

**Universidade de São Paulo  
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Saúde do solo e estoque de carbono em áreas com sistemas integrados de  
produção no Cerrado**

**Maria Emília Moreira Maróstica**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestra  
em Ciências. Área de concentração: Solos e Nutrição de  
Plantas

**Piracicaba  
2023**

**Maria Emília Moreira Maróstica**  
**Engenheira Agrônoma**

**Saúde do solo e estoque de carbono em áreas com sistemas integrados de produção  
no Cerrado**

versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:

Prof. Dr. **MAURÍCIO ROBERTO CHERUBIN**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestra  
em Ciências. Área de concentração: Solos e Nutrição de  
Plantas

**Piracicaba**  
**2023**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP**

Maróstica, Maria Emília Moreira

Saúde do solo e estoque de carbono em áreas com sistemas integrados de produção no Cerrado / Maria Emília Moreira Maróstica. -- versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011. -- Piracicaba, 2023.

59 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

1. Saúde do solo 2. Integração lavoura-pecuária 3. Integração lavoura-pecuária-floresta 4. SMAF I. Título

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (USP-ESALQ) e ao Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, por me proporcionarem a realização desse mestrado e tantas outras oportunidades de crescimento e desenvolvimento pessoal e profissional, as quais sou muito grata.

À Bayer, com o projeto “BALANÇO DE CARBONO EM SISTEMAS AGRÍCOLAS: revelando o impacto da adoção de práticas de manejo sustentáveis nos estoques de carbono do solo e nas emissões de gases de efeito estufa” (projeto FEALQ #104091), pelo investimento, disponibilização de recursos para a pesquisa e confiança no trabalho do nosso grupo.

Ao Prof. Dr. Maurício Roberto Cherubin, meu orientador nesse projeto, agradeço o constante exemplo, incentivo, e por tamanha contribuição no meu futuro profissional, e de tantos outros alunos. Obrigada por nos proporcionar tantas oportunidades, apostar em nosso potencial e apoiar nosso desenvolvimento.

À todos os colegas do grupo Soil Health & Management Research Group (SOHMA), não só por toda a ajuda nas atividades realizadas, mas também pelo apoio emocional e ambiente positivo e incentivador que construímos.

À Prof. Dra. Leidivan Almeida Frazão, que me auxiliou na escolha das áreas de estudo e me orientou em inúmeros detalhes, sou grata aos seus ensinamentos e contribuição. Agradeço também a Jaqueline e a Ana, orientadas da Leidivan, que participaram comigo das coletas de solo, esse trabalho não existiria sem toda a ajuda prestada por elas.

Agradeço à família que me escolheu e que eu também escolhi em Piracicaba, a República Saia-Justa. Aos meus pais, Cristiane e Emilson, pois sem o suporte deles eu não poderia ter aproveitado essa oportunidade, além de todo o exemplo de amor, educação e valores que me foram transmitidos, algo que nunca serei capaz de agradecer o suficiente. Minha irmã, Ana Flávia, que é a minha companhia diária, mesmo longe, e me apoia em tudo que necessito.

Por fim, agradeço imensamente a Deus por me permitir viver o que vivo hoje.



**EPIGRAFE**

*“Educação sem valores, por mais útil que seja, parece suficiente para tornar o homem um demônio mais inteligente.”*

*C. S. Lewis*

## SUMÁRIO

RESUMO.....	6
ABSTRACT .....	7
1. INTRODUÇÃO.....	9
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	13
2.1. Áreas de estudo.....	13
2.2. Descrição e histórico dos experimentos .....	14
2.3. Coletas de solo.....	18
2.4. Análises de solo .....	19
2.4.1 Estoque de carbono.....	19
2.4.2 Indicadores químicos.....	19
2.4.3 Indicadores físicos .....	19
2.4.4 Indicadores biológicos.....	19
2.5. Avaliação da saúde do solo .....	19
2.6. Análise de dados.....	19
3. RESULTADOS .....	22
3.1 Indicadores da saúde química do solo .....	23
3.2 Indicadores da saúde física do solo .....	14
3.3 Indicadores da saúde biológica do solo .....	32
3.4. Índice de saúde do solo.....	19
4. DISCUSSÃO .....	43
4.1. Impactos da adoção de sistemas integrados nos estoques de c do solo.....	13
4.2. Impactos da adoção de sistemas integrados na saúde do solo.....	13
4.2.1 Indicadores da saúde química do solo .....	14
4.2.2 Indicadores da saúde física do solo .....	18
4.2.3 Indicadores da saúde biológica do solo .....	19
4.2.4 Índice de saúde do solo (ISS) .....	19
5. CONCLUSÃO.....	53
REFERÊNCIAS .....	55

## RESUMO

### **Saúde do solo e estoque de carbono em áreas com sistemas integrados de produção no Cerrado**

Sistemas agrícolas cada vez mais intensificados e diversificados têm se destacado, pois viabilizam a produção de dois ou mais produtos agrícolas na mesma área e beneficiam diversos serviços ecossistêmicos devido a presença de uma maior diversidade de espécies de plantas dentro da unidade produtiva, afetando diretamente a saúde do solo. Além disso, a intensificação dos cultivos pode significar maiores aportes de C ao solo, contribuindo para a diminuição das emissões de gases de efeito estufa (GEE), uma das principais metas globais de sustentabilidade. Portanto, o objetivo deste estudo avaliar e quantificar os impactos dos sistemas integrados na saúde do solo e mensurar os valores de estoque de carbono (COS) dentro desses sistemas, em áreas do Cerrado brasileiro. Foram selecionadas duas áreas de estudo, localizadas na região Sudeste, nos municípios de Prudente de Moraes (MG) e Bambuí (MG), com 6 e 5 tratamentos em cada uma, respectivamente, contendo um estrato de vegetação nativa, pastagens melhoradas e degradadas, e sistemas integrados de cultivo. Em ambas, as coletas em cada tratamento foram realizadas a partir da alocação aleatória de 4 pontos amostrais nos sistemas solteiros, e nos sistemas que continham o componente florestal, foram coletadas 3 repetições por ponto amostral, totalizando 12 pontos, que foram feitos na entrelinha dos renques duplos, na projeção da copa do eucalipto e no meio da aleia. Amostras indeformadas e deformadas foram coletadas, nas seguintes profundidades: 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50, 50-60, 60-70, 70-80, 80-90 e 90-100 cm. Tais amostras passaram por análises químicas (pH, P e K), físicas (densidade do solo) e biológicas ( $\beta$ -glicosidase, arilsulfatase e C total). A saúde do solo foi avaliada usando a ferramenta Soil Management Assessment Framework (SMAF). Os resultados revelaram a capacidade dos sistemas agrícolas integrados de manterem valores de estoque de C semelhantes, e até superiores aos valores encontrados na vegetação nativa do local. Em relação a saúde do solo, os índices calculados para a camada de 0-30 cm usando a SMAF, não diferiram de forma significativa entre si, porém foi possível observar que os maiores valores de ISS foram encontrados na vegetação nativa, em ambas as áreas experimentais, e os menores valores foram encontrados no ILPF 3, em Prudente de Moraes, e na PD, em Bambuí. Contudo, este estudo foi importante no entendimento do potencial regional dos sistemas integrados, que demonstraram sua importância e a necessidade de incluí-los nas estratégias do Brasil visando a mitigação das mudanças climáticas e o atendimento de metas mundiais de redução das emissões de gases de efeito estufa.

Palavras-chave: Sequestro de carbono, qualidade do solo, sistemas conservacionistas, SMAF

## ABSTRACT

### **Soil health and carbon stocks under integrated systems in Brazilian Cerrado**

Increasingly intensified and diversified agricultural systems have stood out, as they enable the production of two or more agricultural products in the same area and benefit various ecosystem services due to the presence of a greater diversity of plant species within the production unit, directly affecting health from soil. Furthermore, the intensification of crops can mean greater contributions of C to the soil, contributing to the reduction of greenhouse gas (GHG) emissions, one of the main global sustainability goals. Therefore, the objective of this study is to evaluate and quantify the impacts of integrated systems on soil health and measure carbon stock values (COS) within these systems, in areas of the Brazilian Cerrado. Two study areas were selected, located in the Southeast region, in the municipalities of Prudente de Morais (MG) and Bambuí (MG), with 6 and 5 treatments in each, respectively, containing a stratum of native vegetation, improved and degraded pastures, and integrated cultivation systems. In both, the collections in each treatment were carried out based on the random allocation of 4 sampling points in the single systems, and in the systems that contained the forest component, 3 repetitions were collected per sampling point, totaling 12 points, which were made between the lines of the double rows, in the projection of the eucalyptus canopy and in the middle of the alley. Undisturbed and deformed samples were collected at the following depths: 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50, 50-60, 60-70, 70-80, 80-90 and 90-100 cm. These samples underwent chemical (pH, P and K), physical (soil density) and biological ( $\beta$ -glucosidase, arylsulfatase and total C) analyses. Soil health was assessed using the tool Soil Management Assessment Framework (SMAF). The results revealed the capacity of integrated agricultural systems to maintain C stock values similar to, and even higher than, the values found in the local native vegetation. In relation to soil health, the indices calculated for the 0-30 cm layer using SMAF did not differ significantly from each other, however it was possible to observe that the highest ISS values were found in native vegetation, in both areas. experimental, and the lowest values were found in ILPF 3, in Prudente de Morais, and in PD, in Bambuí. Nevertheless, this study was important in understanding the regional potential of integrated systems, which demonstrated their importance and the need to include them in Brazil's strategies aimed at mitigating climate change and meeting global targets for reducing greenhouse gas emissions.

Keywords: Soil health, Carbon stocks, Integrated systems, SMAF



## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, existem dois grandes desafios mundiais onde o setor agrícola como um todo é protagonista: aumentar a produção de alimentos para suprir as demandas de uma população em crescimento (Nações Unidas, 2022) e ao mesmo tempo adotar práticas sustentáveis de manejo, que consigam reverter e/ou mitigar os danos causados por alguns dos manejos atuais, mesmo em sistemas intensivos (Karlen e Rice, 2015). No Brasil, o bioma do Cerrado ocupa aproximadamente 23,3% do território do país, sendo até hoje uma das principais fronteiras agrícolas do mundo (Bonanomi et al, 2019). No entanto, a conversão de áreas de vegetação nativa em áreas de produção agrícola pode afetar negativamente a saúde do solo e os estoques de carbono (C) do solo, dependendo do sistema de manejo utilizado (Ogle et al., 2005; Dolan et al., 2006).

Nesse contexto, foram surgindo e sendo cada vez mais pesquisados sistemas agrícolas que consigam melhorar as propriedades físicas, químicas e biológicas dos solos e também aumentar o acúmulo de C no solo, contribuindo também na mitigação do aquecimento global (Bayer et al., 2006). Os sistemas de produção integrados compreendem o cultivo de pastagens anuais e perenes, alternando safras anuais com o objetivo de intensificar a produção de carne e grãos (Soares et al., 2020). Tais sistemas permitem estabelecer a agricultura e a exploração de estoques sob diferentes sistemas de rotação, alternando períodos de manejo e produção de grãos na mesma área (Vilela et al., 2011). Na safra 20/21, uma pesquisa publicada por Polidoro et al. (2020) estimou que o Brasil aumentou sua área com sistemas integrados para 17.431.533 hectares, sendo que da safra 15/16 até a safra 20/21, o aumento total das áreas com esses sistemas foi de 52%.

