela soma dos macroporos e microporos. Também foi determinada a densidade do solo (D_s) utilizando-se a seguinte equação (2), sendo MSse: massa do solo seco em estufa e Va: volume do anel (EMBRAPA, 2017):

$$D_s = \frac{MSse}{V_a} \quad (2)$$

Figura 9. Coleta de solo para análise física. A) Amostras indeformadas coletadas no campo. B) Determinação em laboratório dos atributos físicos.



Fonte: Próprio autor.

2.2.4 Forma de análise dos resultados

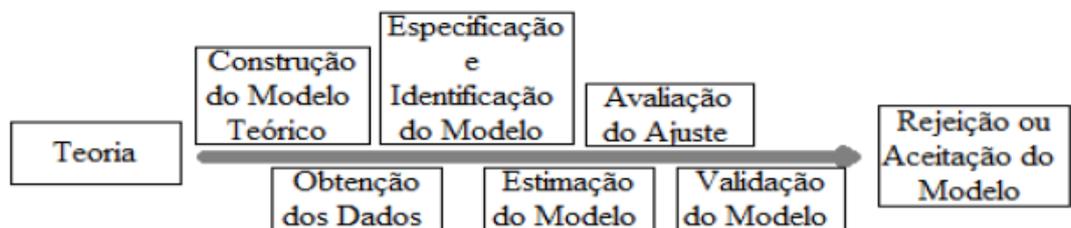
Os dados foram analisados por análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade para o efeito dos períodos como tratamento. Para a segunda etapa da pesquisa foi realizada a análise de componentes principais (ACP) utilizando todos os atributos referentes aos atributos do solo, com intuito de apenas auxiliar na formulação das variáveis latentes (constructos) a serem utilizados na análise de equações estruturais (AEE) (BRAHIN *et al.* 2011).

Com isso para a AEE foram construídos os constructos, AQ (atributos químicos); DC_Ds (dinâmica do carbono + densidade do solo); F_P1 (FCO₂ no P1); F_P2

(FCO₂ no P2); F_P3 (FCO₂ no P3), sendo. Esses constructos corresponderam ao modelo interno, com relação e caminho entre os constructos. Em relação à análise complementar da AEE; para as áreas experimentais EU e SI (Figura 6) foram formados os constructos AQ; DC_Ds, FT, correspondendo a: atributos químicos; dinâmica do carbono + densidade do solo e FCO₂ total.

A AEE é uma técnica de modelagem generalizada, cujo objetivo foi testar e validar modelos teóricos, que explicam relações causais e hipotéticas entre as variáveis estudadas. As relações foram medidas pelos parâmetros do modelo que caracterizam o tamanho do efeito dos atributos independentes sobre os atributos dependentes (MARÔCO, 2010). Na Figura 10. estão os procedimentos da aplicação da AEE. A utilização da AEE como alternativa aos métodos tradicionais se justifica por proporcionar ao pesquisador a habilidade de acomodar múltiplas relações de dependência inter-relacionadas em um só modelo (HAIR *et al.* 2009).

Figura 10. Etapas da modelagem de Equações estruturais.



Fonte: Marôco (2010).

O modelo geral da AEE pode ser descrito da seguinte forma (BOLLEN, 1989):

$$y = \Lambda_y \eta + \varepsilon \quad (3)$$

$$x = \Lambda_x \xi + \delta \quad (4)$$

$$\eta = B\eta + \Gamma\xi + \zeta \quad (5)$$

em que,

$y^T = (y_1, y_2, \dots, y_p)$ são as variáveis manifestas no modelo de medida (3);

Λ_y é a matriz $p \times r$ dos efeitos de η sobre y no modelo de medida (3);

$x^T = (x_1, x_2, \dots, x_q)$ são as variáveis manifestas no modelo de medida (4);

Λ_x é a matriz $q \times s$ dos efeitos de ξ sobre x no modelo de medida (4);

$\eta^T = (\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_r)$ são as variáveis latentes dependentes;

$\xi^T = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_s)$ são as variáveis latentes independentes;

$\varepsilon^T = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_p)$ e $\delta^T = (\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_q)$ são os vetores de erros de medida ou mensuração de y e de x , respectivamente, modelos de medida (3) e (4);

$B_{r \times r}$ é a matriz dos coeficientes de η no modelo estrutural (5);

$\Gamma_{r \times s}$ é a matriz dos coeficientes de ξ no modelo estrutural (5);

$\zeta^T = (\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_r)$ são os resíduos ou erros do modelo estrutural (5);

O modelo geral assume as seguintes pressuposições:

- ε é não correlacionado com η ;
- δ é não correlacionado com ξ ;
- ζ é não correlacionado com ξ ;
- ζ , ε e δ são mutuamente não correlacionadas;
- As esperanças matemáticas dos erros são nulas;

Como uma variável não é causa e efeito dela mesmo (modelo estrutural), decorre:

- $B_{ii} = 0$ e,
- $(I - B)$ é uma matriz singular (possui inversa), sendo I a matriz identidade.

E, com as seguintes matrizes de covariâncias:

- $\Theta^{\varepsilon}_{(p \times p)} = E[\varepsilon \varepsilon^T]$;
- $\Theta^{\delta}_{(q \times q)} = E[\delta \delta^T]$;
- $\Psi_{(r \times r)} = E[\zeta \zeta^T]$;
- $\Phi_{(s \times s)} = E[\xi \xi^T]$;

As equações (3) e (4) referem-se aos modelos de medidas ou mensuração de y e de x , respectivamente, e a equação (5) refere-se ao modelo estrutural,

relacionando as variáveis latentes do modelo. O modelo matemático de equações estruturais pode ser representado de forma gráfica, utilizando-se símbolos e figuras geométricas na composição do chamado diagrama de caminhos. Os símbolos que poderão ser utilizados na representação gráfica de um modelo de equações estruturais, bem como seus respectivos significados são descritos de acordo com Silva (2006), Bistaffa (2010) e Marôco (2010).

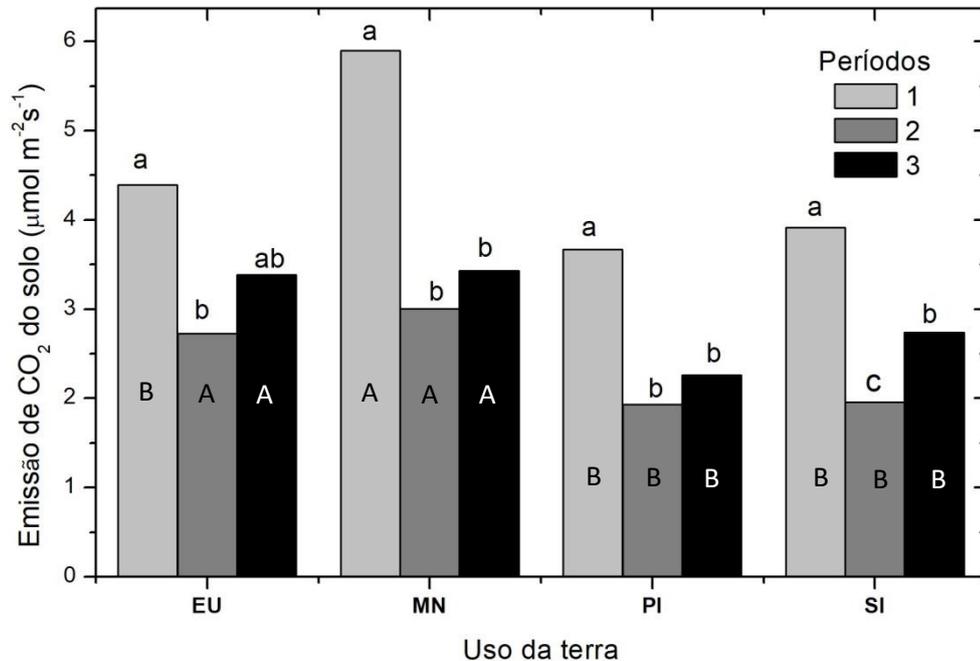
O método de estimação dos parâmetros foi o de mínimos quadrados parciais (WOLD, 1966, 1982, 1985), em que a variância explicada dos fatores latentes é maximizada estimando relacionamentos de modelos parciais em uma sequência interativa de mínimos quadrados ordinários (MONECKE; LEISCH, 2012). Para verificar a confiabilidade dos blocos formados pelas variáveis em estudo utilizou-se a medida Rho de Dillon-Goldstein; tal medida deve ser acima de 0,7 e as variâncias médias extraídas (AVE) que devem ser maiores que 0,5; bem como o coeficiente de determinação r^2 e as significâncias dos modelos estruturais (TENENHAUS *et al.*, 2005; RINGLE; SILVA; BIDO, 2014; SANCHES FERNANDES *et al.*, 2018); o modelo SEM (modelagem de equação estrutural) ajustado por meio do método PLS também é chamado de PLS-SEM, com validação *bootstrapping*. Todas as análises foram realizadas no software estatístico R, o qual é gratuito e apresenta código-fonte-aberto (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2018).

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 Emissão de CO₂, temperatura e umidade do solo

As maiores médias de FCO₂ em todas as áreas estudadas ocorreram no P1 (Figura 11), que consistiu ao período de maior precipitação pluvial (Figura 5). Os resultados corroboram com Leon *et al.* (2014) que avaliando a variação temporal e espacial de FCO₂ em um ecossistema na Baixa Califórnia-México encontraram maior taxa de emissão de CO₂ nos meses mais chuvosos. Resultados semelhantes foram obtidos por Moitinho *et al.* (2015) que analisando a dependência espacial e temporal da emissão de CO₂ nos atributos do solo na produção de cana-de-açúcar encontram menores emissões no período seco, com aumento da emissão logo após eventos de precipitação.

Figura 11. Médias de emissão de CO₂ do solo para cada período analisado nas áreas de: eucalipto (EU); mata nativa (MN); pinus (PI) e silvipastoril (SI), no Período 1 (chuva); Período 2 (seca) e Período 3 (transição). Para cada uso, médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. Minúsculas em relação ao período, maiúsculas ao uso da terra.



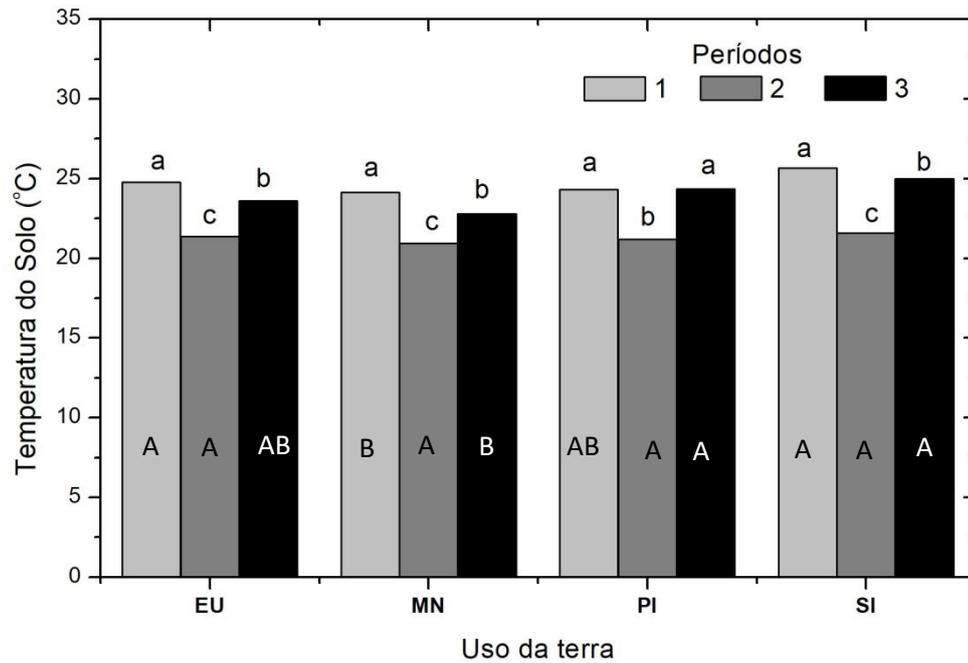
Fonte: Próprio autor.