Os sistemas integrados são formas de manejo complexas, que alteram fatores relacionados a produtividade, principalmente se comparados ao amonocultivo (Moraes et al., 2014). Em relação ao sequestro e estoque de carbono no solo, Nair et al. (2009) observou efeitos positivos de sistemas agroflorestais no estoque de carbono do solo ao longo do tempo. Já Oliveira et al. (2018) não encontrou diferenças no estoque de carbono da camada 0-30 cm em áreas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) comparadas a pastagem extensiva. No entanto, além dos estoques totais de carbono, outros estudos mostram que os sistemas integrados podem ter impactos nas frações mais lábeis da matéria orgânica do solo, que são mais sensíveis a mudança de uso da terra a curto prazo (Sant-Anna et al., 2017). A biodiversidade de espécies dentro desses sistemas promove diferentes entradas de matéria orgânica no solo, que representa a fonte de energia para uma maior população de

microorganismos no solo, o que aumenta a saúde biológica do solo e, conseqüentemente, pode aumentar os estoques de carbono a longo prazo e, possivelmente, também contribuir positivamente para a saúde do solo (Dollinger e Jose, 2018).

A saúde do solo (SS) foi definida por Karlen et al. (1997) como a capacidade de um específico tipo de solo de performar, dentro dos limites de um ecossistema natural ou manejado, para sustentar a produção animal e vegetal, manter ou aumentar a qualidade da água e do ar, e sustentar a saúde e habitação humana. É um conceito complexo que estimulou o desenvolvimento e teste de vários métodos, entre eles, modelos e sistemas que pudessem criar índices compreensíveis sobre a saúde do solo (Rinot et al., 2019). Atualmente, um dos métodos que mais se destaca é o Soil Management Assessment Framework (SMAF), descrito inicialmente por Andrews et al. (2004). A ferramenta consiste em três etapas principais: seleção dos indicadores, interpretação dos indicadores e integração em um índice. O design e também a estrutura da ferramenta permitem que os pesquisadores façam todos os ajustes necessários para aplicarem o SMAF em diferentes tipos de solo, climas e manejos/usos da terra, imputando dentro da ferramenta diversos dados da área de estudo, como mineralogia do solo, textura, classificação, classe de intemperismo, clima, declive, métodos analíticos e culturas plantadas (Andrews et al., 2004).

O SMAF foi desenvolvido na América do Norte e começou a ser usado no Brasil a partir de um estudo que quantificou os impactos das mudanças no uso da terra (vegetação nativa - pastagem - cana-de-açúcar), na região do Cerrado, realizado por Cherubin et al. (2016). Posteriormente, outros estudos utilizando o método já foram realizados e validaram o SMAF no Brasil, como o de Cherubin et al. (2017), que concluiu que o SMAF pode ser uma ferramenta eficaz para analisar a saúde do solo nos solos brasileiros e auxiliar agricultores na tomada de decisões assertivas quanto as melhores práticas de uso e manejo de suas terras. Foram incentivados estudos futuros com objetivo de testar e melhorar os algoritmos de sensibilidade SMAF e também detectar mudanças na SS induzidas pelo manejo em diferentes solos, culturas e climas, visando ampliar seu potencial de uso no Brasil.

Logo, aplicar o método SMAF aos sistemas de manejo integrados irá expandir o entendimento sobre os impactos dos sistemas integrados na saúde do solo, especialmente na região do Cerrado brasileiro. Tal necessidade já foi apontada por Assis et al. (2015) ao sistema de integração lavoura-pecuária, afirmando que o impacto desse manejo na qualidade do solo deve ser melhor estudado, apontando o uso de indicadores adequados para determinar as mudanças na saúde do solo nos sistemas convencionais em comparação aos sistemas integrados. Um trabalho similar ao presente foi feito por Luz et al. (2019), onde os autores

obtiveram importantes soluções sobre as mudanças geradas na saúde do solo induzidas por diferentes sistemas de produção, em áreas de integração lavoura-pecuária no Norte do Paraná. Além disso, tendo em vista as metas globais de mitigação dos impactos de gases efeito estufa (GEE) na atmosfera, torna-se imperativo a busca por sistemas agrícolas capazes de estocar mais carbono no solo. Nesse sentido, a hipótese testada é que a adoção de sistemas integrados de produção afeta positivamente a saúde do solo, aumentando os estoques de carbono do solo ao longo do tempo. Para isso, este estudo objetivou avaliar e quantificar os impactos da introdução e condução de sistemas integrados com diferentes arranjos na saúde do solo e nos estoques de carbono das camadas 0-30 e 0-100 cm.

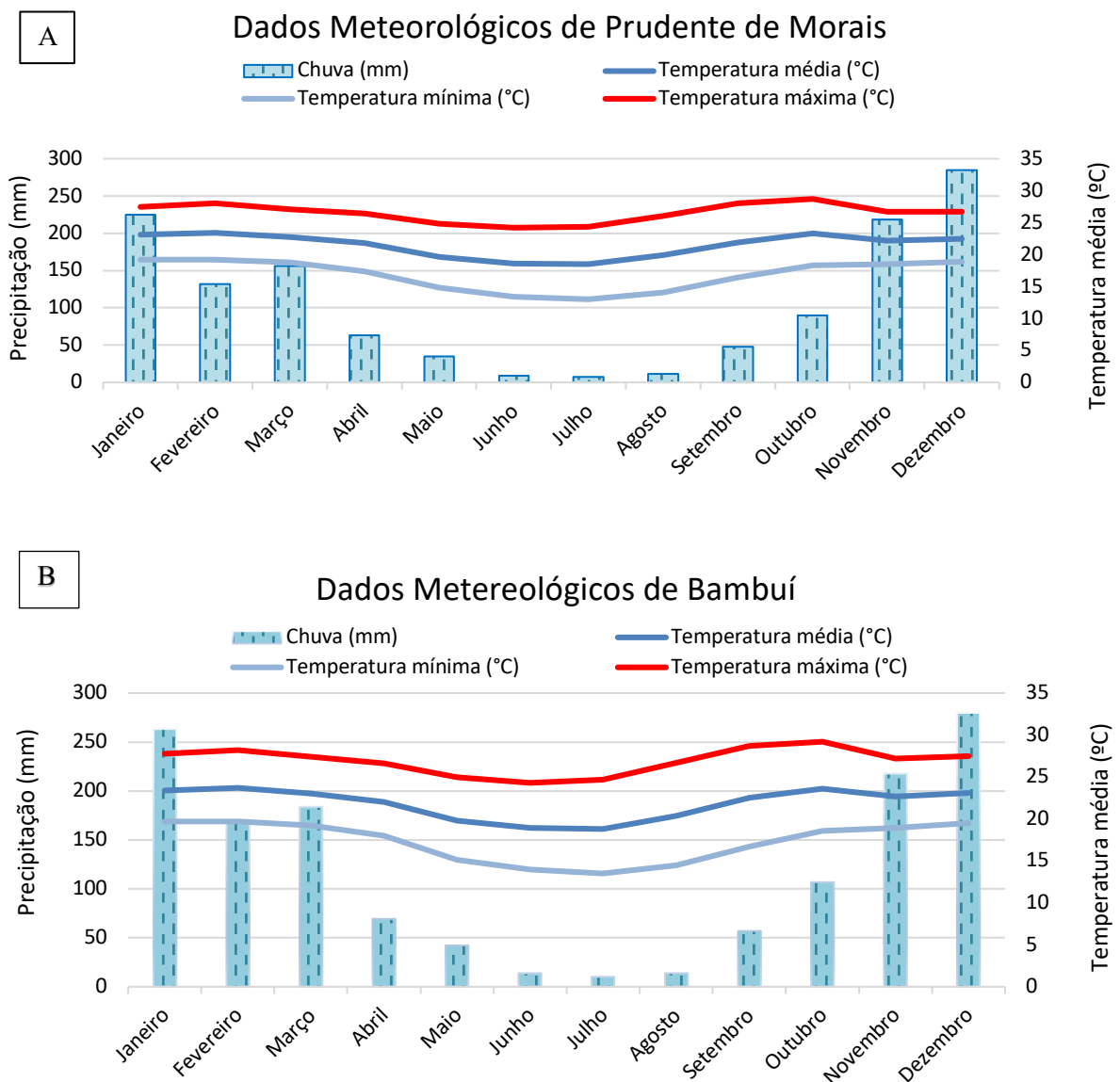




## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Áreas de estudo

Dois áreas experimentais foram selecionadas, contendo sistemas de ILPF, pastagens de alta e baixa produtividade e vegetação nativa. A primeira área coletada situa-se no município de Prudente de Morais, Estado de Minas Gerais, Brasil, ( $19^{\circ}27'15''$  S;  $44^{\circ}09'11''$  O) e altitude de 732m. A fazenda experimental Santa Rita pertence à Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (Epamig) e, de acordo com a classificação de Köppen, possui clima do tipo Aw, caracterizado por período chuvoso entre outubro e abril e seca de maio a setembro (Figura 1).



**Figura 1.** Média mensal de temperatura (máxima, média e mínima) (°C) e precipitação (mm) na região de Prudente de Morais (MG)(A) e Bambuí (MG)(B).

Fonte: Climate-date.org.

A segunda área selecionada encontra-se no Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG), unidade localizada na cidade de Bambuí, Estado de Minas Gerais, Brasil (20° 1' 17" S; 45° 57' 39" O). A altitude no ponto central é de 700m e o clima, segundo a classificação de Köppen também é do tipo Aw, com duas estações definidas, verão chuvoso e inverno seco (Figura 2).

O solo da área de Prudente de Moraes é classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, de textura argilosa (Embrapa, 2018). No início da implantação da área experimental, foram realizadas análises químicas, nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-30cm (Tabela 1).

**Tabela 1** - Características químicas e texturais do solo da área experimental de Prudente de Moraes nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-30cm.

Profundidade (m)	pH	P	K	Ca	Mg	H+Al	CTC	V	Argila	Silte	Areia
		(mg dm <sup>-3</sup> )			(mmolc dm <sup>-3</sup> )			(%)	(g kg <sup>-1</sup> )		
0.0-0.05	5,2	14,4	1,9	77,1	15,9	42	94,9	68,1	745	129	126
0.05-0.1	4,8	6,1	1,2	36,2	7,9	64,3	45,3	41,5	760	52	188
0.1-0.2	4,4	4,0	1,04	17,8	4,5	79,2	23,4	22,9	785	95	120
0.2-0.3	4,2	3,6	0,7	9,7	2,4	87,9	12,1	12,3	810	54	136

Na área de Bambuí, o solo é classificado como Latossolo Vermelho Distroférico, também de textura argilosa (Embrapa, 2018).

**Tabela 2** - Características químicas e texturais do solo da área experimental de Bambuí nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-30cm.

Profundidade (m)	pH	P	K	Ca	Mg	H+Al	CTC	V	Argila	Silte	Areia
		(mg dm <sup>-3</sup> )			(mmolc dm <sup>-3</sup> )			(%)	(g kg <sup>-1</sup> )		
0.0-0.05	4,9	23,4	3,8	66,6	24,5	44,2	139,2	67,1	663	309	28
0.05-0.1	4,8	17,6	3,1	54,4	20,7	45,1	123,8	62,3	689	285	26
0.1-0.2	4,7	14,7	2,5	48,1	17,7	44,4	112,3	58,5	692	282	26
0.2-0.3	4,5	7,6	2,1	35,6	14,1	41,1	93,1	54,6	697	272	31

## 2.2. Descrição e histórico dos experimentos

A primeira área de estudo, localizada em Prudente de Moraes (MG), foram coletados os seguintes usos: i) sistema silvipastoril (ILPF1) composto pelo eucalipto ordenado em arranjo de linha dupla de (3x2) + 20 m (434 árvores ha<sup>-1</sup>), ii) sistema silvipastoril (ILPF2) com espaçamento (2x2) + 9 m (909 árvores ha<sup>-1</sup>), iii) sistema silvipastoril (ILPF3) com arranjo em

linha simples de 9x2 m (556 árvores ha<sup>-1</sup>), iv) pastagem melhorada, v) pastagem nominal e vi) vegetação nativa.

Em área anexa aos sistemas silvipastoris, duas pastagens foram formadas, as duas com área de 1 ha. Uma delas foi manejada de modo similar ao realizado na forragem em sistema de integração. A segunda foi classificada como pastagem nominal e não foi submetida a nenhum tipo de manejo de adubação e de correção da acidez do solo. Uma faixa de vegetação nativa do tipo Cerrado foi coletada e utilizada como referência de ecossistema natural do local.

Os sistemas silvipastoris da área da Epamig foram implantados no ano de 2008, com objetivo de reformar a pastagem de *Urochloa decumbens* que havia sido formada há 15 anos. Antes da implantação do sistema, foi realizado o manejo de dessecação da pastagem, utilizando herbicida, e posteriormente a aplicação de duas toneladas por hectare de calcário dolomítico para correção da acidez do solo. No plantio, a sequência de operações foram: gradagem, seguida pela subsolagem das linhas de eucalipto e aplicação de 400 kg ha<sup>-1</sup> de fosfato natural reativo.

Durante os três primeiros anos agrícolas, 2009/2010; 2010/2011 e 2011/2012 foi plantado milho em consorcio com *Urochloa decumbens* cv. Basilisk (syn. *Brachiaria decumbens*) nas entrelinhas de *Eucalyptus spp.* Foi considerada uma distância mínima de 1,5m da linha de eucalipto para o plantio de forrageiras e eventual consorcio.

Em relação a adubação de manutenção das pastagens no sistema, em 2013/2014 foram aplicados 100 kg de N e 100 kg de K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> e 100 kg de N, 40 kg de K<sub>2</sub>O e 50 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> em 2015/2016. Todas essas aplicações foram realizadas no mês de dezembro. As doses de nitrogênio foram divididas em duas aplicações, sendo a segunda feita no mês de março do ano seguinte. As aplicações seguiram as recomendações descritas por Ribeiro et al., (1999). Os eucaliptos foram submetidos a desrama em setembro de 2009 e em março de 2010. Portanto, é necessário destacar que após a safra 2015/2016, os sistemas silvipastoris não foram submetidos a nenhum manejo de adubação e o não sofreram desbaste após março de 2010, fatores que indicam um manejo deficitário e que podem ter interferido nos resultados deste trabalho.



**Figura 2:** áreas experimentais com diferentes configurações de sistemas ILPF, na área experimental de Prudente de Morais-MG : a) área com linhas simples de eucalipto; b) área com linhas duplas de eucalipto.

Nas áreas do IFMG (campus Bambuí), segunda área de estudo deste trabalho, foram identificadas e coletadas amostras em cinco diferentes usos: i) silvipastoril (IPF) – área com cultivo de eucalipto em consórcio com forrageiras; ii) silviagrícola (ILP) – área com cultivo de eucalipto e leguminosa; iii) pastagem de alta produtividade (PM) – forrageira com manejo adequado; iv) pastagem degradada (PD) – forrageira não manejada; v) vegetação nativa (VN) – fragmento de cerrado.



Os sistemas silvipastoril (IPF) e silviagrícola (ILF) tiveram suas linhas de eucalipto estabelecidas em 2012, com clones I144. A pastagem de *Brachiaria brizantha* (Hochst. Ex A. Rich.) Stapf (Syn. *Urochloa brizantha* (Hochst. Ex A. Rich.) R. Webster) cv. *Marandu* (capim marandu) foi estabelecida um ano após o plantio do eucalipto, na área com sistema IPF. O sistema de manejo adotado para a pastagem explorou diferentes alturas de entrada dos animais, mantendo o resíduo do pasto com 20 cm. Adubação anual de 100 kg ha<sup>-1</sup> de nitrogênio (sulfato de amônio), que foi dividida em duas aplicações. No sistema ILF, a soja foi implantada por dois anos (2020/2021 e 2021/2022) consecutivos, com plantio convencional no primeiro ano, sendo feitos os manejos de aração e gradagem, e cultivo mínimo no segundo ano, seguindo o sistema de plantio direto.

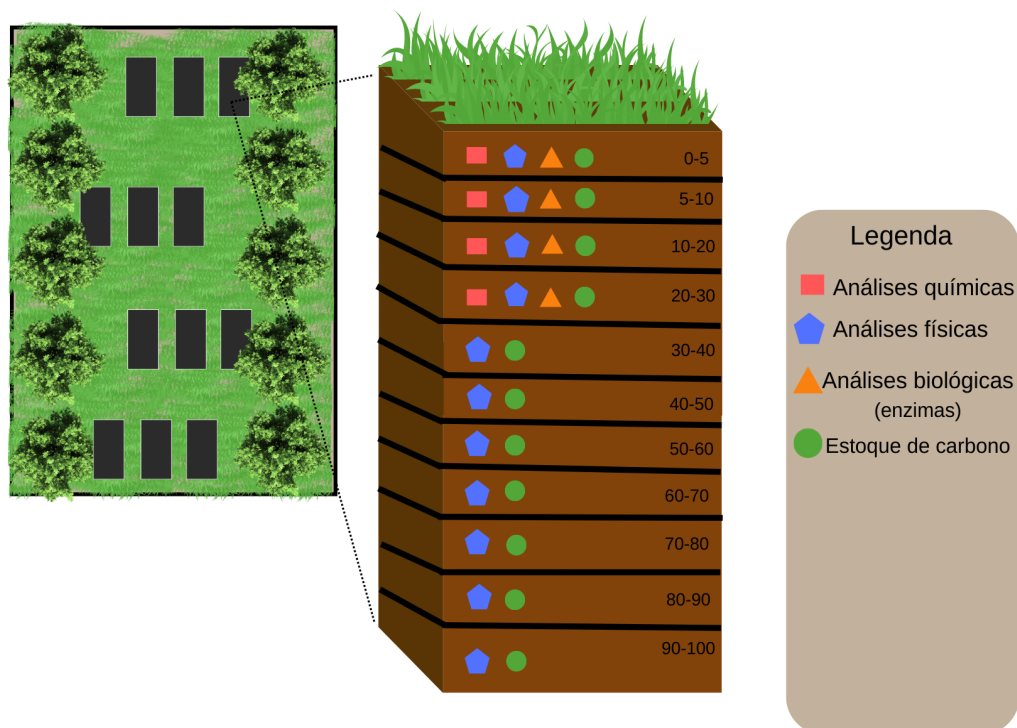


**Figura 3:** áreas experimentais com diferentes usos da terra para avaliação da qualidade do solo em Bambuí-MG: a) área com sistema silvipastoril; b) área com sistema silviagrícola; c) pastagem bem manejada; d) pastagem sem manejo; e) vegetação nativa.

### 2.3. Coletas de solo

A coleta de dados da primeira área, em Prudente de Morais, foi realizada durante a época chuvosa, no mês de fevereiro de 2022. Nas áreas localizadas em Bambuí, as coletas foram realizadas ao final da época chuvosa, no início do mês de maio. Nas áreas com sistemas integrados, a amostragem foi feita com três repetições por ponto de amostragem, sendo a primeira bem próxima da linha do eucalipto e/ou no meio do renque duplo, a segunda na projeção da copa das árvores e a terceira no meio da aleia, como demonstrado na imagem 1, abaixo. Para os outros usos, foram demarcados aleatoriamente quatro pontos de amostragem, espaçados cerca de 20 metros mutuamente.

As amostras foram coletadas nas camadas 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50, 50-60, 60-70, 70-80, 80-90 e 90-100 cm de profundidade.



**Figura 4:** esquema de amostragem nos sistemas integrados e distribuição de análises feitas por camadas de solo em todos os usos da terra.

## 2.4. Análises de solo

### 2.4.1. Estoque de carbono

A partir da determinação do carbono total, o estoque de carbono foi calculado pelo método da camada equivalente (Bayer et al., 2000), que considera a espessura de cada camada e a densidade do solo, fazendo a correção através da massa de solo equivalente em relação a área de referência, neste caso, a vegetação nativa. O cálculo é realizado através da equação a seguir:

$$EC = \frac{(Ds \times h \times COT)}{10}$$

Na qual:

EC – estoque de carbono, Mg ha<sup>-1</sup>

COT – teor de C orgânico total (%)

Ds – densidade do solo, kg dm<sup>-3</sup>

H – espessura da camada amostrada, cm

### 2.4.2. Indicadores químicos

Nas trincheiras abertas em cada ponto de amostragem, foram coletadas amostras deformadas, para realizar análises químicas e biológicas, e amostras indeformadas, para realização das análises sobre os atributos físicos do solo. Os parâmetros químicos foram calculados pelos métodos analíticos descritos em van Raij et al. (2001): acidez ativa (pH<sub>CaCl2</sub> 0,01 molL<sup>-1</sup>), acidez potencial (H+Al) por solução SMP, potássio (K) por resina de troca iônica / emissão atômica, fósforo (P) por resina de troca iônica / colorimetria, e enxofre (S-sulfato) por fosfato de cálcio / turbidimetria, saturação por bases (V%), cálcio disponível (Ca) e magnésio (Mg) por resina de troca iônica / absorção atômica, e potencial capacidade de troca catiônica (CTC<sub>pH7</sub>), e matéria orgânica (MO), determinada por colorimetria com ácido sulfúrico. Os teores de carbono (C) e nitrogênio (N) totais foram calculados pelo método de combustão a seco, usando um analisador elementar de C e N. Primeiro, as amostras de solo seco foram maceradas em almofariz de ágata e passadas por peneiras de 150 µm (100 mesh). Posteriormente, foram pesadas em balança analítica, utilizando 0,2 mg para a realização da análise.



### 2.4.3. Indicadores físicos

Com relação aos indicadores físicos, foram coletados anéis volumétricos de, aproximadamente, 90 cm<sup>3</sup>. Os anéis foram saturados em água destilada por capilaridade por um período de 48 horas e, posteriormente foram colocados em panelas de pressão sob uma tensão de água de 6 kpa.

Ao atingirem o equilíbrio matricial, as amostras foram pesadas, depois secas em estufa a 105 °C por 48 horas e novamente pesadas para definição da densidade do solo (DS) e a umidade gravimétrica. Para o cálculo da densidade utilizou-se a razão entre a massa do solo seco e o volume do anel. Com a relação entre a densidade e a umidade gravimétrica, calculou-se o conteúdo volumétrico de água ( $\theta$ ). A macro- (MaP), meso- (MeP) e microporosidade (MiP) foram mensuradas com base na distribuição de poros em função do raio de cada poro, sendo macroporos > 50  $\mu$ m, mesoporos entre 50-15  $\mu$ m e microporos < 15 $\mu$ m de acordo com (Cavalcanti et al., 2020).

### 2.4.4. Indicadores biológicos

Os teores de carbono (C) e nitrogênio (N) totais foram calculados pelo método de combustão a seco, usando um analisador elementar de C e N. Primeiro, as amostras de solo seco foram maceradas em almofariz de ágata e passadas por peneiras de 150  $\mu$ m (100 mesh). Posteriormente, foram pesadas em balança analítica, utilizando 0,2 mg para a realização da análise.

As enzimas  $\beta$ -glicosidase (ciclo do carbono) e arilsulfatase (ciclo do enxofre) foram realizadas de acordo com Tabatabai (1994), que consiste na extração e determinação colorimétrica do p-nitrofenil liberado quando a amostra de solo é incubada com solução tamponada contendo p-Nitrophenyl  $\beta$ -D-glucopyranoside sob a temperatura de 37°C por 1 hora.

## 2.5 Avaliação da saúde do solo

O Soil Management Assessment Framework (SMAF), concebido inicialmente por Andrews et al. (2004), foi o software utilizado para realizar a avaliação integrada dos índices de saúde do solo. A etapa (i), seguindo a recomendação original das três etapas principais da ferramenta SMAF, é a escolha dos indicadores químicos, físicos e biológicos que serão utilizados. Para esse trabalho, foram selecionados um conjunto de dados contendo sete

indicadores totais, sendo três químicos (pH, P e K), dois físicos (densidade do solo e porosidade) e dois biológicos (carbono total e  $\beta$ -glicosidase).