No P1 em relação à área que obteve a maior média de FCO₂ foi a MN com 5,89 µmol m⁻² s⁻¹ (Figura 11) sendo 61% superior à média de FCO₂ da área de PI (3,66 µmol m⁻² s⁻¹). A maior respiração do solo na área de MN já era esperada, devido ao maior aporte de cobertura vegetal no sistema. Alves *et al.* (2011) relataram que quando se avalia a comunidade microbiana em solos de mata ou vegetação nativa, é normal encontrar valores relativamente maiores quando comparados a solos com outros tipos de vegetação, na qual a microbiota é favorecida pela cobertura vegetal, proporcionando maior acúmulo de material orgânico e fornecendo maior fonte de nutrientes para o desenvolvimento da comunidade microbiana.

Foi possível notar que as maiores médias de temperatura e umidade também ocorreram no período de maior precipitação (P1) (Figura 12 e Figura 13). Outro aspecto a ser levado em consideração é a umidade do solo, mantida logo após eventos de precipitação, que viabiliza a melhoria na condição de vida microbiana,

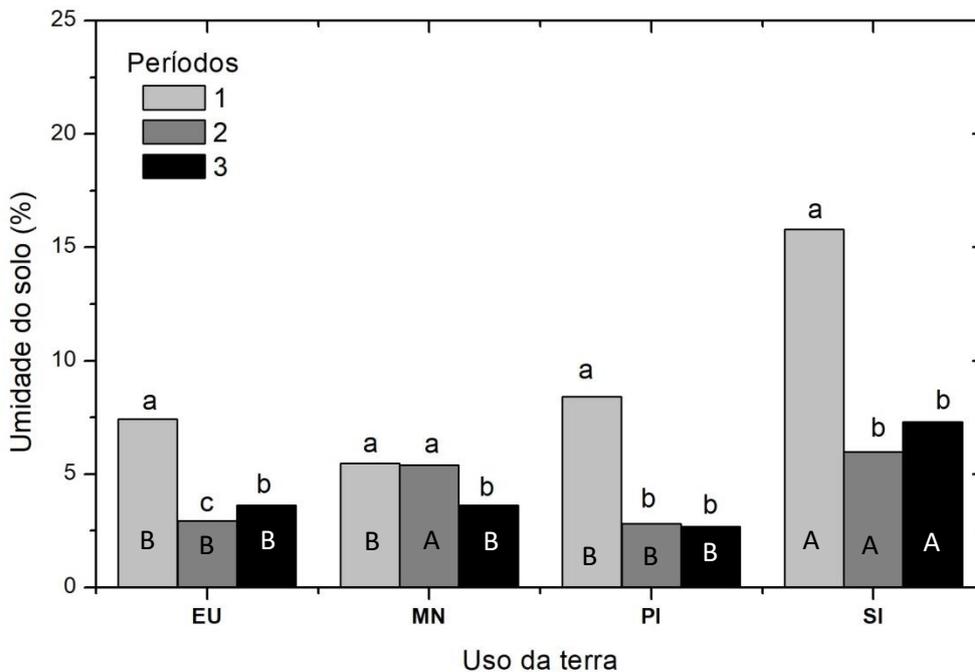
proporcionando o acesso dos microrganismos ao material orgânico do solo, promovendo a decomposição.

Figura 12. Médias de temperatura do solo para cada período analisado nas áreas de: eucalipto (EU); mata nativa (MN); pinus (PI) e silvipastoril (SI), no Período 1 (chuva); Período 2 (seca) e Período 3 (transição). Para cada uso, médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. Minúsculas em relação ao período, maiúsculas ao uso da terra.



Fonte: Próprio autor.

Figura 13. Médias de umidade do solo para cada período analisado nas áreas de: eucalipto (EU); mata nativa (MN); pinus (PI) e silvipastoril (SI), no Período 1 (chuva); Período 2 (seca) e Período 3 (transição). Para cada uso, médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. Minúsculas em relação ao período, maiúsculas ao uso da terra.



Fonte: Próprio autor.

As maiores médias de temperaturas (Figura 12) podem ter proporcionando um maior FCO₂ durante o P1 (Figura 11). Vale lembrar que no local de estudo durante o verão se concentram as maiores precipitações e temperaturas, se caracterizando como uma região de verão quente e chuvoso. Estudo conduzido por Dong *et al.* (2017) com diferentes preparos de solo na China constataram que a temperatura do solo foi positivamente correlacionada com a emissão de CO₂ do solo, atribuindo a fatores como a maior atividade metabólica das raízes durante a estação do verão. Resultado distinto foi encontrado por Moitinho *et al.* (2015) que não observaram correlação significativa entre FCO₂ e temperatura do solo. De acordo com Davidson *et al.* (1998) a temperatura e umidade do solo são independentes, mas podem confundir o FCO₂ em florestas temperadas.

Essa confusão entre as variáveis podem ainda ser mais fortes em ecossistemas com restrição hídrica e dessa forma é fundamental entender como a umidade do solo e as condições de seca influenciam a dinâmica temporal e espacial de FCO₂ (LEON *et al.*, 2014). Mesmo que ecossistemas secos sejam áreas com

baixa atividade metabólica, os autores reforçam que existe uma variabilidade espacial entre o FCO_2 entre período seco e período chuvoso.

Outra ressalva é para a área de SI que apresentou média de umidade do solo superior às áreas de EU, MN, PI (Figura 13). Tal resultado pode ser atribuído à presença da gramínea e das árvores no sistema, além da macega do capim braquiária propiciar uma maior umidade superficial do solo graças ao sistema radicular fasciculado, que quando decomposto proporciona maior teor de matéria orgânica no solo. De acordo com Mendonça *et al.* (2009) que avaliaram solos submetidos a diferentes manejos florestais, foi possível observar que a umidade e a capacidade de infiltração de água no solo apresentaram correlação linear com a matéria orgânica. Já Costa *et al.* (2008) encontraram na camada superficial do solo (0 a 0,05 m) correlação negativa entre a emissão de FCO_2 e a umidade gravimétrica do solo.

Em relação ao P2, que compreendeu a época seca, ocorreram as menores médias de FCO_2 (Figura 11), temperatura e umidade do solo (Figura 12 e Figura 13) em todas as áreas, exceto para a MN que obteve média superior no P2. Dados semelhantes foram encontrados por Peixoto *et al.* (2017) que avaliando o estoque de carbono e FCO_2 em floresta de Cerradão em sucessão ecológica constataram que os menores FCO_2 ocorreram no período seco (junho a agosto), principalmente quando a chuva e a umidade do solo foram muito baixas. No entanto, as taxas de FCO_2 aumentaram acentuadamente com as primeiras chuvas em setembro, que então permaneceram altas durante todo o período chuvoso. Estes resultados demonstraram a variação sazonal de FCO_2 . Os autores também relataram uma menor taxa de respiração do solo em períodos de menor umidade (SCHWENDENMANN *et al.*, 2003; BUTLER *et al.*, 2012).

No P3, considerado o período de transição, quando voltou a chover nas áreas experimentais (Figura 5), voltou-se ter aumento da média de FCO_2 em todas as áreas estudadas (Figura 11), porém estes foram estatisticamente iguais às médias de FCO_2 referente ao P2. Um comportamento distinto foi observado na área de SI (Figura 11), que obteve a média de FCO_2 no P3 maior que no P2, sendo média de $1,95 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para $2,74 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Wolf *et al.* (2011) medindo o FCO_2 de um ecossistema de pastagem e um reflorestamento de espécies nativas no Panamá Central, verificaram na pastagem um maior reflexo pelas limitações da água no solo durante a estação seca. Logo, parece provável que os aumentos previstos na variabilidade

da precipitação pluvial afetarão as variações sazonais FCO_2 , em particular nos ecossistemas de pastagens, provavelmente devido ao sistema radicular fasciculado das gramíneas, quando comparado às árvores.

No P3 quando analisamos as médias de temperatura e umidade do solo (Figura 12 e 13) notou-se aumento da média da temperatura do solo para todas as áreas experimentais. A área de PI obteve média no P3 (transição) igual à média do P1 (chuva). A acícula é o constituinte da serapilheira do *Pinus*, sendo um material de decomposição lenta, graças ao seu alto teor de lignina, dificultando a ação dos microrganismos decompositores (KLEINPAUL *et al.*, 2005).

A baixa quantidade de folhas que cai da parte aérea irá formar a matéria orgânica sobre o solo, sendo que, essa quantidade é determinada pela parcela de resíduos que ali são depositados, em destaques por aqueles que caem da parte aérea e pela sua taxa de decomposição (MARIN *et al.*, 2006). Logo, solos com baixa quantidade de matéria orgânica, por sua vez, acaba sofrendo maiores oscilações de temperatura e umidade.

2.3.2 Atributos químicos do solo

Posteriormente, os dados foram analisados em termos de suas médias e seus respectivos coeficientes de variação (CV) em % em relação aos atributos químicos e físicos (Tabela 1). No que se refere aos atributos químicos do solo o teor de K^+ variou de baixo (PI) a alto (SI) (RAIJ *et al.*, 1997), sendo $0,69 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na área de *Pinus* (PI) e $4,08 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ em relação a área de Silvipastoril (SI). Berthrong *et al.* (2009) fazem referência que o reflorestamento apenas com espécie de *Pinus* proporciona a diminuição do K^+ no solo em 23% e o teor médio do pH diminui em 0,3 unidades. Vale lembrar que o cultivo de *Pinus* é muito exigente em K^+ em termos nutricionais. Silva (2017) avaliando o estoque de carbono e nitrogênio em sistema silvipastoril observou altos teores de K^+ para camadas superficiais. Quando avaliou o K^+ em profundidade, o teor decaiu, justificando esse comportamento graças ao processo de troca de cátion. Um solo com maior capacidade de troca de cátion é oriundo de um maior teor de matéria orgânica no solo, retendo os cátions positivos. Alguns autores citam que como melhoria da fertilidade do solo, o sistema silvipastoril promove aumentos significativos nos teores de K^+ e P do solo, principalmente em

solos coletados sob a copa de árvores. Vale lembrar que o K^+ não é um nutriente que faz parte da composição estrutural da planta, possuindo elevado potencial de ciclagem, principalmente em sistemas com adição sucessiva de resíduos (ROSSATO, 2004).

Tabela 1. Médias e seus respectivos coeficientes de variação (%) dos atributos físicos e químicos do solo, profundidade 0-0,10 m, área de Eucalipto (EU), Mata nativa (MN), Pinus (PI) e Silvipastoril (SI).

Atributo	Eucalipto		Mata nativa		Pinus		Silvipastoril	
	Média	CV	Média	CV	Média	CV	Média	CV
P	7,00	33,72	8,40	16,10	5,47	30,82	5,53	31,20
MO	28,33	22,90	31,00	11,95	19,67	15,57	30,73	8,29
pH	4,40	10,83	4,11	5,27	4,06	3,06	4,00	2,48
K	1,37	37,89	1,61	22,74	0,69	55,18	4,08	39,58
Ca	12,00	48,80	12,44	43,52	5,60	22,18	7,33	23,43
Mg	13,20	31,26	8,07	30,53	3,53	35,26	8,67	21,22
N	1,17	36,19	1,14	30,93	0,76	10,60	1,20	19,71
CTC	85,03	21,24	83,21	10,95	76,53	23,96	111,05	8,20
V	30,77	27,67	26,15	27,52	13,79	41,87	18,31	22,31
Ma	0,09	34,33	0,19	28,30	0,03	40,18	0,11	29,59
Mi	0,32	7,50	0,29	18,63	0,37	6,49	0,41	4,89
DS	1,47	8,33	1,20	6,80	1,58	4,58	1,23	4,89
EstC	19,68	22,90	21,57	15,25	13,66	15,57	21,35	8,29
EstN	1,55	21,21	1,51	11,59	0,91	10,60	1,44	19,71
C/N	13,87	20,96	14,28	12,60	14,98	10,61	15,58	28,20
H _{LIFS}	39078,57	23,56	27930,95	12,67	49939,99	23,44	29650,35	8,81

K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} ($mmol_c dm^{-3}$); V (%); P ($mg dm^{-3}$); MO ($g dm^{-3}$); CTC ($mmol_c dm^{-3}$); N ($g kg^{-1}$), Ma = macroporosidade, Mi = microporosidade ($m^3 m^{-3}$); Ds = densidade do solo ($kg dm^{-3}$); EstC = estoque de carbono ($Mg ha^{-1}$), EstN = estoque de nitrogênio ($Mg ha^{-1}$); C/N = relação CN; H_{LIFS} = grau de humificação da matéria orgânica do solo (u.a = unidade arbitrária).