Na etapa (ii) os algoritmos do SMAF foram utilizados para transformar os valores individuais de cada indicador (que estavam originalmente em diferentes unidades) em pontuações sem unidade definida que vão de 0 a 1. Para isso, os algoritmos consideram a mineralogia do solo, textura, classificação, classe de intemperismo, clima, declive, métodos analíticos e culturas plantadas, que são imputados dentro da planilha pelo usuário. Os limites críticos de pH, fósforo e potássio foram interpretados conforme o Manual de Adubações do Cerrado, visto que ambas as áreas estão situadas nesse bioma.

A etapa (iii) consistiu na integração dos escores individuais de cada indicador em um índice de qualidade do solo (IQS), de acordo com a seguinte equação:

$$ISS = \sum_{i=1}^n S_i W_i$$

na qual  $S_i$  é o escore do indicador e  $W_i$  é o peso do indicador. A determinação do peso respeitou o indicado por Cherubin et al. (2016) onde os constituintes químicos, físicos e biológicos possuem peso equivalente no índice final. O ISS foi calculado separadamente para cada uma das camadas.

## 2.6 Análise de dados

Foi realizada análise de variância (ANOVA) para verificar o efeito dos diferentes sistemas de uso da terra nos indicadores químicos, físicos e biológicos do solo e no ISS. As análises foram feitas para cada camada, de forma separada (0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50, 50-60, 60-70, 70-80, 80-90 e 90-100) e para cada uso e área avaliada. Quando os resultados da ANOVA foram significativos ( $p < 0,05$ ), as médias individuais foram comparadas utilizando teste de Tukey ( $P \leq 0,05$ ).

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Indicadores da saúde química do solo

Na área de Prudente de Morais, as alterações foram mais observadas nas profundidades abaixo de 5 cm (tabela 3). O pH não variou na primeira camada (0-5 cm), mas variou nas camadas subsequentes (5-10, 10-20 e 20-30 cm). Em todas as camadas onde houve variação significativa, o menor valor de pH medido foi o da vegetação nativa (VN). Na camada de 5-10 cm, o valor mais alto de pH observado foi na PM, seguido pelo ILPF 2, ILPF 1, PN e ILPF 3. Na camada de 10-20cm, o maior valor de pH medido foi na PN, seguido pelo ILPF 2, PM, ILPF 1 e ILPF 3. Para a camada de 20-30cm, o maior valor observado (4,59) foi também na PN, seguido pelo ILPF 2 (4,36), PM (4,27), ILPF 1 (4,36) e ILPF 3 (4,09). O segundo indicador de acidez do solo utilizado (H+Al), apresentou diferença significativa em todas as camadas. Na primeira (0-5 cm), os valores observados variaram de 68,17  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$  (PM) a 52,25  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$  (VN). Na camada de 5-10cm, o valor mais alto medido foi o da PN (89,02  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ ) e o valor mais baixo foi medido na PM (47,82  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ ). Para a camada de 10-20 cm, o maior valor encontrado pela soma H+Al foi na PM (105,82  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ ) e o valor mais baixo foi medido na PN (54,30  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ ). Na última camada avaliada (20-30 cm), PM e PN apresentaram novamente o maior e menor valor da soma H+Al, 114,37  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$  e 75,52  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ , respectivamente. A percentagem de saturação por bases (V%), apresentou diferenças não significativas na primeira camada (0-5 cm), que apresentava entre todas os maiores valores de V%, em média 65%. A partir da segunda camada (5-10 cm), os valores de V% começam a diminuir bastante, sendo o menor valor encontrado na VN (18,75), e o maior valor foi medido no ILPF 2 (52,00). Na camada de 10-20 cm, o menor valor medido foi na VN (10,00), e o maior, desta vez, foi o da PN (51,00). Na última camada (20-30 cm), VN e PN novamente apresentaram o menor e o maior valor, respectivamente, 5,25 e 25,00.

Com relação as análises de nutrientes, o fósforo (P) demonstrou diferenças significativas, porém sutis, para a área de Prudente de Morais somente nas duas últimas camadas avaliadas. A VN apresentou o maior valor de fósforo em ambas (10-20 e 20-30 cm), com valores de 6,10 e 4,60  $\text{mg dm}^{-3}$ . Em seguida, os tratamentos ILPF 1 e ILPF 2 apresentaram os melhores valores de P, sendo 5,73 e 4,0 e 4,41 e 3,00  $\text{mg dm}^{-3}$  respectivamente para as duas camadas citadas anteriormente. Ambas as pastagens avaliadas (PN e PM) e o ILPF 3 apresentaram valores mais baixos de P, de 2,68, 2,55, 1,93 e 1,70, 0,70 e 1,00  $\text{mg dm}^{-3}$ , respectivamente nas duas camadas. O potássio (K) não apresentou diferenças significativas em seus resultados em nenhuma das camadas avaliadas. O cálcio, apresentou resultados

significativos a partir da segunda camada (5-10cm), onde a PM apresentou o maior valor desse nutriente ( $68,75 \text{ mg dm}^{-3}$ ), VN o menor valor ( $16,15 \text{ mg dm}^{-3}$ ). Nas duas camadas subsequentes, a PN apresentou os maiores valores de Ca,  $47,25$  e  $20,02 \text{ mg dm}^{-3}$ , respectivamente, seguidos pelos valores do ILPF 2,  $25,05$  e  $15,25 \text{ mg dm}^{-3}$ . A VN apresentou os menores valores de cálcio nas duas últimas camadas,  $7,80$  e  $4,02 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ . Em relação ao magnésio (Mg), houve diferença significativa em todas as camadas, sendo que a PN apresentou os maiores valores em três das quatro profundidades avaliadas, com valores de  $23,30$ ,  $9,53$  e  $5,25 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , nas profundidades de 0-5, 10-20 e 20-30 cm. A PM apresentou o melhor valor de Mg na segunda camada avaliada (5-10 cm),  $14,72 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ . Os três arranjos de ILPF analisados mostraram valores bastante similares de Mg nas duas primeiras camadas (0-5 e 5-10 cm), em média  $15,83 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  e  $7,81 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , respectivamente. E os menores valores de Mg foram medidos na VN, em todas as quatro camadas avaliadas. Por último, a capacidade de troca de cátions (CTC) não apresentou diferenças significativas para a primeira camada (0-5 cm), e da segunda camada em diante (5-10, 10-20 e 20-30 cm) apresentou diferenças sutis de valores entre os tratamentos. A PM representou os melhores valores de CTC em todas as profundidades. Em seguida, a PN apresentou o segundo maior valor nas profundidades de 5-10 cm ( $12,62 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) e 10-20 cm ( $11,14 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ). Os arranjos de ILPF e a VN ficaram com os valores mais baixos de CTC.

Na área de Bambuí, os indicadores de acidez (pH e H+Al) apresentaram diferenças sutis em todas as profundidades, com exceção do pH de 0-5 cm que trouxe resultados não significativos. De 5-10 até 20-30 cm, o tratamento com maior valor de pH foi a PM e os valores de pH mais baixos foram medidos na VN. Para o H+Al, a VN apresentou os maiores valores em todas as profundidades medidas,  $64,57$ ,  $75,32$ ,  $80,60$  e  $77,47 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ . Todos os outros quatro tratamentos, apresentaram valores de H+Al que não diferiram muito entre si, na maioria seguidos pela mesma letra. O V% medido na área de Bambuí, variou entre os tratamentos de forma significativa ( $p>0,05$ ) apenas nas duas últimas profundidades avaliadas (10-20 e 20-30 cm). Em ambas, os maiores valores foram medidos na PM ( $77,75$  e  $72,25\%$ ), e os menores na VN ( $36,75$  e  $34,50\%$ ). O fósforo (P) diferiu de forma significativa ( $p>0,05$ ) em duas das quatro profundidades avaliadas. De 0-5cm e 10-20 cm, os maiores valores de P foram encontrados na PM ( $44,35$  e  $29,27 \text{ mg dm}^{-3}$ ) e os menores valores foram os da PD  $13,53$  e  $4,77 \text{ mg dm}^{-3}$ ). Em relação ao potássio (K), os valores medidos diferiram de forma significativa ( $p>0,05$ ) em apenas uma profundidade, 10-20cm, porém de forma muito sutil, onde todas as médias foram classificadas com a mesma letra. O cálcio (Ca) também apresentou diferenças significativas ( $p>0,05$ ) apenas na profundidade de 10-20 cm, onde a PM exibiu o maior valor ( $77,75 \text{ cmol}_c$

$\text{dm}^{-3}$ ) e a PD o menor valor ( $24,75 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ). Para o magnésio (Mg), as médias diferiram de forma significativa em duas profundidades, 5-10 e 10-20 cm. Em ambas, os três tratamentos com os maiores valores de Mg seguiram a mesma ordem, do maior valor para o menor, que foi: ILF ( $23,84$  e  $20,90 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ), PM ( $22,17$  e  $19,22 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ), IPF ( $20,83$  e  $18,86 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ). De 0-5 cm, os dois valores mais baixos de Mg seguiram a seguinte ordem: PD, com  $16,07 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  e VN com  $14,42 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ . De 10-20 cm essa ordem foi invertida, com valores de Mg de  $11,65 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  para a VN e  $9,47 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  para a PD. Por fim, os valores de CTC medidos na área de Bambuí diferiram de forma significativa ( $p > 0,05$ ) em todas as profundidades. A VN e o ILF apresentaram os maiores valores em todas as profundidades e os outros tratamentos variaram de forma sutil entre si.

**Tabela 3.** Atributos de acidez, e nutrientes do solo para as camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-30 cm nas duas áreas do Cerrado brasileiro.