Fonte: Próprio autor.

Os menores teores médios de Ca^{2+} e Mg^{2+} também estavam presentes na área de PI quando comparada as demais áreas, sendo $5,60 mmol_c dm^{-3}$ e $3,53 mmol_c dm^{-3}$ respectivamente. Resultados corroboram Chaves e Corrêa (2005) que analisando macronutrientes no sistema solo-planta de *Pinus caribaea* verificou-se um quadro crítico com relação a Ca^{2+} e Mg^{2+} , com uma notória ausência desses nutrientes no solo. Níveis muito baixos desses dois macronutrientes foram

encontrados, em virtude do caráter ácido dos solos, ou seja, baixos teores de pH do solo.

Com relação aos maiores teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} , para o Ca^{2+} o maior teor encontrado foi na MN com $12,44 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$, sendo considerado como teor médio. A aroeira é uma das inúmeras espécies encontradas na mata nativa do Cerrado. Segundo Carpanezzi *et al.* (1976) essa espécie tem ampla distribuição no Cerrado e classifica-se como planta calcícola. Em relação ao Mg^{2+} o maior teor foi encontrado na área de EU ($13,20 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), sendo considerado como alto. Bellote e Ferreira (1993) relacionaram os teores foliares dos nutrientes com a altura de *Eucalyptus grandis* em cinco municípios do estado de São Paulo e verificaram que o N, P, K, Mg e S apresentaram correlações positivas com o crescimento do *E. grandis*. Como nas áreas experimentais não havia nenhum tipo de manejo do solo, e possuíam vários anos de condução, a única forma de aporte de nutrientes no sistema era por meio das folhas de eucalipto, que possivelmente possibilitaram o maior teor desse nutriente no solo.

O pH nas áreas experimentais variou indicando solos ácidos, variando de muito alta a alta acidez, (RAIJ *et al.*, 1997), sendo 4,00 para área de SI (muito alta), seguida de 4,40 para área de EU correspondente a alta acidez. Solos ácidos são caracterizados com deficiências de nutrientes como Ca^{2+} e Mg^{2+} , e toxicidade por Al com diminuição da MO (GARBUIO *et al.*, 2011; CRUSCIOL *et al.*, 2016). Os valores de CTC foram considerados como teores muito bons, graças aos teores médios da MO do solo. Esses resultados corroboram com encontrados por Portugal *et al.* (2010) que avaliando as características físicas e químicas de um Latossolo em diferentes sistemas agrícolas na Zona da Mata mineira, encontraram correlação positiva entre a CTC e MO do solo.

A saturação por bases V% variaram de muito baixo para a área de PI (13,79%) a baixo (30,77%) em relação à área de EU. Esses valores só ressaltam os baixos teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ já comentados a respeito da área de PI, e aos teores médios das áreas de Ca^{2+} e Mg^{2+} , principalmente em relação ao teor de Mg^{2+} na área de EU, aumentando a quantidade de cátions trocáveis no solo.

O teor de P disponível variou do teor baixo para as áreas de PI e SI, sendo 5,47 e 5,53 mg dm^{-3} , respectivamente, ao teor médio para área de MN com 8,40 mg dm^{-3} . As áreas de PI e SI possuem aproximadamente 30 anos de conversão, e após plantio nas áreas experimentais não foi realizado nenhum tipo de manejo e correção

do solo. O P é um nutriente que possui baixa disponibilidade em condições naturais nos solos da região do Cerrado, e sua disponibilidade é afetada pela textura do solo, tipos de minerais argila e acidez do solo, e quando adicionado tendem a acumular na superfície, por ser um elemento não-móvel no perfil (SOUSA *et al.*, 2004).

Nos solos de textura argilosa o teor de MO variam de 31 a 60 g dm⁻³ (RAIJ *et al.*, 1997), e os teores nas áreas estudadas variaram de 19,67 g dm⁻³ para área de PI ao teor de 31,00 g dm⁻³ na área de mata nativa (MN). Após alguns anos de cultivo, o teor de matéria orgânica se estabiliza em torno de 25 a 30 g dm⁻³ em solos argilosos em condições tropicais (RONQUIM, 2010). Porém Gmach *et al.* (2018) mencionaram que o reflorestamento de eucalipto não é uma boa opção eficiente para uso da terra, quando se trata em teores de MO do solo, sob as práticas atuais de manejo e as condições de clima e solo no Cerrado. Vale destacar a área de SI que obteve um teor médio de 30,73 g dm⁻³, no qual Wen *et al.* (2018) citaram que a pastagem além de aumentar a produção de forragem no solo, armazena carbono e nitrogênio no ecossistema, devido a grande quantidade de fitomassa de raízes.

Os valores de EstC variam entre 13,66 Mg ha⁻¹ (PI) a 21,57 Mg ha⁻¹ (MN), estando a área de SI com valores próximos ao maior teor encontrado nas áreas, com 21,35 Mg ha⁻¹. Coser *et al.* (2018) avaliando a transição de uma pastagem de baixa produtividade para um sistema de agrofloresta com *Panicum maximum* e *Gliricidia sepium* no Distrito Federal, Brasil, encontraram para o sistema agroflorestal o aumento do estoque de C na camada superficial de 52,6 Mg ha⁻¹ a 66,5 11 Mg ha⁻¹ no decorrer de 4 anos do sistema, além de proporcionar a qualidade da MO do solo, confirmando seu potencial para ser usado como pratica agrícola em termos de melhoria do solo e sequestro de C de curto prazo. Avaliando diferentes sistemas de integração lavoura-pecuária no Cerrado, Salton *et al.* (2011) encontraram as menores taxas de acúmulo e os menores estoques de C nos sistemas apenas com lavouras anuais, enquanto os maiores valores foram registrados nos sistemas com pastagens. Gatto *et al.* (2010) estudando plantações de eucalipto em diferentes classes de solos, constataram o maior teor de carbono na camada superficial (0-0,20 m), decrescendo em profundidade para todas as classes de solo. A justificativa para os maiores teores de C orgânico na camada superficial é o aporte de material orgânico, proveniente da queda de folhas, galhos e da casca das árvores, formando a manta orgânica e a maior densidade de raízes finas, frequente em plantações de eucalipto cultivadas em solos com baixa fertilidade.

O Estoque de nitrogênio (EstN) alternou de 1,55 Mg ha⁻¹ para a EU, estando próximo os teores das áreas de MN e SI com 1,51 Mg ha⁻¹ e 1,44 Mg ha⁻¹ respectivamente. O menor valor foi referente à área de PI com 0,91 Mg ha⁻¹. Os maiores e menores teores de EstN encontrado nas áreas correspondem aos teores de N (g Kg⁻¹) identificados nas áreas estudadas. A matéria orgânica do solo constitui a principal fonte de N para as plantas, logo solos com baixo conteúdo de MO no solo a disponibilidade de N é ainda menor (WEBER; MIELNICZUK, 2009), o que corroboram com os resultados encontrados, sendo as áreas de EU, MN e SI os maiores EstC, EstN, teor de N e MO. Eze, Palmer e Chapmen (2017) avaliando o estoque de carbono em diferentes manejos de pastagens no norte da Inglaterra, observaram que o estoque de carbono foi maior em áreas onde houve adição de N, além de 70% do estoque de carbono ter sido protegido dentro das frações estáveis do solo indicando o potencial das pastagens em contribuir para a mitigação das mudanças climáticas.

A relação C/N atingiu os maiores valores nas áreas de SI, PI e MN, com 15,58; 14,98 e 14,28 respectivamente. Avaliando solos florestais europeus Cools *et al.* (2014) obtiveram relações C/N variando de 16 a 44, e as espécies arbóreas foram a variável explicativa para as maiores relações C/N. Solos sobre florestas que apresentaram as maiores relações foram encontradas espécies perenes como o pinheiro, o sobreiro (*Quercus suber* L.) e o eucalipto. Entretanto, a decomposição do material orgânico do solo está relaciona-se com fatores como temperatura do solo, precipitação, umidade do solo e microrganismos decompositores (TORRES *et al.* 2005). De acordo com Zinn *et al.* (2018) a relação C/N é o indicador mais utilizado da qualidade dos resíduos orgânicos e da matéria orgânica do solo, e o seus índices no solo referem-se à proporção em massa entre o carbono orgânico e o N total e são, talvez, o indicativo mais disponível da qualidade da matéria orgânica do solo e sua decomponibilidade esperada.

O H_{LIFS} se refere às substâncias húmicas presentes na MO, que possuem maior permanência no solo, maior recalcitrância. O maior teor de H_{LIFS} foi na área de PI, seguido por EU, e os menores teores foram encontrados nas áreas de SI e MN. As acículas são o principal componente dos resíduos florestais de *Pinus* como citado anteriormente, e já se desprende da árvore em estágio avançado de senescência. A baixa produção de forragem em ambiente com a presença desse material pode ser justificado graças à alta relação C/N das acículas, quando o nitrogênio presente no

solo, pode interferir no que é usado pelos microrganismos para decomposição desse material, existindo competição por N entre a planta e os microrganismos pelo processo de imobilização de N (SARTOR *et al.* 2009). Primo *et al.* (2011) citam que as substâncias húmicas são consideradas as principais reguladoras da capacidade de troca de cátions do solo (CTC), ademais formam complexos com os micronutrientes, permitindo que eles migrem, tornando biodisponíveis no solo, sendo um material de mais fácil decomposição.

2.3.3 Atributos físicos do solo

Em relação a Ma o maior valor foi referente à área de MN com $0,19 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ seguido pelas áreas de SI, EU, e PI, com $0,11 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$; $0,09 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $0,03 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ respectivamente. O valor ideal de Ma é em torno de $0,17 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. De acordo com Secco *et al.* (2004), a porosidade de aeração, ou seja a macroporosidade, limitante para o desenvolvimento radicular deve estar em torno de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, isto é, as áreas apresentam um ambiente limitado para o sistema radicular das culturas, exceto a área de MN.

A Mi na área de SI foi de $0,41 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ seguindo decrescente as áreas de PI, EU, e MN, $0,37 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$; $0,32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$; e $0,29 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ respectivamente. O limite crítico para a microporosidade é abaixo de $0,27 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, sendo o ideal considerado $0,33 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (KIEHL, 1979). A área de SI pode ter apresentado valores superiores devido ao pastoreio dos animais no sistema. A Mi é um fator que é pouco sensível à compactação, quando comparado a Ma. Valores mais elevados de densidade ocorre redistribuição dos tamanhos de poros, com redução da macroporosidade e aumento da microporosidade do solo (COLLARES *et al.*, 2006).

A Ds foi maior na área de PI; seguido por EU sendo $1,58 \text{ kg dm}^{-3}$ e $1,47 \text{ kg dm}^{-3}$ respetivamente, posterior com as médias das áreas de SI e MN com $1,23 \text{ kg dm}^{-3}$ e $1,20 \text{ kg dm}^{-3}$. Spera *et al.* (2006) mencionaram que os limites inferiores e superiores de Ds variam de $1,23$ a $1,34 \text{ kg dm}^{-3}$. Ao respeito da qualidade edáfica do solo, Silva *et al.* (2009) investigaram o impacto de plantios florestais nos atributos de um Latossolo Vermelho-Amarelo e detectaram que, em relação à floresta nativa, ocorreu um aumento na densidade dos solos nos plantios de pinus e eucalipto.

Ainda ressaltaram que o pinus promoveu a redução mais acentuada da qualidade do solo de Cerrado.

2.3.4 Análise de Equação estrutural

Na Tabela 2 são apresentadas medidas de ajustes da AEE dos modelos PLS-SEM, para os períodos analisados. Os modelos estruturais corresponderam ao FCO₂ para cada período analisado (F_P1 = emissão de CO₂ do solo no período 1, F_P2 = emissão de CO₂ do solo no período 2 e F_P3 = emissão de CO₂ do solo no período 3) constituindo as variáveis endógenas, sendo explicadas pela variável latente atributos químicos (AQ) e pela variável latente dinâmica do carbono + densidade do solo (DC_Ds).

Tabela 2. Medidas de ajuste da AEE dos modelos PLS-SEM, para os períodos analisados.

		PLS-SEM					
Fatores	Tipo	AVE	C.Alpha	DG.rho	1º autovalor	2º autovalor	r ²
DC_Ds	Exógena	0,92	0,89	0,93	2,47	0,40	0,00
AQ	Exógena	0,70	0,79	0,88	2,11	0,60	0,00
F_P1	Endogena	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,38
F_P2	Endogena	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,33
F_P3	Endogena	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,36

PLS-SEM = modelo de análise de equações estrutural com parâmetros estimados via método mínimos quadrados parciais; DC_Ds = fator latente atributos dinâmica do carbono + densidade do solo; AQ = fator latente atributos químicos do solo; F_P1 = emissão de CO₂ do solo no período 1; F_P2 = emissão de CO₂ do solo no período 2; ; F_P3 = emissão de CO₂ do solo no período 3; AVE = variâncias médias extraídas; C. Aplha = Coeficiente alfa de Cronbach DG.rho = Rho de Dillon-Goldstein; r² = coeficiente de determinação.

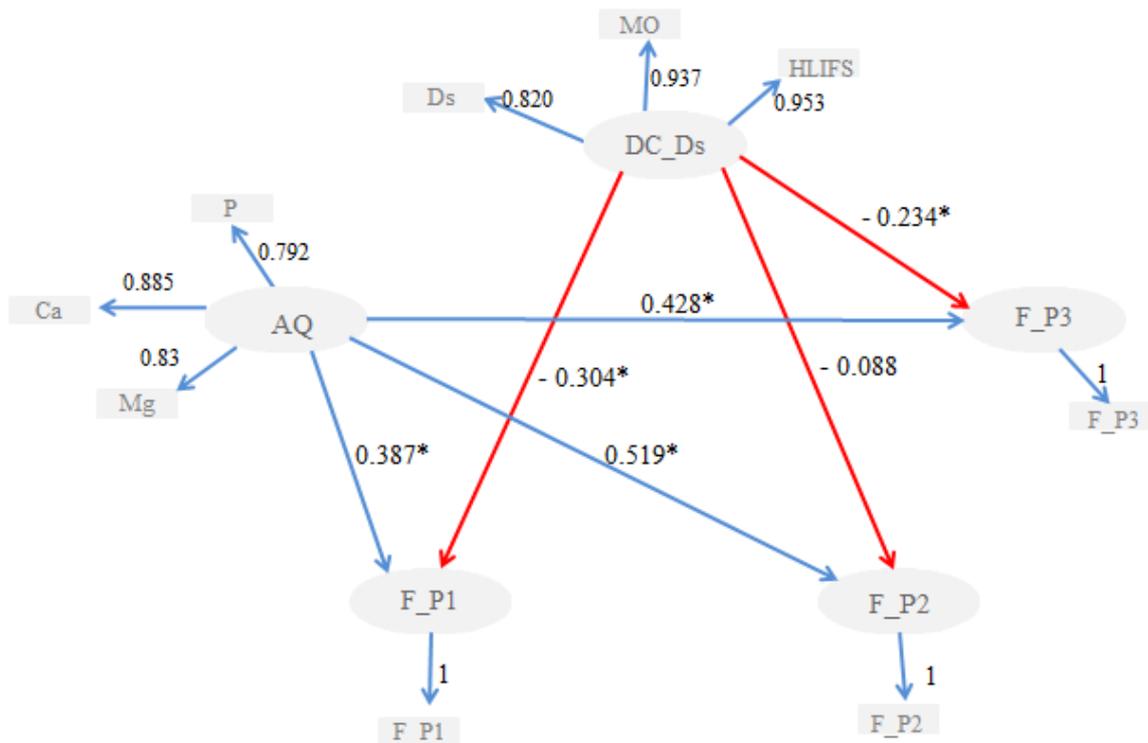
Fonte: Próprio autor.

Quanto aos modelos de mensuração (modelo externo), os fatores que compuseram o fator AQ foram Mg²⁺, Ca²⁺, e P e, o fator DC_Ds foram MO, H_{LIFS} e Ds (Figura 14). Os resultados apresentam à confiabilidade do modelo interno, o que se verifica, pois o C.Alpha e DG.rho foram maiores que 0,7, as AVEs foram todos maiores que 0,5, o primeiro autovalor e o segundo autovalor de cada fator latente foram maiores ou igual a 1 e menores que 1, respectivamente, sendo os modelos

PLS-SEM considerados como adequados se ajustando bem aos dados (RINGLE, SILVA, BIDO, 2014). A validade discriminante do modelo foi atendida, pois todas as cargas foram maiores em seus respectivos constructos, do que nos demais grupos. A medida global de ajuste do modelo foi de 0,52 (Goodness-of-fit), sendo considerado como adequado, para constructos reflexivos (TENENHAUS *et al.* 2005). O valor de r^2 das variáveis endógenas (ou seja, variáveis dependentes) variou de 0,33 a 0,38, sendo considerado como moderado (COHEN, 1977).

Quanto às significâncias dos modelos de equações estruturais (modelo interno) (Figura 14), a capacidade preditiva do modelo foi realizada por meio do procedimento *bootstrapping* (HAIR *et al.* 2014), no qual intervalos de confiança que continham o zero eram considerados como não significativo. Foi observada diferença significativa para FCO_2 nos períodos analisados (F_P1 e F_P3) tendo DC_Ds com efeito negativo a de 5% de probabilidade, isto é, foram inversamente proporcionais para explicarem os valores de FCO_2 .

Figura 14. Diagrama de caminhos das variáveis analisadas do modelo interno e externo com suas respectivas cargas (modelo externo, de mensuração) e coeficientes de caminho (modelo interno, estrutural) para o fluxo nos três períodos analisados (F_P1; F_P2; F_P3) em relação às suas variáveis latentes DC_Ds e AQ. DC_Ds = fator latente atributos dinâmica do carbono + densidade do solo; AQ = fator latente atributos químicos do solo; F_P1 = emissão de CO₂ do solo no período 1; F_P2 = emissão de CO₂ do solo no período 2; F_P3 = emissão de CO₂ do solo no período 3. Setas em azul indicam efeito positivo, setas em vermelho indicam efeito negativo.



Fonte: Próprio autor.

Dados semelhantes foram encontrados por Epron *et al.* (2006) que estudando a variação espacial na respiração do solo sobre uma floresta da Guiana Francesa encontraram correlação negativa da densidade do solo com o FCO₂. Panosso *et al.* (2011) avaliando o fluxo de CO₂ em áreas de cana de açúcar encontrou resultado semelhante para a Ds e H_{LI}FS. A área de cana-de-açúcar como manejo de queima antes da colheita manual obteve correlação negativa com H_{LI}FS e Ds. Os autores citam que a correlação negativa é um indicativo que a matéria orgânica humificada não seria a principal fonte de carbono no FCO₂. O fornecimento de energia utilizada pelos microrganismos no solo estaria relacionado apenas ao carbono lábil, menos

recalcitrante, ou seja, aquele que possui um período curto de permanência no solo e possui altas taxas de decomposição. Logo o aumento da matéria orgânica no solo e aumentos carbono não lábil (H_{LIFS}) resultaria em uma redução do FCO_2 .

Sistemas agroflorestais são interessantes para aumento da quantidade de carbono no solo e diminuição do FCO_2 , com uma relação inversa. Balbinot *et al.*, (2008) avaliando a dinâmica do estoque de carbono em plantações de *Pinus spp.* em diferentes classes de idade na região sul do estado do Paraná, verificaram que plantações com mais de 15 anos de idade aproximadamente, fixam 102 Mg C ha^{-1} , sendo alternativa interessante para redução da quantidade de dióxido de carbono da atmosfera, e aumento de carbono no solo.

Em relação ao AQ foi significativo para todos os períodos analisados (F_P1; F_P2 e F_P3). AQ irá determinar a emissão de CO_2 , tanto no período chuvoso quanto seco, sendo correspondida por Ca^{2+} Mg^{2+} e P. Segundo Hannam *et al.* (2019) em regiões áridas o Ca^{2+} Mg^{2+} e bicarbonatos podem se acumular na solução do solo. No entanto em sistemas agrícolas os quais possuem diferentes tipos de manejo e processos biológicos (decomposição da MO), podem aumentar a acidez do solo, reduzindo a formação de carbonatos secundários ($CaCO_3$ e $MgCO_3$), promovendo aumento de CO_2 do solo. Segundo Luo e Zhou (2006), a umidade do solo é um dos fatores que regulam a respiração do solo, com destaque também para o oxigênio, pH e textura do solo, bem como a relação destes fatores.

Fleischer *et al.* (2019) realizaram um estudo com simulações de modelos computacionais da vegetação da floresta amazônica (floresta tropical) identificaram que solos pobres em fósforo da floresta podem impedir que árvores reajam ao aumento de gás carbônico atmosférico associado às mudanças climáticas. Ressaltam que a escassez do fósforo dos solos amazônicos comprometeria em cerca de 50% a capacidade das árvores de absorver o carbono extra que estará no ar.

Para efeito de comparação dos modelos globais abstraídos pela análise temporal, em adição, foi realizada uma análise da emissão total com as áreas de SI e EU nos modelos PLS-SEM de acordo com a Tabela 3. Os modelos estruturais das áreas correspondem ao FCO_2 total entre os períodos analisados, (constituindo a variável endógena) que por sua vez é explicada pelas variáveis latentes (construtos) AQ e DC_Ds como o modelo descrito para os períodos (P1, P2 e P3) determinados anteriormente (Tabela 2 e Figura 14).

Tabela 3. Medidas de ajuste da AEE dos modelos PLS-SEM, para as áreas de Silvopastoril (SI) e Eucalipto (EU) dentro dos períodos analisados.

PLS-SEM SI							
Fatores	Tipo	AVE	C.Alpha	DG.rho	1º autovalor	2º autovalor	r ²
DC_Ds	Exógena	0,93	0,96	0,98	2,79	0,15	0
AQ	Exógena	0,80	0,88	0,93	2,42	0,41	0
FT	Endógena	1	1	1	1	0	0,18
PLS-SEM EU							
Fatores	Tipo	AVE	C.Alpha	DG.rho	1º autovalor	2º autovalor	r ²
DC_Ds	Exógena	0,94	0,96	0,98	2,65	0,22	0
AQ	Exógena	0,68	0,86	0,93	1,51	0,49	0
FT	Endógena	1	1	1	1	0	0,16

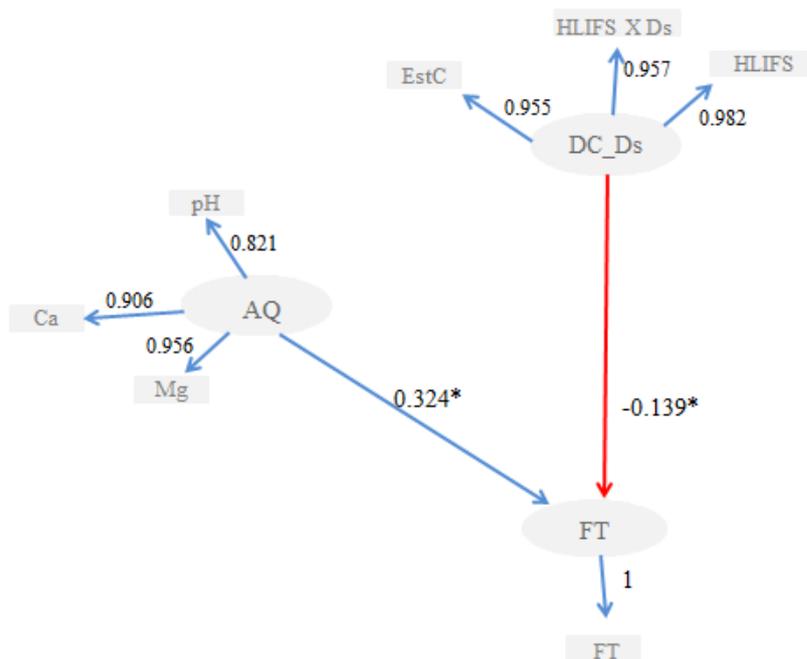
PLS-SEM = modelo de análise de equações estrutural com parâmetros estimados via método mínimos quadrados parciais; DC_Ds = fator latente atributos dinâmica do carbono + densidade do solo; AQ = fator latente atributos químicos do solo; FT = emissão total de CO₂ do solo; AVE = variâncias médias extraídas; C. Alpha = Coeficiente alfa de Cronbach DG.rho = Rho de Dillon-Goldstein; r² = coeficiente de determinação.