Solo*	Prudente de Morais						Bambuú				
	VN	PN	PM	ILPF1	ILPF2	ILPF3	VN	PD	PM	ILF	IPF
<b>0-5cm</b>											
pH	4,90 <sup>ns</sup>	5,25	4,96	5,26	5,34	5,09	4,75 <sup>ns</sup>	5,26	5,3	4,98	4,88
H+Al	52,25 <sup>ab</sup>	45,65 <sup>b</sup>	68,17 <sup>a</sup>	43,81 <sup>b</sup>	37,28 <sup>b</sup>	45,02 <sup>b</sup>	64,57 <sup>a</sup>	43,81 <sup>b</sup>	30,65 <sup>b</sup>	38,47 <sup>ab</sup>	50,90 <sup>ab</sup>
V%	62,75 <sup>ns</sup>	68,00	53,25	67,12	71,37	65,87	63,50 <sup>ns</sup>	67,12	76,75	71,83	60,75
P	16,45 <sup>ns</sup>	18,65	15,4	13,53	15,81	14,07	23,97 <sup>ab</sup>	13,53 <sup>ab</sup>	44,35 <sup>a</sup>	22,78 <sup>ab</sup>	17,47 <sup>b</sup>
K	2,39 <sup>ns</sup>	1,27	3,46	2,30	1,51	1,92	3,93 <sup>ns</sup>	2,30	3,54	3,85	3,71
Ca	78,20 <sup>ns</sup>	73,32	58	76,21	78,52	76,61	96,20 <sup>ns</sup>	76,21	73,00	71,53	55,82
Mg	9,12 <sup>b</sup>	23,20 <sup>a</sup>	16,2 <sup>ab</sup>	16,80 <sup>ab</sup>	16,00 <sup>ab</sup>	14,70 <sup>ab</sup>	23,72 <sup>ns</sup>	16,80	25,82	25,85	24,23
CTC	14,19 <sup>ns</sup>	14,34	14,58	13,93	13,35	13,82	18,84 <sup>a</sup>	13,93 <sup>b</sup>	13,30 <sup>b</sup>	13,97 <sup>b</sup>	13,46 <sup>b</sup>
<b>5-10cm</b>											
pH	4,15 <sup>d</sup>	4,61 <sup>bc</sup>	5,19 <sup>a</sup>	4,65 <sup>bc</sup>	4,96 <sup>ab</sup>	4,48 <sup>cd</sup>	4,39 <sup>b</sup>	5,07 <sup>a</sup>	5,33 <sup>a</sup>	4,87 <sup>ab</sup>	4,68 <sup>ab</sup>
H+Al	81,25 <sup>a</sup>	89,02 <sup>a</sup>	47,82 <sup>b</sup>	70,67 <sup>ab</sup>	52,25 <sup>b</sup>	71,35 <sup>ab</sup>	75,32 <sup>a</sup>	31,92 <sup>b</sup>	28,75 <sup>b</sup>	41,97 <sup>b</sup>	47,90 <sup>ab</sup>
V%	18,75 <sup>c</sup>	29,5 <sup>c</sup>	64,00 <sup>a</sup>	37,00 <sup>bc</sup>	52,00 <sup>ab</sup>	35,00 <sup>bc</sup>	46,50 <sup>ns</sup>	63,50	77,00	67,25	57,41
P	7,75 <sup>ns</sup>	5,1	5,85	7,10	6,90	4,30	26,12 <sup>ns</sup>	11,97	29,02	20,17	10,32
K	0,96 <sup>ns</sup>	2,42	0,86	1,05	1,06	1,56	3,081 <sup>ns</sup>	3,67	2,73	3,34	2,67
Ca	16,15 <sup>c</sup>	26,85 <sup>bc</sup>	68,75 <sup>a</sup>	33,50 <sup>bc</sup>	45,22 <sup>b</sup>	28,85 <sup>bc</sup>	51,02 <sup>ns</sup>	43,47	73,6	64,41	44,31
Mg	1,88 <sup>c</sup>	7,98 <sup>b</sup>	14,72 <sup>a</sup>	7,41 <sup>b</sup>	9,74 <sup>b</sup>	6,28 <sup>bc</sup>	14,42 <sup>b</sup>	16,07 <sup>ab</sup>	22,17 <sup>ab</sup>	23,84 <sup>a</sup>	20,83 <sup>ab</sup>
CTC	10,02 <sup>b</sup>	12,62 <sup>a</sup>	13,21 <sup>a</sup>	11,26 <sup>ab</sup>	10,82 <sup>ab</sup>	10,80 <sup>ab</sup>	14,46 <sup>a</sup>	9,51 <sup>b</sup>	12,72 <sup>ab</sup>	13,35 <sup>a</sup>	11,57 <sup>ab</sup>
<b>10-20cm</b>											
pH	4,06 <sup>c</sup>	5,04 <sup>a</sup>	4,40 <sup>bc</sup>	4,40 <sup>bc</sup>	4,59 <sup>b</sup>	4,19 <sup>c</sup>	4,30 <sup>b</sup>	4,75 <sup>b</sup>	5,43 <sup>a</sup>	4,79 <sup>b</sup>	4,72 <sup>b</sup>
H+Al	84,60 <sup>ab</sup>	54,30 <sup>c</sup>	105,82 <sup>a</sup>	83,01 <sup>ab</sup>	67,56 <sup>bc</sup>	86,26 <sup>ab</sup>	80,60 <sup>a</sup>	38,27 <sup>b</sup>	27,02 <sup>b</sup>	41,86 <sup>b</sup>	42,77 <sup>b</sup>
V%	10,00 <sup>c</sup>	51,00 <sup>a</sup>	18,25 <sup>bc</sup>	20,88 <sup>bc</sup>	32,63 <sup>b</sup>	16,00 <sup>bc</sup>	36,75 <sup>b</sup>	49,50 <sup>ab</sup>	77,75 <sup>a</sup>	63,16 <sup>ab</sup>	57,91 <sup>ab</sup>
P	6,10 <sup>a</sup>	2,68 <sup>a</sup>	2,55 <sup>a</sup>	5,73 <sup>a</sup>	4,41 <sup>a</sup>	1,93 <sup>a</sup>	10,35 <sup>b</sup>	4,77 <sup>b</sup>	29,27 <sup>a</sup>	20,50 <sup>ab</sup>	8,98 <sup>b</sup>
K	0,84 <sup>ns</sup>	0,31	1,88	0,64	1,22	1,24	3,28 <sup>a</sup>	3,58 <sup>a</sup>	2,23 <sup>a</sup>	2,54 <sup>a</sup>	1,98 <sup>a</sup>
Ca	7,80 <sup>c</sup>	47,25 <sup>a</sup>	17,75 <sup>bc</sup>	17,43 <sup>bc</sup>	25,05 <sup>b</sup>	11,80 <sup>bc</sup>	33,62 <sup>ab</sup>	24,75 <sup>b</sup>	77,75 <sup>a</sup>	55,38 <sup>ab</sup>	42,28 <sup>ab</sup>
Mg	0,82 <sup>c</sup>	9,53 <sup>a</sup>	3,78 <sup>bc</sup>	4,15 <sup>bc</sup>	6,39 <sup>ab</sup>	3,12 <sup>bc</sup>	11,65 <sup>ab</sup>	9,47 <sup>b</sup>	19,22 <sup>a</sup>	20,90 <sup>a</sup>	18,86 <sup>ab</sup>
CTC	9,41 <sup>b</sup>	11,14 <sup>ab</sup>	12,92 <sup>a</sup>	10,52 <sup>b</sup>	10,02 <sup>b</sup>	10,24 <sup>b</sup>	12,91 <sup>a</sup>	7,61 <sup>b</sup>	12,62 <sup>a</sup>	12,07 <sup>a</sup>	10,59 <sup>ab</sup>
<b>20-30cm</b>											
pH	4,00 <sup>c</sup>	4,59 <sup>a</sup>	4,27 <sup>bc</sup>	4,20 <sup>bc</sup>	4,36 <sup>ab</sup>	4,09 <sup>bc</sup>	4,31 <sup>b</sup>	4,60 <sup>b</sup>	5,51 <sup>a</sup>	4,82 <sup>b</sup>	4,78 <sup>b</sup>
H+Al	85,60 <sup>b</sup>	75,52 <sup>b</sup>	114,37 <sup>a</sup>	94,23 <sup>ab</sup>	78,41 <sup>b</sup>	91,12 <sup>ab</sup>	77,47 <sup>a</sup>	39,72 <sup>b</sup>	22,87 <sup>b</sup>	39,07 <sup>b</sup>	37,55 <sup>b</sup>
V%	5,25 <sup>b</sup>	25,00 <sup>a</sup>	10,00 <sup>ab</sup>	7,50 <sup>b</sup>	20,00 <sup>ab</sup>	9,25 <sup>ab</sup>	34,50 <sup>b</sup>	41,00 <sup>b</sup>	72,25 <sup>a</sup>	59,66 <sup>ab</sup>	55,00 <sup>ab</sup>

P	4,60 <sup>a</sup>	1,70 <sup>ab</sup>	0,70 <sup>b</sup>	4,00 <sup>ab</sup>	3,00 <sup>ab</sup>	1,00 <sup>ab</sup>	7,42 <sup>ns</sup>	2,65	9,30	10,00	6,60
K	0,53 <sup>ns</sup>	0,23 <sup>ns</sup>	1,27 <sup>ns</sup>	0,45 <sup>ns</sup>	0,79 <sup>ns</sup>	0,78 <sup>ns</sup>	2,76 <sup>ns</sup>	3,19	1,97	1,87	1,67
Ca	4,02 <sup>b</sup>	20,02 <sup>a</sup>	9,32 <sup>ab</sup>	5,73 <sup>b</sup>	15,25 <sup>ab</sup>	6,22 <sup>b</sup>	26,87 <sup>ns</sup>	16,47	49,12	42,90	33,32
Mg	0,35 <sup>c</sup>	5,25 <sup>a</sup>	1,90 <sup>bc</sup>	1,66 <sup>bc</sup>	3,66 <sup>ab</sup>	1,76 <sup>bc</sup>	9,55 <sup>ns</sup>	7,30	13,95	16,26	15,95
CTC	9,05 <sup>b</sup>	10,10 <sup>b</sup>	12,69 <sup>a</sup>	10,20 <sup>b</sup>	9,81 <sup>b</sup>	9,99 <sup>b</sup>	11,66 <sup>a</sup>	6,67 <sup>b</sup>	8,79 <sup>ab</sup>	10,01 <sup>a</sup>	8,85 <sup>ab</sup>

\*Unidades: pH<sub>CaCl<sub>2</sub></sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup> (pH); acidez potencial (H+Al) (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>); Al<sup>3+</sup> (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>); CTC (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>): capacidade de troca de cátions; V (%): saturação da CTC por bases; m (%): saturação do Al<sup>3+</sup>; MOS (%) matéria orgânica do solo; P e K (mg dm<sup>-3</sup>): de fósforo ou potássio no solo; Ca e Mg (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>): de cálcio ou magnésio e SB (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>). Em áreas de vegetação nativa (VN), pastagem nominal (PN), pastagem melhorada (PM), integração lavoura-pecuária-floresta em três arranjos (ILPF 1, ILPF 2 e ILPF 3), pastagem degradada (PD), integração lavoura-floresta (ILF) e integração pecuária-floresta (IPF). Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si dentro de cada área para cada profundidade e entre os tratamentos, pelo teste de T ( $p > 0,05$ ), ns não significativo.