Fonte: Próprio autor.

Para a área de SI os modelos de mensuração que compuseram o fator AQ foram Ca²⁺, Mg²⁺ e pH, e o fator DC_Ds foram H_{LIFS} x Ds, H_{LIFS} e EstC como ilustram a Figura 15. Para a área de EU os modelos de mensuração que compreendem o fator AQ foram Ca²⁺ e CTC e o fator DC_Ds foram H_{LIFS} x Ds, H_{LIFS} e EstC como ilustram a Figura 16.

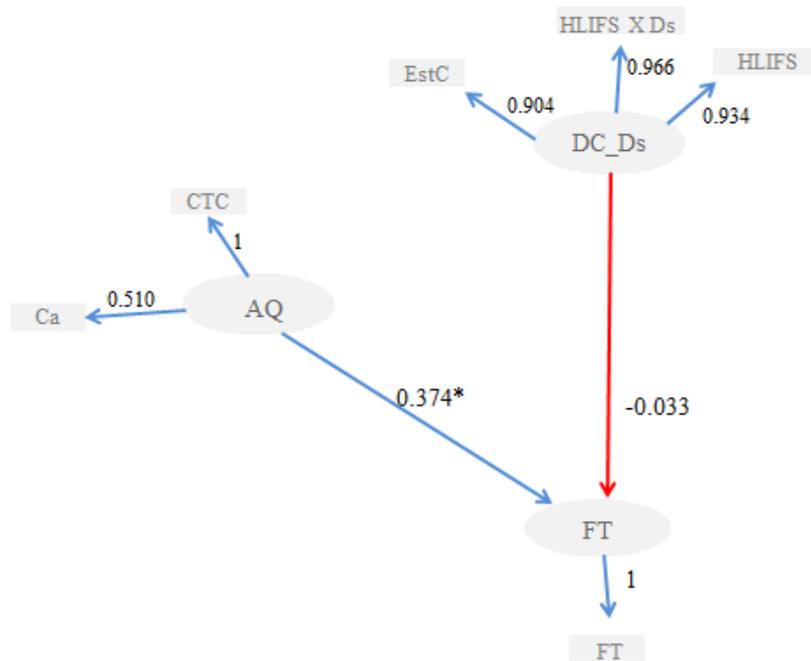
Os resultados (Tabela 3) apresentam a confiabilidade do modelo interno, o que é constatado com valores de C.Alpha e DG.rho maiores que 0,7, as AVEs maiores que 0,5, o primeiro e segundo autovalor foram maiores ou igual a 1 e menores que 1, respectivamente e, os r² das variáveis endógenas ficaram em torno de 0,17 para todos os modelos PLS-SEM, sendo considerados como adequados (Ringle, Silva, Bido, 2014). A medida global de ajuste do modelo (Goodness-of-fit) PLS-SEM SI e PLS-SEM EU foi de 0,4 e 0,36 respectivamente, sendo considerado como adequado (TENENHAUS *et al.*, 2005). Segundo Ringle, Silva e Bido (2014) essa medida é basicamente a média geométrica (raiz quadrada do produto de dois indicadores) entre o r² médio (adequação do modelo estrutural) e a média ponderada das AVE (adequação do modelo de mensuração).

Figura 15. Diagrama de caminhos das variáveis analisadas do modelo interno e externo com suas respectivas cargas (modelo externo, de mensuração) e coeficientes de caminho (modelo interno, estrutural) para a emissão total (FT) na área de Silvipastoril (SI) dentro dos períodos analisados em relação às suas variáveis latentes DC_Ds e AQ. DC_Ds = fator latente atributos dinâmica do carbono + densidade do solo; AQ = fator latente atributos químicos do solo; FT = emissão total no período analisado na área de SI. Setas em azul indicam efeito positivo, setas em vermelho indicam efeito negativo.



Fonte: Próprio autor.

Figura 16. Diagrama de caminhos das variáveis analisadas do modelo interno e externo com suas respectivas cargas (modelo externo, de mensuração) e coeficientes de caminho (modelo interno, estrutural) para a emissão total (FT) na área de Eucalipto (EU) dentro dos períodos analisados em relação às suas variáveis latentes DC_Ds e AQ. DC_Ds = fator latente atributos dinâmica do carbono + densidade do solo; AQ = fator latente atributos químicos do solo; FT = emissão total no período analisado na área de EU. Setas em azul indicam efeito positivo, setas em vermelho indicam efeito negativo.



Fonte: Próprio autor.

Em relação às significâncias dos modelos de equações estruturais (modelo interno), observou comportamento análogo (Figura 15 e Figura 16), sendo que para o DC_Ds houve um comportamento negativo, porém foi significativo apenas para a área de SI, ao nível de 5% de probabilidade, sendo conjuntamente importante para explicar a variação total de FCO_2 . Ou seja, à medida que se mantém EstC e grau de humificação da matéria orgânica, diminui o FCO_2 total. Alidoust *et al.* (2018) avaliando uma região semiárida no Irã em áreas de pastagens, florestas, sequeiros e irrigadas citam que o sequestro de carbono em solos de floresta foi maior que diversos usos da terra, e que a maior quantidade estava entre os primeiros 0,3 m. Fatores como diâmetro médio dos agregados, teor de argila, areia e a densidade do solo influenciaram dinâmica do estoque de carbono no solo. Os autores reforçam

que as práticas de manejo adequadas podem satisfazer as metas de sequestro de carbono pelos solos.

Zhang *et al.* (2019) estudando uma restauração florestal após 56 anos em terras tropicais degradadas, cita que o reflorestamento recupera o estoque de carbono semelhante a floresta primária. Vale ressaltar que os sistemas que foram modelados no presente trabalho são compostos por culturas arbóreas, uma como monocultura (EU) e a outra em um sistema integrado (SI).

Ainda em relação ao trabalho desenvolvido por Zhang *et al.* (2019) os autores citam que o reflorestamento é considerado um método eficaz para diminuir o aumento do FCO₂ atmosférico. Porém a estabilização do carbono é reduzida com a diminuição de índices recalcitrância do carbono. Isto sugere que o sequestro de C pela área reflorestada é potencialmente vulnerável a erosão, e pode ser mais facilmente decomposto e devolvido a atmosfera. Os autores citam o plantio de espécies mistas como uma excelente prática, quando comparada ao monocultivo de espécies.

Para o AQ houve comportamento positivo na explicação da variação dos valores de FCO₂, sendo muito semelhante ao modelo encontrado para os diferentes períodos analisados. Recomenda-se pesquisas adicionais para esclarecer como a qualidade da MO estaria relacionado com a perda de CO₂, em ambas as áreas, ou ainda, com estudos de longo prazo, com um maior levantamento de dados, sendo capaz de determinar um modelo específico para cada uso de solo.

2.4 CONCLUSÕES

A respeito do fluxo de CO₂ do solo, as maiores médias em todas as áreas ocorreram no P1, período de maior precipitação pluvial, com menores fluxos no período de seca, e aumento do fluxo novamente quando se inicia as precipitações nas áreas, confirmando uma característica sazonal de emissão de carbono do solo. A área de SI se destacou em relação à manutenção da umidade do solo.

No geral a PI foi a que apresentou menores teores dos atributos químicos e a área de SI apresentou teores adequados dos atributos químicos, quando comparado às demais áreas, chegando os valores próximos aos encontrados na área nativa do cerrado (MN). Com isso, temos que o sistema de integração floresta e pastagem pode ser uma alternativa para produção de alimentos de forma sustentável, já que

apresentou resultados satisfatórios, quando comparadas as demais áreas. Em relação aos atributos físicos na área de PI constatou-se menor macroporosidade e maior microporosidade, e conseqüente maior densidade do solo.

No que se refere à AEE, o AQ (Ca^{2+} , Mg^{2+} e P) corresponderam ao FCO_2 nos três períodos analisados de maneira positiva, e a DC_Ds (H_{LIFS} , Ds e MO) influenciaram negativamente no P1 e P3. Um modelo geral foi determinado para responder como foi a dinâmica do FCO_2 em ambas as áreas, permitindo reforçar e elucidar que a qualidade da matéria orgânica influencia na emissão de CO_2 do solo para atmosfera, semelhante a modelos encontrados em áreas individuais (SI e EU). Vale lembrar que recomendamos manejo integrado de lavoura e floresta (SI) como um sistema para melhoria das condições do solo e recuperação de áreas, de acordo com os resultados obtidos, pois, além de ser um importante mantenedor do estoque de carbono no solo, diminui a emissão de CO_2 para atmosfera, reforçando a importância em aprofundarmos em pesquisas nessa temática no contexto de mudanças climáticas, necessitando ser focado nacionalmente e mundialmente.

3. CAPÍTULO 3 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Está cada vez mais indispensável o entendimento das interações no sistema solo-planta-atmosfera para a realização de uma agricultura mais rentável e sustentável. No entanto, este sistema é bem complexo e dinâmico, devido à enorme quantidade de fatores e variações que o envolve. A literatura aponta para eficácia de modelos estatísticos mais avançados, os quais conseguem contribuir de forma satisfatória para a interpretabilidade destes fenômenos.

Os modelos estatísticos multivariados propostos possibilitaram entender as interações ocorridas entre os atributos físicos e químicos do solo, bem como a dinâmica do carbono, distribuídos em diferentes períodos sazonais, sendo apresentados inicialmente em termos de estatística descritiva, e posteriormente com modelos de análise de equações estruturais, com auxílio da técnica multivariada. A AEE foi útil para entender a variação dos dados amostrais em números menores de dimensões, bem como auxiliarem na composição dos fatores latentes a serem utilizados nos modelos de medida da AEE, que buscou entender e explicar as variações ocorridas entre os atributos do solo e os fatores latentes, de forma simultânea.

No período de chuva ocorre maior emissão de CO₂ nas áreas agrícolas. A análise de equação estrutural demonstrou que o grau de humificação da matéria orgânica, teor de matéria orgânica e densidade do solo, influenciaram negativamente a emissão de CO₂ nos períodos úmidos. Em relação aos atributos químicos Ca²⁺, Mg²⁺ e P houve significância positiva para todos os períodos avaliados.

Recomenda-se o manejo integrado de forrageiras e floresta (SI) como um sistema para avanço da recuperação de áreas e demais aspectos do solo, de acordo com os resultados obtidos, pois, além de ser um importante mantenedor do estoque de carbono no solo, diminui a emissão de CO₂ para atmosfera, reforçando a importância de aprofundarmos em pesquisas nessa temática no contexto de mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS

- ALAVAISHA, E.; MANZONI, S.; LINDOBOG, R. Different agricultural practices affect soil carbon, nitrogen and phosphorous in Kilombero - Tanzania. **Journal of Environmental Management**, London, v. 234 p. 159-166, 2019.
- ALIDOUST, E.; AFYUNI, A.; HAJABBASI, M. A.; MOSADDEGHI, M. R. Soil carbon sequestration potential as affected by soil physical and climatic factors under different land uses in a semiarid region. **Catena**, Amsterdam, v. 171 p. 62-71, 2018.
- ALMARAZ, J. J.; ZHOU, X.; MABOOD, F.; MADRAMOOTOO, C.; ROCHETTED, P.; MA, B. L.; SMITH, D. L. Greenhouse gas fluxes associated with soybean production under two tillage systems in Southwestern Quebec. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 104, p. 134-139, 2009.
- ANGELINI, M. E.; HEUVELINK, G. B. M.; KEMPEN, B.; MORRÁS, H. J. M. Mapping the soils of an Argentine Pampas region using structural equation modelling. **Geoderma**, Amsterdam, v. 281, p.102-118, 2016.
- ALVES, T. S.; CAMPOS, L. L.; ELIAS NETO, N.; MATSUOKA, M.; LOUREIRO, M. F. Biomassa e atividade microbiana de solo sob vegetação nativa e diferentes sistemas de manejo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 33, p. 341-347, 2011.
- ARAÚJO, E. G. **Modelagem de dados de cana-de-açúcar**: uma abordagem multivariada. 2016. 116 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2016.
- ARAÚJO, E. G.; CARVALHO, M. D. P. E.; MONTANARI, R.; ANDREOTTI, M.; CARDOZO, N. P.; PANOSSO, A. R. Model representing the relationship between the soil attributes and the production of sugarcane using structural equations. **Revista Brasileira de Biometria**, São Paulo, v. 36, p. 489-511, 2018.
- ARROUAYS, D.; BALESSENT, J.; GERMON, J. C.; JAYET, P. A.; SOUSSANA, J. F.; STENGEL, P. (ed.). **Increasing carbon stocks in French agricultural soils?** Paris: INRA, 2002. 32 p.
- ASSAD, E. D.; MARTINS, S. C.; CORDEIRO, L. A. M.; EVANGELISTA, B. A. **Sequestro de carbono e mitigação de emissões de gases de efeito estufa pela adoção de sistemas integrados**. Brasília, DF: Embrapa Informática Agropecuária, 2019.