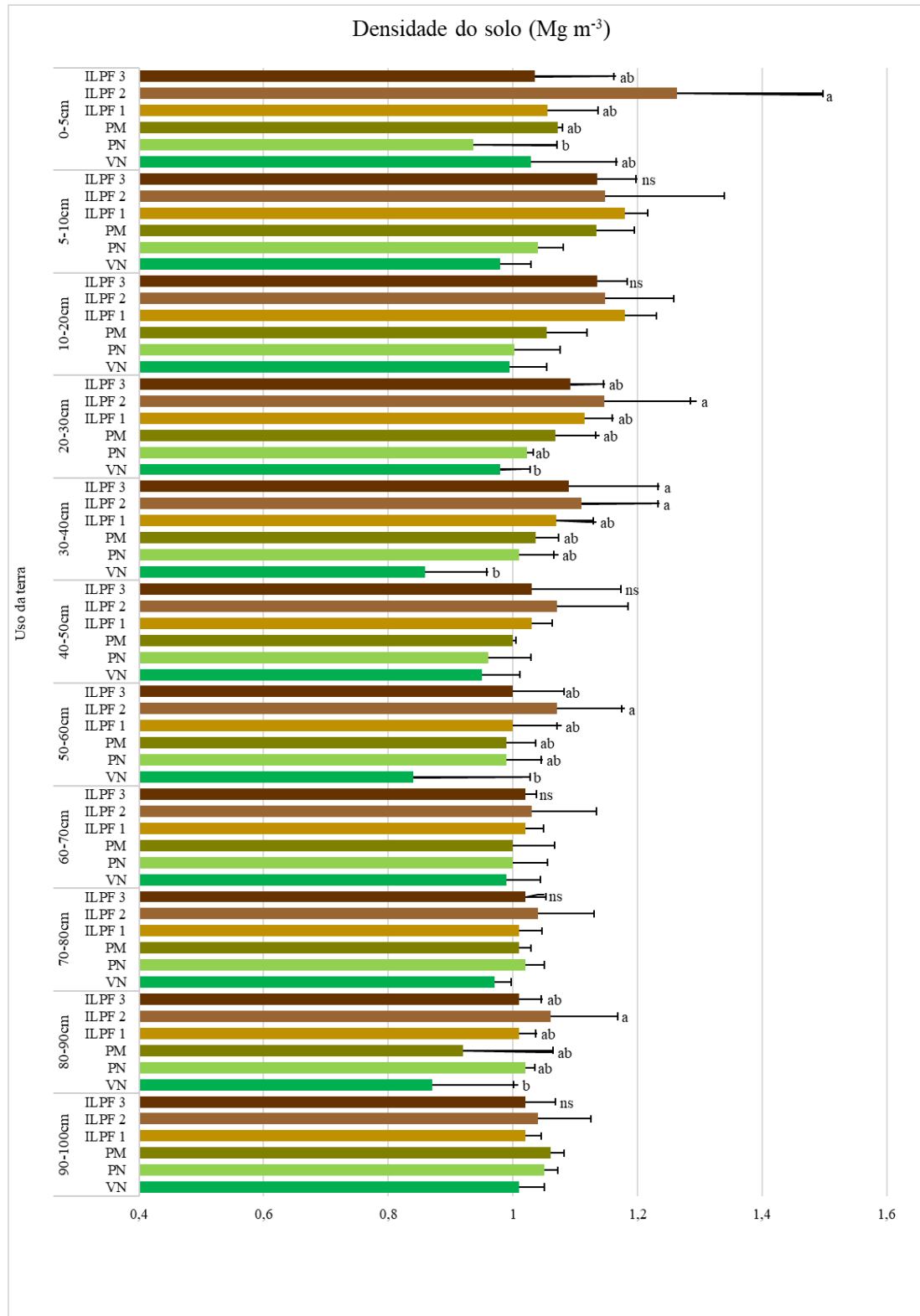




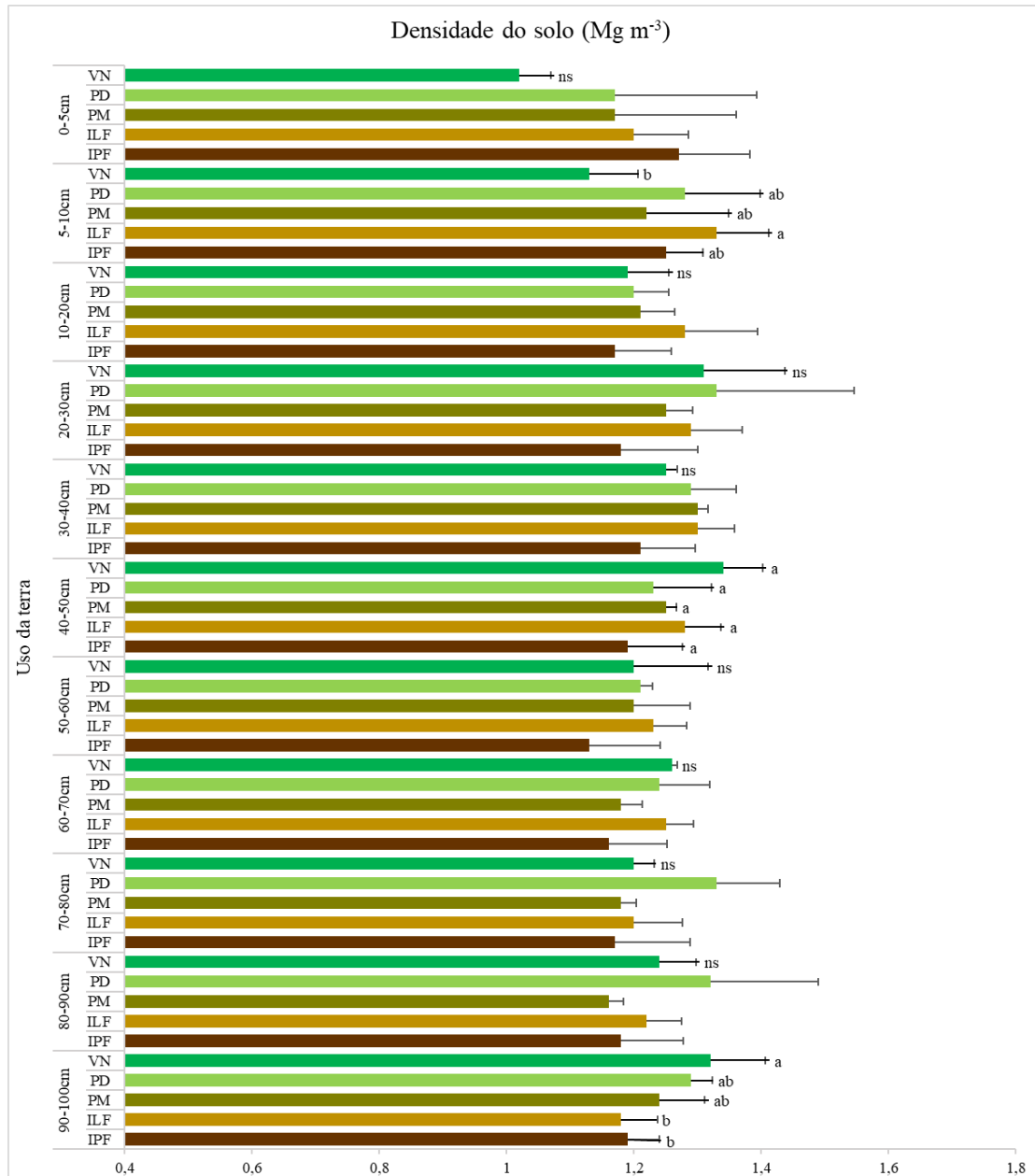
### 3.2 Indicadores da saúde física do solo

Os indicadores de saúde física do solo utilizados para avaliar as diferenças entre cada uso da terra foram a densidade do solo, para ambas as áreas, e para a área de Bambuí também foi medida a porosidade total do solo. Na área de Prudente de Moraes, as densidades do solo diferiram sutilmente na primeira profundidade avaliada (0-5 cm), sendo que a maior densidade foi encontrada no ILPF 2 ( $1,26 \text{ Mg m}^{-3}$ ) e a menor na PN ( $0,94 \text{ Mg m}^{-3}$ ) (figura 5). Nas profundidades de 5-10 e 10-20 cm os valores medidos não diferiram entre si ( $p < 0,05$ ). Para a profundidade de 20-30 cm, ILPF 2 seguiu sendo a área com maior valor de densidade ( $1,15 \text{ Mg m}^{-3}$ ) e VN com menor valor ( $0,98 \text{ Mg m}^{-3}$ ). Para a profundidade de 30-40 cm, a maior e menor densidade novamente foram medidas no ILPF 2 ( $1,11 \text{ Mg m}^{-3}$ ) e na VN ( $0,86 \text{ Mg m}^{-3}$ ). Outras duas profundidades (50-60 e 80-90 cm) apresentaram diferenças sutilmente significativas para esse indicador físico ( $p > 0,05$ ). Em ambas, os maiores valores medidos seguiram no ILPF 2 ( $1,07$  e  $1,06 \text{ Mg m}^{-3}$ ).

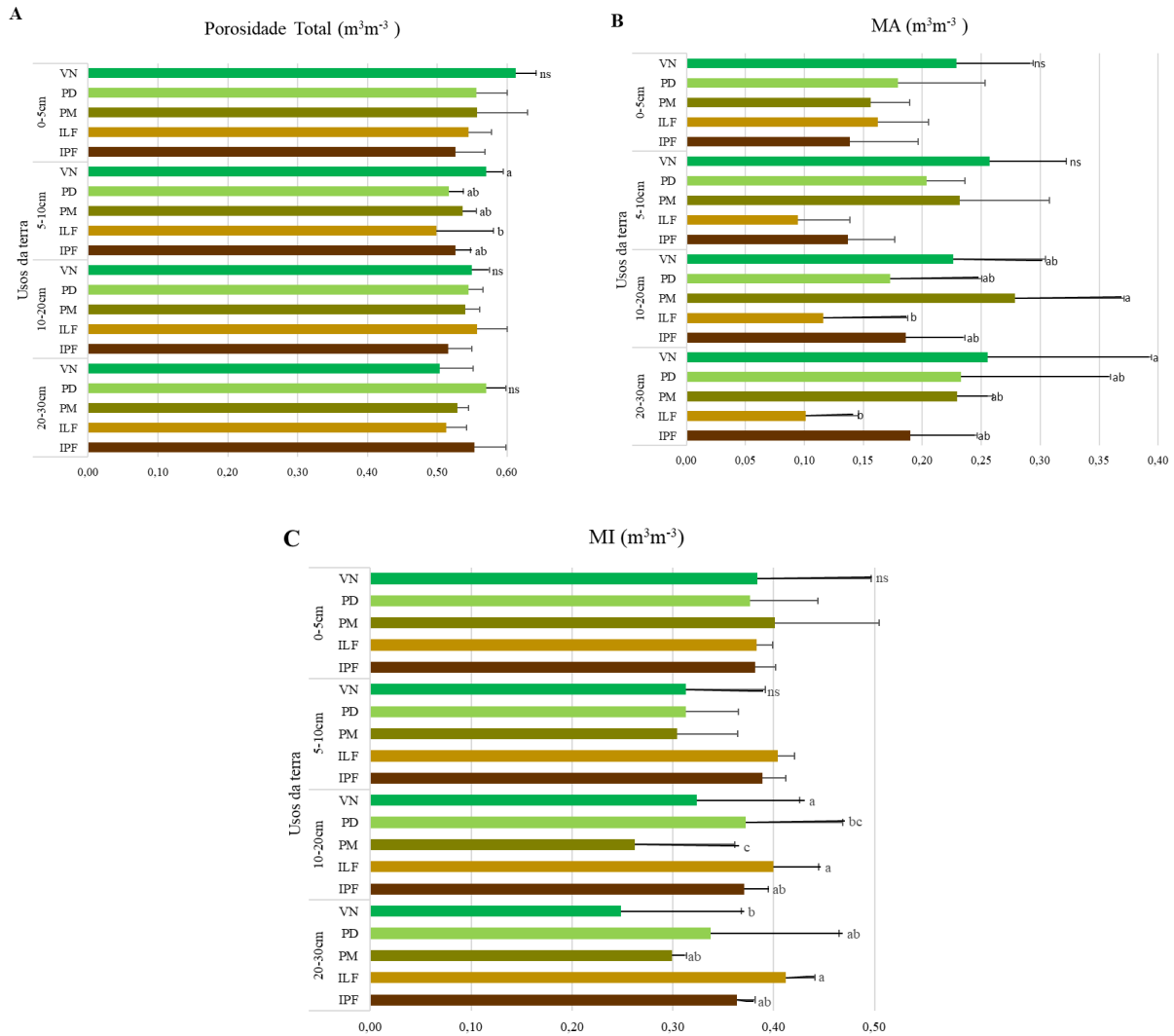
A densidade do solo na área de Bambuí variou de forma sutil nas seguintes profundidades: 5-10, 40-50 e 90-100 cm (figura 6). Na primeira, os valores de densidade variaram de  $1,33 \text{ Mg m}^{-3}$  (ILF) a  $1,13 \text{ Mg m}^{-3}$  (VN). Na profundidade de 40-50 cm, a maior densidade foi medida na VN ( $1,34 \text{ Mg m}^{-3}$ ) e a menor no IPF ( $1,19 \text{ Mg m}^{-3}$ ). Na última profundidade citada, o maior valor de densidade encontrado foi novamente na VN ( $1,32 \text{ Mg m}^{-3}$ ), e o menor no ILF ( $1,18 \text{ Mg m}^{-3}$ ). Em relação a porosidade total (figura 7), os valores também diferiram de forma sutil em apenas uma das quatro profundidades avaliadas. De 5-10 cm, o tratamento que apresentou o maior valor de porosidade total foi a VN ( $0,57 \text{ m}^{-3}\text{m}^{-3}$ ), seguido por PM ( $0,54 \text{ m}^{-3}\text{m}^{-3}$ ), IPF ( $0,53 \text{ m}^{-3}\text{m}^{-3}$ ), PD ( $0,52 \text{ m}^{-3}\text{m}^{-3}$ ) e, por fim, ILF ( $0,50 \text{ m}^{-3}\text{m}^{-3}$ ). Tanto a microporosidade (MI) quanto a macroporosidade (MA), apresentaram diferenças estatísticas ( $p > 0,05$ ) entre os tratamentos apenas nas duas últimas profundidades (10-20 e 20-30cm).