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

BAHIA, A. S. R. S.; MARQUES JÚNIOR, J.; PANOSSO, A. R.; CAMARGO, L. A.; SIQUEIRA, D. S.; LA SCALA JÚNIOR, N. Iron oxides as proxies for characterizing anisotropy in soil CO₂ emission in sugarcane areas under green harvest. **Agriculture, Ecosystems e Environment**, Amsterdam, v. 192, p. 152-162, 2014.

BALBINO, L. C.; BARCELLOS, A. DE O.; STONE, L. F. (ed.). **Marco referencial: integração lavoura-pecuária-floresta**. Brasília, DF: Embrapa, 2011. 130 p.

BALBINOT, R.; VALÉRIO, A. F.; SANQUETTA, C. R.; CALDEIRA, M. V. W.; SILVESTRE, R. Estoque de carbono em plantações de Pinus spp. em diferentes idades no sul do estado do paraná. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 2, p. 317-324, 2008.

BARBOSA, M. A.; FERRAZ, R. L. S.; COUTINHO, E. L. M.; COUTINHO NETO, A. M.; SILVA, M. S.; FERNANDES, C.; RIGOBELLO, E. C. Multivariate analysis and modeling of soil quality indicators in long-term management systems. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 657, p. 457-465, 2019.

BARDGETT, R. D.; VAN DER PUTTEN, W. H. Belowground biodiversity and ecosystem functioning. **Nature**, London, v. 515, n. 7528, p. 505, 2014.

BATLLER-BAYER, L.; BATJES, N. H.; BINDRABAN, P. S. Changes in organic carbon stocks upon land use conversion in the Brazilian Cerrado: A review. **Agriculture, Ecosystems e Environment**, Amsterdam, v. 137, p. 47-58. 2010.

BÉGHIN-TANNEAU, R.; GUÉRIN, F.; GUIRESSE, M.; KLEIBER, D.; SCHEINER, J. D. Carbon sequestration in soil amended with anaerobic digested matter. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 192, p. 87-94, 2019.

BELLOTE, A. F. J.; FERREIRA, C. A. Nutrientes minerais e crescimento de árvores adubadas de Eucalyptus grandis, na região do cerrado, no Estado de São Paulo. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 26/27, p. 17-28, 1993.

BERNOUX, M.; CERRI, C. C.; VOLKOFF, B.; CARVALHO, M. C. S.; CERRI, C. E. P.; ESCHENBRENNER, V.; PICCOLO, M. C.; FEIGL, B. Gases do efeito estufa e estoques de carbono nos solos: inventário do Brasil. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasília, DF, v. 22, n. 1, p. 235-246, 2005.

BERTHRONG, S. T.; JOBBAGY, E. G.; JACKSON, R. B. A global meta-analysis of soil exchangeable cations, pH, carbon, and nitrogen with afforestation. **Ecological Applications**, Hoboken, v. 19, p. 2228-2241, 2009.

BICKEL, U.; DROS, J. M. **The impacts of soybean cultivation on Brazilian ecosystems: three case studies**. [S. l.]: WWF Forest Conversion Initiative, 2003.

BISTAFFA, B. C. **Incorporação de indicadores categóricos ordinais em modelos de equações estruturais**. 2010. 127 f. Dissertação (Mestrado em Estatística) - Instituto de Matemática e Estatística, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

BOLLEN, K. A. 1989. **Structural equations with latent variables**. New York: Wiley, 528 p.

BRAGA, B. **Introdução à engenharia ambiental**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005. 628 p.

BRAHIM, N.; BLAVET, D.; GALLALI, T.; BERNOUX, M. Application of structural equation modeling for assessing relationships between organic carbon and soil properties in semiarid Mediterranean region. **International Journal of Environmental Science and Technology**, Tehran, v. 8, p. 305-320, 2011.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Biomass**. Brasília, DF, 2019. Disponível em <https://www.mma.gov.br/biomass/cerrado%3e>. Acesso em: 15 ago. 2019.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente **Plano de ação para prevenção e controle do desmatamento e das queimadas: cerrado**. Brasília, DF, 2011. 200 p.

BRITO, L.F.; MARQUES Jr., J.; PEREIRA, J.T.; SOUZA, Z. M.; LA SCALA Jr., N. Soil CO₂ emission of sugarcane field as affected by topography. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 66, n. 1, p.77-83, 2009.

BUTLER, A.; MEIR, P.; SAIZ, G.; MARACAHIPES, L.; MARIMON, B. S.; GRACE, J. Annual variation in soil respiration and its component parts is two structurally contrasting woody savannas in Central Brazil. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 352, p. 129-142, 2012.

CARVALHO, J. L. N.; CERRI, C. E. P.; FEIGL, B. J.; PICCOLO, M. C.; GODINHO, V. P.; CERRI, C. C. Carbon sequestration in agricultural soils in the Cerrado region of the Brazilian Amazon. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 103, p. 342-349, 2009.

CARVALHO, M. A. C.; PANOSSO, A. R.; TEIXEIRA, E. E. R.; ARAÚJO, E.G.; BRANCAGLIONI, V. A., DALLACORT, R. Multivariate approach of soil attributes on the characterization of land use in the southern Brazilian Amazon. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, n. 184, p. 207-215, 2018.

CARNEIRO, M. A. C.; ASSIS, P. C. R.; MELO, L. B. C.; PEREIRA, H. S.; PAULINO, H. B.; SILVEIRA NETO, A. N. Atributos bioquímicos em dois solos de Cerrado sob diferentes sistemas de manejo e uso. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 38, n. 4, p. 276-283, 2008.

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

CHAN, K. Y. Soil particulate organic carbon under different land use and management. **Soil Use and Management**, Oxford, v. 17, n. 4, p. 217–221, 2001.

CHAVES, R. Q.; CORRÊA, G. F. Macronutrientes no sistema solo-*Pinus caribaea* Morelet em plantios apresentando amarelecimento das acículas e morte de planta. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 29, p.691-700, 2005.

CHEN, S.; HUANG, Y.; ZOU, J.; SHEN, Q.; HU, Z.; QIN, Y.; CHEN, H.; PAN, G. Modeling interannual variability of global soil respiration from climate and soil properties. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, n.150, p.590-605, 2010.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP. Faculdade de Engenharia. Clima FEIS/UNESP. **Dados de precipitação e temperatura média do ar**. Ilha Solteira, 2018. Disponível em: <http://clima.feis.unesp.br/>. Acesso em: 01 jun. 2018.

COHEN, J. **Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences**. Revised Edition. New York: Academic, 1977.

COLLARES, G. L.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 41, p. 1663-1674, 2006.

COOLS, N.; VESTERDAL, L.; DE VOS, B.; VANGUELOVA, E.; HANSEN, K. Tree species is the major factor explaining C:N ratios in European forest soils. **Forest Ecology Management**, Orlando, v. 311. p. 3-16, 2014.

COSER, T. R.; FIGUEIREDO, C.C.; JOVANOVIC, B.; MOREIRA, T. N.; LEITE, G. G.; CABRAL FILHO, S. L. S.; KATO, E.; MALAQUIAS, J. V.; MARCHAO, R. L. Short-term buildup of carbon from a low-productivity pastureland to an agrisilviculture system in the Brazilian savannah. **Agricultural Systems**, Amsterdam, v. 166, p. 1-12, 2018.

COSTA, F. S.; BAYER, C.; ZANATTA, J. A.; MIELNICZUK, J. Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, p. 323-332, 2008.

COSTA, F.S.; GOMES, J.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Métodos para avaliação das emissões de gases de efeito estufa no sistema solo-atmosfera. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 2, p. 693-700, 2006.

CRUSCIOL, C. A. C.; ARTIGIANI, A. C. C. A.; ARF, O.; CARMEIS FILHO, A. C. A.; SORATTO, R. P.; NASCENTE, A. S.; ALVAREZ, R. C. F. Soil fertility, plant nutrition, and grain yield of upland rice affected by surface application of lime, silicate, and phosphogypsum in a tropical no-till system. **Catena**, Amsterdam, v. 137, p. 87-99, 2016.

CUNHA, E. Q.; STONE, L. F.; FERREIRA, E. P.; DIDONET, A. D.; MOREIRA, J. A. A. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo sob produção orgânica impactados por sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 1, p. 56-63, 2012.

DALAL, R.C., MAYER, R.J. Long term trends in fertility of soils under continuous cultivation and cereal cropping in southern Queensland. II. Total organic carbon and its rate of loss from de soil profile. **Australian Journal of Soil Research**, Clayton, v. 24, p. 281-292, 1986.

DAVIDSON, E. A.; BELK, E.; BOONE, R. D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. **Global Change Biology**, Chichester, v. 4, p. 217-227, 1998.

DEMATTE, J. L. I. **Levantamento detalhado dos solos do “Campus experimental de Ilha Solteira”**. 1980. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior Agrícola Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1980.

DIAS, B. F. S. Conservação da biodiversidade no bioma Cerrado: histórico dos impactos antrópicos no bioma Cerrado. In: FALEIRO, F. G.; FARIAS NETO, A. L. (org.). **Savanas: desafios e estratégias para o equilíbrio entre sociedade, agronegócio e recursos naturais**. Planaltina: EMBRAPA Cerrados, 2008. p. 303-333.

DIAS, F. P. M.; HÜBNER, R.; JESUS NUNES, F.; LEANDRO, W. M.; SILVA XAVIER, F. A. Effects of land-use change on chemical attributes of a Ferralsol in Brazilian Cerrado. **Catena**, Amsterdam, v. 177, p. 180-188, 2019.

DONG, W.; LIU, E.; WANG, J.; YAN, C.; LI, J.; ZHANG, Y. Impact of tillage management on the short-and long-term soil carbon dioxide emissions in the dryland of Loess Plateau in China. **Geoderma**, Amsterdam, v. 307, p. 38-45, 2017.

EISENHAUER, N.; BOWKER, M.; GRAÇA, J. B.; POWELL, J. R. From patterns to causal understanding: Structural equation modeling (SEM) in soil ecology. **Pedobiologia**, Muenchen, v. 58, p. 65-72, 2015.

ELLERT, B. H.; BETTANY, J. R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 75, p. 529-538, 1995.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2017. 573 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília, DF: EMBRAPA, 2018. E-book.

EPRON, D., BOSCH, A., BONAL, D., FREYCON, V. Spatial variation of soil respiration across a topographic gradient in a tropical rain forest in French Guiana. **Journal of Tropical Ecology**, New York, v. 22, p. 565-574, 2006.

EZE, S.; PALMER, S. M.; CHAPMAN, P. J. Soil organic carbon stock and fractional distribution in upland grasslands. **Geoderma**, Amsterdam, v. 314, p. 175-183, 2018.

FARHATE, C. V. V.; SOUZA, Z. M. D.; OLIVEIRA, S. R. D. M.; CARVALHO, J. L. N.; SCALA JÚNIOR, N. L.; SANTOS, A. P. G. Classification of soil respiration in areas of sugarcane renewal using decision tree. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 75, p. 216-224, 2018.

FARINA, R.; FRANCAVIGLIA, R.; NAPOLI, R.; BENE, C. D. Modeling regional soil C stocks and CO₂ emissions under mediterranean cropping systems and soil types. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 238, p. 128-141, 2016.