**Figura 5.** Valores médios de densidade do solo para os cinco tratamentos da área de Prudente de Morais (MG). Em áreas de vegetação nativa (VN), pastagem nominal (PN), pastagem melhorada (PM) e integração lavoura-pecuária-floresta em três arranjos (ILPF 1, ILPF 2 e ILPF 3). Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, dentro de cada tratamento e para cada profundidade pelo teste de T ( $p>0,05$ ), <sup>ns</sup> não significativo.



**Figura 6.** Valores médios de densidade do solo para os cinco tratamentos da área de Bambuí (MG). Em áreas de vegetação nativa (VN), pastagem degradada (PD), pastagem melhorada (PM), integração lavoura-floresta (ILF) e integração pecuária-floresta (IPF). Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, dentro de cada tratamento e para cada profundidade pelo teste de T ( $p>0,05$ ), <sup>ns</sup> não significativo.



**Figura 7.** Valores médios de porosidade total (A), MA (macroporosidade) (B) e MI (microporosidade) (C), na área de Bambuí (MG). Em áreas de vegetação nativa (VN), pastagem degradada (PD), pastagem melhorada (PM), integração lavoura-floresta (ILF) e integração pecuária-floresta (IPF). Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, dentro de cada tratamento e para cada profundidade pelo teste de T ( $p>0,05$ ), <sup>ns</sup> não significativo.

### 3.3 Indicadores da saúde biológica do solo

Os resultados de carbono total (C total), foram significativos ( $p>0,05$ ) em todas as profundidades avaliadas, menos uma, tanto na área de Prudente de Moraes quanto na área de Bambuí. Em relação ao estoque de carbono (EC), os valores não foram significativos ( $p<0,05$ ) em três das onze camadas avaliadas (5-10, 50-60 e 60-70 cm). Já na área de Bambuí, o EC apresentou valores não significativos ( $p<0,05$ ) em apenas uma camada (70-80 cm).

Na primeira área avaliada, Prudente de Moraes, de 0-5 cm, a VN e a PN apresentaram o mesmo e maior valor de C total (4,72%), seguidas pela pastagem melhorada (3,88%) e, por último, os três arranjos de ILPF, com valores de 3,63% (ILPF 3), 3,04% (ILPF 2) e 2,21%

(ILPF 1). Para o COS, de 0-5 cm, os valores seguiram a mesma sequência do C total, medindo de 24,30 Mg C ha<sup>-1</sup> na VN, a 11,24 Mg C ha<sup>-1</sup> no ILPF 1. A segunda profundidade avaliada (5-10 cm) não diferiu de maneira significativa na área de Prudente de Moraes ( $p < 0,05$ ). A partir da terceira profundidade avaliada (10-20 cm), a PM apresentou os maiores valores de C total e de EC até a última camada (90-100 cm) na área de Prudente de Moraes. A partir dessa profundidade também pode-se observar que tantos os teores de C total quanto os valores de EC vão se igualando, com diferenças muito sutis entre os tratamentos de VN, PN, ILPF 1, ILPF 2 e ILPF 3. Portanto, infere-se que VN e PN, mesmo apresentando valores maiores de C total e EC nas camadas mais superficiais, ao longo do perfil do solo essas diferenças já não são tão aparentes em relação aos sistemas integrados.

Na área de Bambuí, tanto no C total quanto no EC, ambas as pastagens (PD e PM) apresentaram valores mais baixos que a VN e os dois sistemas integrados avaliados (ILP e IPF) em quase todo o perfil do solo, havendo uma sutil mudança nas duas últimas profundidades avaliadas (80-90 e 90-100 cm), onde a PM apresentou os maiores valores de C total e EC.

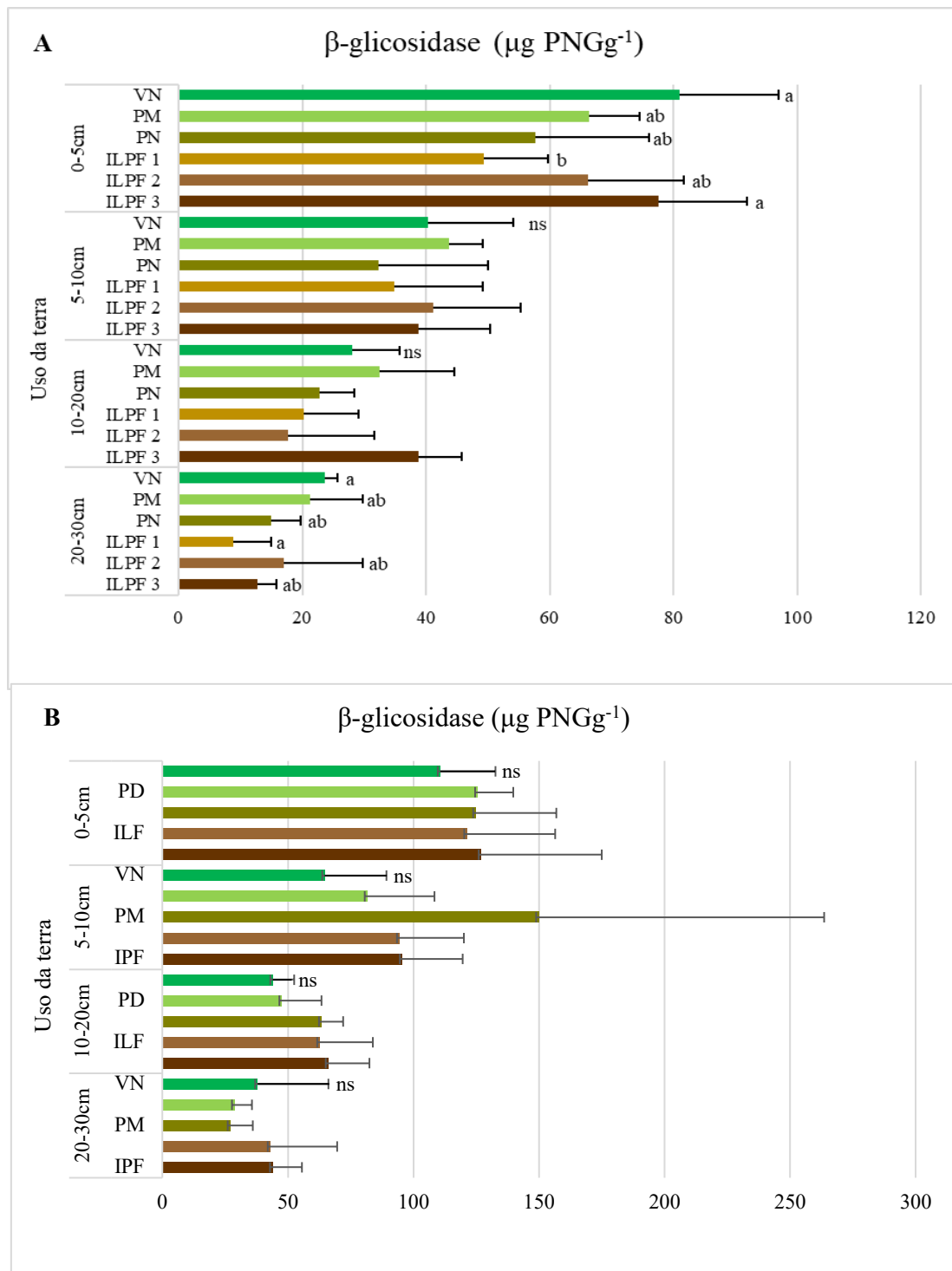
**Tabela 3.** Valores médios de carbono (C total) e de estoque de carbono (COS) para as camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50, 50-60, 60-70, 70-80, 80-90 e 90-100 cm nas duas áreas do Cerrado brasileiro). Em áreas de vegetação nativa (VN), pastagem nominal (PN), pastagem melhorada (PM), integração lavoura-pecuária-floresta em três arranjos (ILPF 1, ILPF 2 e ILPF 3), pastagem degradada (PD), integração lavoura-floresta (ILF) e integração pecuária-floresta (IPF). Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, dentro de cada tratamento e para cada profundidade pelo teste de T ( $p>0,05$ ), <sup>ns</sup> não significativo.