FEI, P.; XIAN, X.; QUANGANG, Y.; CUIHUA, H.; SIYANG, D.; JIE, L.; HANCHEN, D.; TSUNEKAWA, A.; TAO, W. Changes of soil properties regulate the soil organic carbon loss with grassland degradation on the Qinghai-Tibet Plateau. **Ecological Indicators**, Amsterdam, v. 93, p. 572-580, 2018.

FERREIRA, E. C.; ANZANO, J. M.; MILORI, D.; FERREIRA, E. J.; LASHERAS, R. J.; BONILLA, B.; MONTULL-IBOR, B.; CASAS, J.; NETO, L. M. Multiple Response Optimization of Laser-Induced Breakdown Spectroscopy Parameters for Multi-element Analysis of Soil Samples. **Applied Spectroscopy**, Thousand Oaks, v. 63, p. 1081-1088, 2009.

FLEISCHER, K.; RAMMIG, A.; DE KAUWE, M. G.; WALKER, A. P.; DOMINGUES, T. F.; FUCHSLUEGER, L.; HAVERD, V. Amazon forest response to CO₂ fertilization dependent on plant phosphorus acquisition. **Nature Geoscience**, London, v. 12, n. 9, p. 736-741, 2019.

FRANCAVIGLIA, R.; BENEDETTI, A.; DORO, L.; MADRAU, S.; LEDDA, L. Influence of land use on soil quality and stratification ratios under agro-silvo-pastoral Mediterranean management systems. **Agriculture Ecosystems & Environment**, London, v. 183, p. 86–92, 2014.

FREITAS, L.; CASAGRANDE, J. C.; OLIVEIRA, I. A.; JÚNIOR SOUZA, P. R.; CAMPOS, M. C. C. Análises multivariadas de atributos químicos do solo para caracterização de ambientes. **Revista Agro@ambiente On-line**, [S. l.], v. 8, n. 2, p. 155-164, 2014.

FREITAS, R. DE C. A. DE, POPIN, G. V., MILORI, D. M. B. P., SIGNOR, D., DRUMOND, M. A., CERRI, C. E. P. Soil organic matter quality in *Jatropha* spp. plantations in different edaphoclimatic conditions. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 41, p.1-18, 2017.

FUENTES, J. P.; BEZDICEK, D. F.; FLURY, M.; ALBRECHT, S.; SMITH, J. L. Microbial activity affected by lime in a long-term no-till soil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 88, p. 123- 131, 2006.

GARBUIO, F. J.; JONES, D. L.; ALLEONI, L. R. F.; MURPHY, D. V.; CAIRES, E. F. Carbon and nitrogen dynamics in an oxisol as affected by liming and crop residues under no-till. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 72, p. 1723-1730, 2011.

GATTO, A.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; SILVA, I. R.; LEITE, H. G.; LEITE, F. P.; VILLANI, E. M. A. Estoques de carbono no solo e na biomassa em plantações de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 34, p. 1069-1079, 2010.

GELSOMINO, A.; AZZELLINO, A. Multivariate analysis of soils: microbial biomass, metabolic activity, and bacterial-community structure and their relationships with soil depth and type. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 174, p. 381-394, 2011.

GMACH, M. R.; DIAS, B. O.; SILVA, C. A.; NÓBREGA, J. C. A.; LUSTOSA-FILHO, J. F.; SIQUEIRA-NETO, M. 2018. Soil organic matter dynamics and land-use change on Oxisols in the Cerrado, Brazil. **Geoderma Regional**, Amsterdam, v. 14, p. 1-8, 2018.

GOEDERT, W. J. Management of the Cerrado soils of Brazil: a review. **Journal of Soil Science**, Chichester, v. 34, p. 405-428, 1983.

GRECCHI, R. C.; GWYN, Q. H.; BÉNIÉ, G. B.; FORMAGGIO, A. R.; FAHL, F. C.; Land use and land cover changes in the Brazilian Cerrado: A multidisciplinary approach to assess the impacts of agricultural expansion. **Applied Geography**, Amsterdam, v. 55, p. 300-312, 2014.

GUEDES, I. M. R. **Mudanças climáticas globais e a produção de hortaliças**. Brasília, DF: Embrapa Hortaliças, 2009. 132 p.

HAIR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. **Análise multivariada de dados**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009. 688 p.

HAIR JR, J. F.; HULT, G. T. M.; RINGLE, C.; SARSTEDT, M. **A primer on partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM)**. [S. l.]: Sage, 2014.

HAN, G.; ZHOU, G.; XU, Z.; YANG, Y.; LIU, J.; SHI, K. Biotic and abiotic factors controlling the spatial and temporal variation of soil respiration in an agricultural ecosystem. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v. 39, p. 418-425, 2007.

HANNAM, K. D.; MIDWOOD, A. J.; NEILSEN, D.; FORGE, T. A.; JONES, M. D. Bicarbonates dissolved in irrigation water contribute to soil CO₂ efflux. **Geoderma**, Amsterdam, v. 337, p. 1097-1104, 2019.

HUNKE, P.; ROLLER, R.; ZEILHOFER, P.; SCHRODER, B.; MUELLER, E. N. Soil changes under different land-uses in the Cerrado of Mato Grosso, Brazil. **Geoderma Regional**, Amsterdam, v. 4, p. 31-43, 2015.

IPCC. **Climate change 2007**: The physical science basis. Summary for policymakers. Geneva, 2007. 18 p.

IPCC. **Intergovernmental Panel on Climate Change**. [S. l.: s. n.], 2019. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/srccl-report-download-page/>. Acesso em: 15 ago. 2019.

- JENKINSON, D. S.; HARKNESS, D. D.; VANCE, E. D.; ADAMS, D. E.; HARRISON, A. F. Calculating net primary production and annual input of organic matter to soil from the amount and radiocarbon content of soil organic matter. **Soil Biology & Biochemistry**, Amsterdam, v. 24, n. 4, p. 295–308, 1992.
- JIANG, P.; THELEN, K. D. Effect of soil and topographic properties on crop yield in a north-central corn–soybean cropping system. **Agronomy Journal**, Madison, v. 96, n. 1, p. 252-258, 2004.
- JOERGENSEN, R. G.; WICHERN, F. Alive and Kicking: Why dormant soil microorganisms matter. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 116, p. 419-430, 2018.
- JOSÉ, J. V.; WOLFF, W.; DIOTTO, A.V.; ALVES, D. S.; MARQUES, P. A. A.; GAVA, R. Análise multivariada de variáveis físico-hídricas de diferentes solos. In: WORKSHOP DE INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS NA IRRIGAÇÃO, 4., 2012, Fortaleza. **Anais** [...] Fortaleza: INOVAGRI, 2012. p. 1-5.
- KIEHL, E. J. **Manual de edafologia**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 262 p.
- KLEINPAUL, I. S.; SCHUMACHER, M. V.; BRUN, E. J.; BRUN, F. G. K.; KLEINPAUL. Suficiência amostral para coletas de serapilheira acumuladas sobre o solo em *Pinus elliottii* Engelm, *Eucalyptus* sp. E floresta estacional decidual. **Revista Árvore**, v. 29, n. 6, p. 965-972, 2005.
- LAL, R. Soil carbon dynamics in cropland and rangeland. **Environmental pollution**, Oxford, v. 116, n. 3, p. 353-362, 2002.
- LAL, R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. **Science**, Washington, v. 304, p. 1623-1627, 2004.
- LA SCALA JÚNIOR, N.; FIGUEIREDO, E. B.; PANOSSO, A. R. A review on soil carbon accumulation due to the management change of major Brazilian agricultural activities. **Brazilian Journal of Biology**, Sao Carlos, v. 72, n. 3, p. 775-785, 2012.
- LA SCALA JÚNIOR, N.; BOLONHEZI, D.; PEREIRA, G. T. Shortterm soil CO₂ emission after conventional and reduced tillage of a no till sugar cane area in Southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 91, n. 1-2, p. 244-248, 2006.

LEON, E.; VARGAS, R.; BULLOCK, S.; LOPEZ, E.; PANOSSO, A. R.; SCALA JÚNIOR, N. L. Hot spots, hot moments, and spatio-temporal controls on soil CO₂ efflux in a water-limited ecosystem. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 77, p. 12-21, 2014.

LI, Y.; CHANG, S. X.; TIAN, L.; ZHANG, Q. Conservation agriculture practices increase soil microbial biomass carbon and nitrogen in agricultural soils: A global meta-analysis. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 121, p. 50-58, 2018.

LUO, Y.; ZHOU, X. **Soil respiration and the environment**. San Diego: Academic, 2006. 328 p.

LYBBERT, T. J.; SUMNER, D. A. Agricultural technologies for climate change in developing countries: Policy options for innovation and technology diffusion. **Food Policy**, Oxford, v. 37, n. 1, p. 114-123, 2012.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, A. S. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: Potafós, 1997. 319 p.

MARÔCO, J. **Análise de equações estruturais: fundamentos teóricos, software e aplicações**. Pero Pinheiro: Report Number, 2010. 384 p.

MARIN, A. M. P.; MENEZES, R. S. C.; SILVA, E. D.; SAMPAIO, E. V. S. B. Efeito da *Gliricidia sepium* sobre nutrientes do solo, microclima e produtividade do milho em sistema agroflorestal no Agreste Paraibano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Vicosa, MG, v. 3, n. 3, p. 555-564, 2006.

MARTÍN, N. F.; BOLLERO, G.; BULLOCK D. G. Associations between field characteristics and soybean plant performance using canonical correlation analysis. **Plant and Soil**, Switzerland, v. 273, n. 1, p. 39–55, jun. 2005.

MARTINELLI, G. C.; SCHLINDWEIN, M. M.; PADOVAN, M. P.; VOGEL, E.; RUVIARO, C. F. Environmental performance of agroforestry systems in the Cerrado biome, Brazil. **World Development**, Oxford, v. 122, p. 339-348, 2019.

MENDONÇA, L. A. R.; VÁSQUEZ, M. A. N.; FEITOSA, J. V.; OLIVEIRA, J. F.; FRANCA, R. M.; VÁSQUEZ, E. M. F.; FRISCHKORN, H. Avaliação da capacidade de infiltração de solos submetidos a diferentes tipos de manejo. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 1, p. 89-98, 2009.

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

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Plano de ação para prevenção e controle do desmatamento e das queimadas**: cerrado. Brasília, DF: MMA, 2011. 200 p.

MIRANDA, C. C.; CANELLAS, L. P.; NASCIMENTO, M. T. Caracterização da matéria orgânica do solo em fragmentos de mata atlântica e em plantios abandonados de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 5, p. 905-916, 2007.

MOITINHO, M. R.; PADOVAN, M. P.; PANOSSO, A. R.; TEIXEIRA, D. B.; FERRAUDO, A. S.; LA SCALA JUNIOR, N. On the spatial and temporal dependence of CO₂ emission on soil properties in sugarcane (*Saccharum* spp.) production. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 148, p. 127-132, 2015.

MONECKE, A.; LEISCH, F. SemPLS: Structural Equation Modeling Using Partial Least Squares. **Journal of Statistical. Software**, Los Angeles, v. 48, p. 1-32, 2012.

MORAES, J. F. L.; VOLKOFF, B.; CERRI, C. C.; BERNOUX, M. Soil properties under Amazon forest and changes due to pasture installation in Rondônia, Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 70, p. 63-81, 1996.

MUSCHLER, R.G. **Árboles en cafetales**. Turrialba, Costa Rica: Catie/ GTZ, 2000.

NICODEMO, M. L. F.; BORGES, W. L. B.; SOUZA, I. M. D. Atributos físicos do solo em quatro sistemas de uso da terra em São Carlos, SP. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, [S. l.], v. 13, n. 2, e5524, 2018.

OLIVEIRA, I. A.; CAMPOS, M. C. C.; FREITAS, L.; SOARES, M. D. R. Caracterização de solos sob diferentes usos na região sul do Amazonas. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 45, n. 1, p. 1-12, 2015.

PANOSSO, A. R.; MARQUES JÚNIOR, J.; MILORI, D. M. B. P.; FERRAUDO, A. S.; BARBIERI, D. M.; PEREIRA, G. T.; LA SCALA JÚNIOR, N. Soil CO₂ emission and its relation to soil properties in sugarcane areas under Slash-and-burn and Green harvest. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 111, p. 190-196, 2011.

PAIVA, A. O.; REZENDE, A. V.; PEREIRA, R. S. Estoque de Carbono em cerrado sensu stricto do Distrito Federal. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 35, p. 527-538, 2011.

PEIXOTO, K. S.; MARIMON-JUNIOR, B. H.; MARIMON, B. S.; ELIAS, F.; FARIAS, J.; FREITAG, R.; MEWS, H. A.; NEVES, E. C.; PRESTES, N. C. C. S.; MALHI, Y. Unravelling ecosystem functions at the Amazonia-Cerrado transition: II. Carbon stocks and CO₂ soil efflux in cerradão forest undergoing ecological succession. **Acta Oecologica**, Issy les Moulineaux Cedex, v. 82, p. 23-31, 2017.

PEREIRA, M. F. S.; NOVO JÚNIOR, J.; SÁ, J. R.; LINHARES, P. C. F.; BEZERRA NETO, F.; PINTO, J. R. S. Ciclagem do carbono do solo nos sistemas de plantio direto e convencional. **Revista ACSA - Agropecuária Científica no Semi-Árido**, Campo Grande, v. 8, n. 1, p. 21-33, 2013.

PHILLIPS, C. L.; BOND-LAMBERTY, B.; DESAI, A. R.; LAVOIE, M.; RISK, D.; TANG, J.; TODD-BROWN, K. The value of soil respiration measurements for interpreting and modeling terrestrial carbon cycling. **Plant Soil**, Dordrecht, v. 413, p. 1-25, 2017.

PORTUGAL, A. F.; COSTA, O. D. V.; COSTA, L. M. Propriedades físicas e químicas do solo em áreas com sistemas produtivos e mata na região da zona da mata mineira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 34, p. 575-585, 2010.

PRAGANA, R. B.; NOBREGA, R. S. A.; RIBEIRO, M. R.; LUSTOSA FILHO, J. F. Atributos biológicos e dinâmica da matéria orgânica em Latossolos Amarelos na região do Cerrado piauiense sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 36, n. 3, p. 851-858, 2012.

PRIMO, D. C.; MENEZES, R. S. C.; SILVA, T. O. Substâncias húmicas da matéria orgânica do solo: uma revisão de técnicas analíticas e estudos no nordeste brasileiro. **Scientia Plena**, Itabaiana, v. 7, p. 1-13, 2011.

RAYKOV, T.; MARCOULIDES, G. A. **A first course in structural equation modeling**. 2. ed. New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates, 235 p. 2006.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **A language and environment for statistical computing**. Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2018. ISBN 3-900051-07-0.

RAIJ, B. V. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285 p.

RAIJ, B. V.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (ed.) **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: IAC, 1997. 285 p. (Boletim Técnico, 100).

RAIJ, B. V.; DE ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química do solo para fins de fertilidade**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. 170 p.

RINGLE, C. M.; SILVA, D.; BIDO, D. Modelagem de equações estruturais com utilização do smartpls. **Revista Brasileira de Marketing**, Água Branca, v. 13, p. 56-73, 2014.

ROITMAN, I.; BUSTAMANTE, M. M. C.; HAIDAR, R. F.; SHIMBO, J. Z.; ABDALA, G. C.; EITEN, G.; FAGG, C. W.; FELFILI, M. C.; FELFILI, J. M.; JACOBSON, T. K. B.; LINDOSO, G. S.; KELLER, M.; LENZA, E.; MIRANDA, S. C.; PINTO, J. R. R.; RODRIGUES, A. A.; DELITTI, W. B. C.; ROITMAN, P.; SAMPAIO, J. M. Optimizing biomass estimates of savanna woodland at different spatial scales in the Brazilian Cerrado: Re-evaluating allometric equations and environmental influences. **PloS One**, San Francisco, v. 13, 2018.

RONQUIM, C. C. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2010. 26 p.

ROSSATO, R. R. **Potencial de ciclagem de nitrogênio e potássio pelo nabo forrageiro intercalar ao cultivo do milho e trigo em plantio direto**. 2004. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; FABRICIO, A. C.; MACEDO, M. C. M.; BROCH, D. L. Teor e dinâmica do carbono no solo em sistemas de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 46, p.1349-1356, 2011.

SANCHES FERNANDES, L. F.; FERNANDES, A. C. P.; FERREIRA, A. R. L.; CORTES, R. M. V.; PACHECO, F. A. L. A partial least squares - Path modeling analysis for the understanding of biodiversity loss in rural and urban watersheds in Portugal. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 626, p. 1069-1085, 2018.

SANT-ANNA, S. A.; JANTALIA, C. P.; SÁ, J. M.; VILELA, L.; MARCHÃO, R. L.; ALVES, B. J.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Changes in soil organic carbon during 22 years of pastures, cropping or integrated crop/livestock systems in the Brazilian Cerrado. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 108, n. 1, p. 101-120, 2017.

SARTOR, L. R.; ADAMI, P. F.; CHINI, N.; MARTIN, T. N.; MARCHESE, J. A.; SOARES, A. B. Alelopatia de acículas de *Pinus taeda* na germinação e no desenvolvimento de plântulas de *Avena strigosa*. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, 2009.

SCHWENDENMANN, L.; VELDKAMP, E.; BRENES, T.; O'BRIEN, J. J.; MACKENSEN, J. Spatial and temporal variation in soil CO₂ efflux in an old-growth neotropical rain forest, La Selva, Costa Rica. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 64, p.111-128, 2003.

SECCO, D.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; DA ROS, C. O. Produtividade de soja e propriedades físicas de um Latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, p. 797-804, 2004.

SEGNINI, A.; CARVALHO, J. L. N.; BOLONHEZI, D.; MILORI, D.; DA SILVA, W. T. L.; SIMOES, M. L.; CANTARELLA, H.; DE MARIA, I. C.; MARTIN-NETO, L. Carbon stock and humification index of organic matter affected by sugarcane straw and soil management. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 70, p. 321-326, 2013.

SEGNINI, A., MILORI, D.M.B.P., SIMÕES, M. L., SILVA, W.T.L., PRIMAVESI, O., MARTIN-NETO, L. Potencial de sequestro de carbono em área de pastagem de *Braquiaria decumbens*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 31, Gramado. Conquistas e desafios da ciência do solo brasileira. **Anais [...]** Porto Alegre: SBCS, 2007.

SILVA, E. N. S.; MONTANARI, R.; PANOSSO, A. R.; CORREA, A. R.; TOMAZ, P. K.; FERRAUDO, A. S. Variabilidade de atributos físicos e químicos do solo e produção de feijoeiro cultivado em sistema de cultivo mínimo com irrigação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 39, n. 2, p. 598-607, 2015.

SILVA, J. S. F. 2006. **Modelagem de equações estruturais**: apresentação de uma metodologia. 2006. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

SILVA, L. G., MENDES, I. D. C., REIS JUNIOR, F. B., FERNANDES, M. F., & KATO, E. Atributos físicos, químicos e biológicos de um Latossolo de Cerrado em plantio de espécies florestais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 44, n. 6, p. 613-620, 2009.

SILVA, M. B. **Estoques de carbono e nitrogênio e disponibilidade de nutrientes em sistemas silvipastoris em região tropical sub-úmida**. 2017. 72 f. Dissertação (Mestrado em ciências do solo, Recife, Universidade Federal Rural de Pernambuco.

SIMON, C. P. **Emissão de CO₂ e atributos físicos em diferentes sistemas de preparo do solo**. 2018. 52 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical) – Universidade Federal do Espírito Santos – UFES, Vitória, 2018.

SIQUEIRA NETO, M. S.; PICCOLO, M. C.; COSTA JUNIOR, C.; CERRI, C. C.; BERNOUX, M. Emissão de gases do efeito estufa em diferentes usos da terra no bioma Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 35, n. 1, p. 63-76, 2011.

SOTTA, E. D.; VELDKAMP, E.; GUIMARÃES, B. R.; PAIXÃO, R. K.; RUIVO, M. L. P.; ALMEIDA, S. S. Landscape and climatic controls on spatial and temporal variation in soil CO₂ efflux in an Eastern Amazonian Rainforest, Caxiuanã, Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 237, p. 57–64, 2006.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E.; REIN, T. A. Adubação com fósforo. *In*: SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. – Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. Cap. 6, p. 147-168.

SOUZA, E. D.; COSTA, S. E. V. G. A.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. F.; ANDRIGUETI, M.; CAO, E. Estoques de carbono orgânico e de nitrogênio no solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, n. 6, p. 1829-1836, 2009.

SPERA, S. T.; SANTOS, H. P.; FONTANELI, R. S.; TOMM, G. O. Efeito de pastagens de inverno e de verão em características físicas de solo sob plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, p. 1193-1200, 2006.

TENENHAUS, M.; VINZI, V. E.; CHATELIN, Y. M.; LAURO, C. PLS path modeling. **Computational Statistics & Data Analysis**, Amsterdam, v. 48, n. 1, p. 159-205. 2005.

TORRES, J. L. R.; PEREIRA, M. G.; ANDRIOLI, I.; POLIDORO, J. C.; FABIAN, A. J. Decomposição e liberação de nitrogênio de resíduos culturais de plantas de cobertura em um solo de Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, p. 609-618, 2005.

TRESCH, S.; FREY, D.; BAYON, R.C.L.; ZANETTA, A.; RASCHE, F.; FLIESSBACH, A.; MORETTI, M. Litter decomposition driven by soil fauna, plant diversity and soil management in urban gardens. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, p. 1614-1629, 2019.

TRUMBORE, S. Carbon respired by terrestrial ecosystems: Recent progress and challenges. **Global Change Biology**, Chichester, v. 12, p. 141-153, 2006.

VAZQUEZ, E.; BENITO, M.; ESPEJO, R.; TEUTSCHEROVA, N. Effects of no-tillage and liming amendment combination on soil carbon and nitrogen mineralization. **European Journal of Soil Biology**, Issy les Moulineaux Cedex, v. 93, p. 103090, 2019.

VICINI, L. **Análise multivariada da teoria à prática**. 2005. 215 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Produção) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

WEBER, M. A.; MIELNICZUK, J. Estoque e disponibilidade de nitrogênio no solo em experimento de longa duração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, p. 429-437, 2009.

WEN, L.; JINLAN, W.; XIAOJIAO, Z.; SHANGLI, S.; WENXIA, C. Effect of degradation and rebuilding of artificial grasslands on soil respiration and carbon and nitrogen pools on an alpine meadow of the Qinghai-Tibetan Plateau. **Ecological Engineering**, Amsterdam, v. 111, p. 134-142, 2018.

WOLD, H. Partial Least Squares. *In*: KOTZ, S.; JOHNSON, N. L. (ed.) *Encyclopedia of Statistical Sciences*, New York, v. 6, p. 581–591, 1985.

WOLD, H. **Estimation of principal components and related models by iterative least squares**. *In*: KRISHNAIAH, P. R. (ed.) *Multivariate analysis*. New York: Academic, 1966. p. 391-420.

WOLD, H. Soft Modeling: Intermediate between Traditional Model Building and Data Analysis. **Mathematical Statistics**, Heidelberg, v. 6, p. 333–346, 1982.

WOLF, S.; EUGSTER, W.; POTVIN, C.; BUCHMANN. Strong seasonal variations in net ecosystem CO₂ exchange of a tropical pasture and afforestation in Panama. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 151, p. 1139-1151, 2011.

YANG, Y.; DOU, Y.; AN, S. Testing association between soil bacterial diversity and soil carbon storage on the loess Plateau. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, n. 626, p. 48-58, 2018.

ZHANG, H.; DENG, Q.; HUI, D.; WU, J.; XIONG, X.; ZHAO, J.; ZHAO, M.; CHU, G.; ZHOU, G.; ZHANG, D. Recovery in soil carbon stock but reduction in carbon stabilization after 56-year forest restoration in degraded tropical lands. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 441, p. 1-8, 2019.

ZHAO, W.; ZHANG, R.; CAO, H.; TAN, W. Factor contribution to soil organic and inorganic carbon accumulation in the Loess Plateau: Structural equation modeling. **Geoderma**, Amsterdam, v. 352, p. 116-125, 2019.

ZINN, Y. L.; MARRENJO, G. J.; SILVA, C. A. Soil C:N ratios are unresponsive to land use change in Brazil: A comparative analysis. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 255, p. 62-72, 2018.