Solo*	Prof.	Prudente de Morais						Bambuú				
		VN	PN	PM	ILPF1	ILPF2	ILPF3	VN	PD	PM	ILF	IPF
C total	0-5cm	4,72 <sup>a</sup>	4,72 <sup>a</sup>	3,88 <sup>ab</sup>	2,21 <sup>b</sup>	3,04 <sup>ab</sup>	3,63 <sup>ab</sup>	4,17 <sup>a</sup>	1,97 <sup>b</sup>	1,78 <sup>b</sup>	2,75 <sup>ab</sup>	3,13 <sup>ab</sup>
COS		24,29 <sup>a</sup>	24,30 <sup>a</sup>	19,96 <sup>ab</sup>	11,24 <sup>b</sup>	15,67 <sup>ab</sup>	18,68 <sup>ab</sup>	21,37 <sup>a</sup>	10,09 <sup>b</sup>	9,14 <sup>b</sup>	14,11 <sup>ab</sup>	16,06 <sup>ab</sup>
C total (%)	5-10cm	3,04 <sup>ns</sup>	3,51	4,67	3,55	3,60	3,30	2,61 <sup>a</sup>	1,48 <sup>b</sup>	1,58 <sup>b</sup>	2,31 <sup>ab</sup>	2,15 <sup>ab</sup>
COS		14,89 <sup>ns</sup>	17,22	22,89	17,44	17,63	16,19	14,85 <sup>a</sup>	8,41 <sup>b</sup>	9,01 <sup>b</sup>	13,14 <sup>ab</sup>	12,26 <sup>ab</sup>
C total (%)	10-20cm	2,51 <sup>b</sup>	3,34 <sup>ab</sup>	4,19 <sup>a</sup>	3,57 <sup>ab</sup>	3,22 <sup>ab</sup>	2,92 <sup>ab</sup>	2,30 <sup>a</sup>	1,16 <sup>c</sup>	1,19 <sup>c</sup>	1,91 <sup>ab</sup>	1,71 <sup>bc</sup>
COS		25,04 <sup>b</sup>	33,22 <sup>ab</sup>	41,40 <sup>a</sup>	35,47 <sup>ab</sup>	32,10 <sup>ab</sup>	29,05 <sup>ab</sup>	27,47 <sup>a</sup>	13,82 <sup>c</sup>	14,27 <sup>c</sup>	22,86 <sup>ab</sup>	20,44 <sup>bc</sup>
C total (%)	20-30cm	2,07 <sup>b</sup>	3,05 <sup>ab</sup>	3,97 <sup>a</sup>	2,94 <sup>b</sup>	2,80 <sup>b</sup>	2,51 <sup>b</sup>	1,62 <sup>a</sup>	1,04 <sup>b</sup>	0,92 <sup>b</sup>	1,56 <sup>a</sup>	1,44 <sup>a</sup>
COS		20,28 <sup>b</sup>	29,90 <sup>ab</sup>	38,91 <sup>a</sup>	28,81 <sup>b</sup>	27,43 <sup>b</sup>	24,57 <sup>b</sup>	21,34 <sup>a</sup>	13,67 <sup>b</sup>	12,15 <sup>b</sup>	20,49 <sup>a</sup>	18,97 <sup>a</sup>
C total (%)	30-40cm	1,72 <sup>b</sup>	2,58 <sup>b</sup>	3,67 <sup>a</sup>	2,67 <sup>b</sup>	2,36 <sup>b</sup>	2,28 <sup>b</sup>	1,35 <sup>a</sup>	0,83 <sup>b</sup>	0,83 <sup>b</sup>	1,23 <sup>ab</sup>	1,19 <sup>ab</sup>
COS		13,30 <sup>c</sup>	22,24 <sup>ab</sup>	28,68 <sup>a</sup>	22,98 <sup>ab</sup>	19,62 <sup>bc</sup>	18,69 <sup>bc</sup>	16,94 <sup>a</sup>	10,44 <sup>b</sup>	10,44 <sup>b</sup>	15,53 <sup>ab</sup>	15,00 <sup>ab</sup>
C total (%)	40-50cm	1,51 <sup>c</sup>	2,24 <sup>bc</sup>	3,55 <sup>a</sup>	2,52 <sup>b</sup>	2,23 <sup>bc</sup>	2,26 <sup>bc</sup>	1,43 <sup>a</sup>	0,64 <sup>b</sup>	0,74 <sup>b</sup>	0,98 <sup>ab</sup>	1,06 <sup>ab</sup>
COS		14,50 <sup>b</sup>	21,43 <sup>b</sup>	33,98 <sup>a</sup>	21,54 <sup>b</sup>	21,36 <sup>b</sup>	21,67 <sup>b</sup>	19,29 <sup>a</sup>	8,68 <sup>b</sup>	10,01 <sup>b</sup>	13,15 <sup>ab</sup>	14,31 <sup>ab</sup>
C total (%)	50-60cm	1,39 <sup>b</sup>	2,14 <sup>b</sup>	3,19 <sup>a</sup>	2,28 <sup>ab</sup>	2,19 <sup>b</sup>	2,00 <sup>b</sup>	0,88 <sup>a</sup>	0,59 <sup>b</sup>	0,66 <sup>ab</sup>	0,85 <sup>a</sup>	0,85 <sup>a</sup>
COS		11,84 <sup>ns</sup>	18,10	26,96	19,29	18,46	25,33	10,57 <sup>a</sup>	7,08 <sup>b</sup>	7,97 <sup>ab</sup>	10,20 <sup>a</sup>	10,28 <sup>a</sup>
C total (%)	60-70cm	1,29 <sup>b</sup>	2,01 <sup>b</sup>	3,12 <sup>a</sup>	2,16 <sup>ab</sup>	2,01 <sup>b</sup>	2,01 <sup>b</sup>	0,73 <sup>ab</sup>	0,53 <sup>b</sup>	0,56 <sup>ab</sup>	0,75 <sup>a</sup>	0,74 <sup>a</sup>
COS		13,05 <sup>ns</sup>	20,27	31,11	21,53	20,04	29,43	9,28 <sup>ab</sup>	6,69 <sup>b</sup>	7,13 <sup>ab</sup>	9,52 <sup>a</sup>	9,47 <sup>a</sup>
C total (%)	70-80cm	1,28 <sup>b</sup>	1,98 <sup>b</sup>	2,85 <sup>a</sup>	1,99 <sup>b</sup>	1,91 <sup>b</sup>	1,81 <sup>b</sup>	0,74 <sup>ns</sup>	0,49	0,53	0,67	0,67
COS		12,46 <sup>b</sup>	19,29 <sup>b</sup>	27,68 <sup>a</sup>	18,36 <sup>b</sup>	18,55 <sup>b</sup>	17,62 <sup>b</sup>	8,96 <sup>ns</sup>	5,98	6,43	8,16	8,18
C total (%)	80-90cm	1,13 <sup>b</sup>	1,91 <sup>b</sup>	2,88 <sup>a</sup>	1,89 <sup>b</sup>	1,83 <sup>b</sup>	1,71 <sup>b</sup>	0,59 <sup>ab</sup>	0,41 <sup>b</sup>	0,88 <sup>a</sup>	0,63 <sup>ab</sup>	0,59 <sup>ab</sup>
COS		9,85 <sup>b</sup>	16,71 <sup>b</sup>	25,17 <sup>a</sup>	16,52 <sup>b</sup>	16,00 <sup>b</sup>	14,95 <sup>b</sup>	7,42 <sup>b</sup>	5,13 <sup>b</sup>	13,66 <sup>a</sup>	7,90 <sup>b</sup>	7,33 <sup>b</sup>
C total (%)	90-100cm	1,03 <sup>c</sup>	1,83 <sup>b</sup>	2,80 <sup>a</sup>	1,92 <sup>b</sup>	1,70 <sup>bc</sup>	1,61 <sup>bc</sup>	0,51 <sup>b</sup>	0,68 <sup>b</sup>	2,13 <sup>a</sup>	0,51 <sup>b</sup>	0,51 <sup>b</sup>
COS		10,43 <sup>c</sup>	18,48 <sup>b</sup>	28,30 <sup>a</sup>	19,46 <sup>b</sup>	17,19 <sup>bc</sup>	16,27 <sup>bc</sup>	6,81 <sup>b</sup>	9,12 <sup>b</sup>	28,20 <sup>a</sup>	6,79 <sup>b</sup>	6,87 <sup>b</sup>

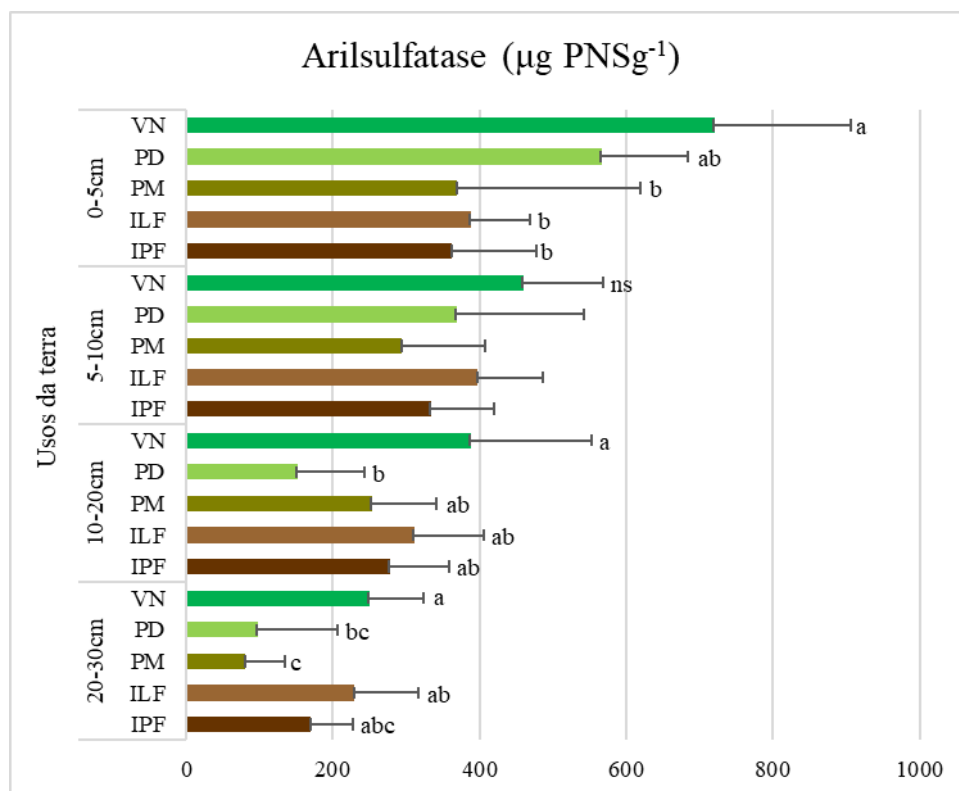


Os resultados para a enzima  $\beta$ -glicosidase, na área de Prudente de Moraes (figura 8-A), foram significativos na primeira e na última profundidade avaliadas (0-5 e 20-30 cm). Em ambas, a vegetação nativa apresentou os maiores valores, 80,95 e 23,67  $\mu\text{g PNGg-1}$  respectivamente. Em seguida, na profundidade 0-5 cm, o segundo tratamento com maior atividade dessa enzima foi o ILPF 3 (77,56  $\mu\text{g PNGg-1}$ ), seguido pela PM (66,30  $\mu\text{g PNGg-1}$ ), ILPF 2 (66,12  $\mu\text{g PNGg-1}$ ), PN (57,59  $\mu\text{g PNGg-1}$ ) e, por fim, ILPF 1 (49,34  $\mu\text{g PNGg-1}$ ). A área de Bambuí (figura 8-B), apesar de ter obtido valores médios de atividade de  $\beta$ -glicosidase maiores que na área de Prudente de Moraes, as médias de cada tratamento não diferiram entre si. Já para a segunda enzima utilizada na área de Bambuí, a arilsulfatase (Figura 9), os valores médios de cada tratamento diferiram entre si em todas as profundidades. A vegetação nativa apresentou os maiores valores em todas as profundidades, 720,11, 459,21, 388,05 e 249,27  $\mu\text{g PNGg-1}$  respectivamente para as quatro profundidades. Os menores valores medidos para essa enzima variaram entre os usos IPF (0-5 cm), PM (5-10 e 20-30 cm) e PD (10-20 cm). A arilsulfatase não foi adicionada a tabela de algoritmos SMAF, portanto, apesar de ter sido feita em apenas uma das áreas experimentais, não interferiu no resultado do índice de saúde do solo (ISS).



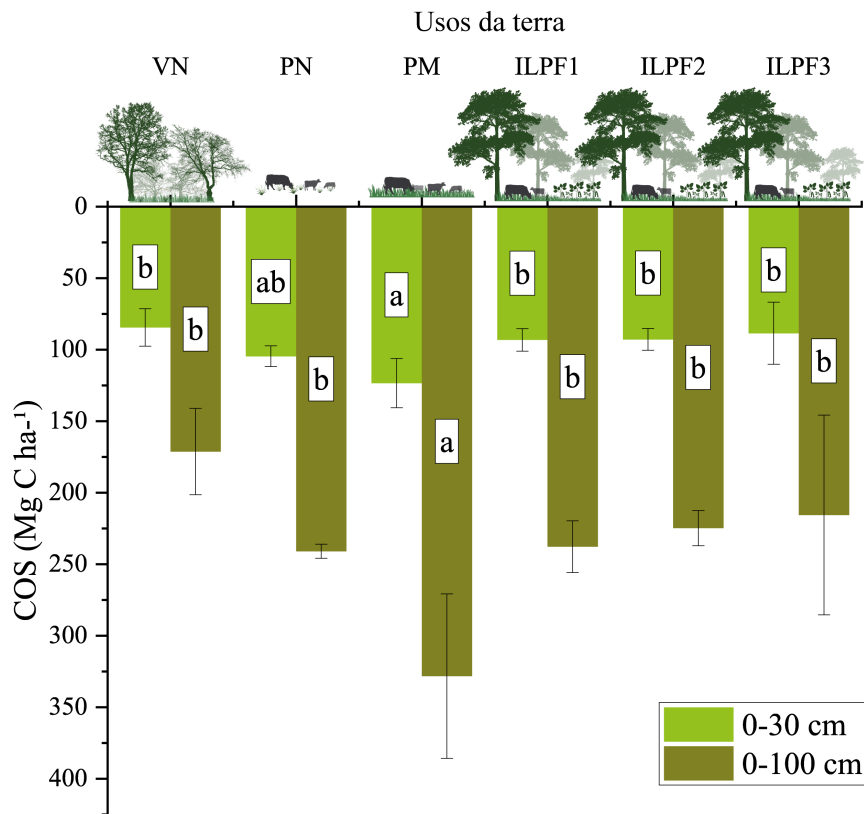


**Figura 8:** Valores médios da enzima  $\beta$ -glicosidase nas áreas de Prudente de Moraes (A) e Bambuí (B). Em áreas de vegetação nativa (VN), pastagem nominal (PN), pastagem melhorada (PM), integração lavoura-pecuária-floresta em três arranjos (ILPF 1, ILPF 2 e ILPF 3), pastagem degradada (PD), integração lavoura-floresta (ILF) e integração pecuária-floresta (IPF). Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, dentro de cada tratamento e para cada profundidade pelo teste de T ( $p > 0,05$ ), <sup>ns</sup> não significativo.

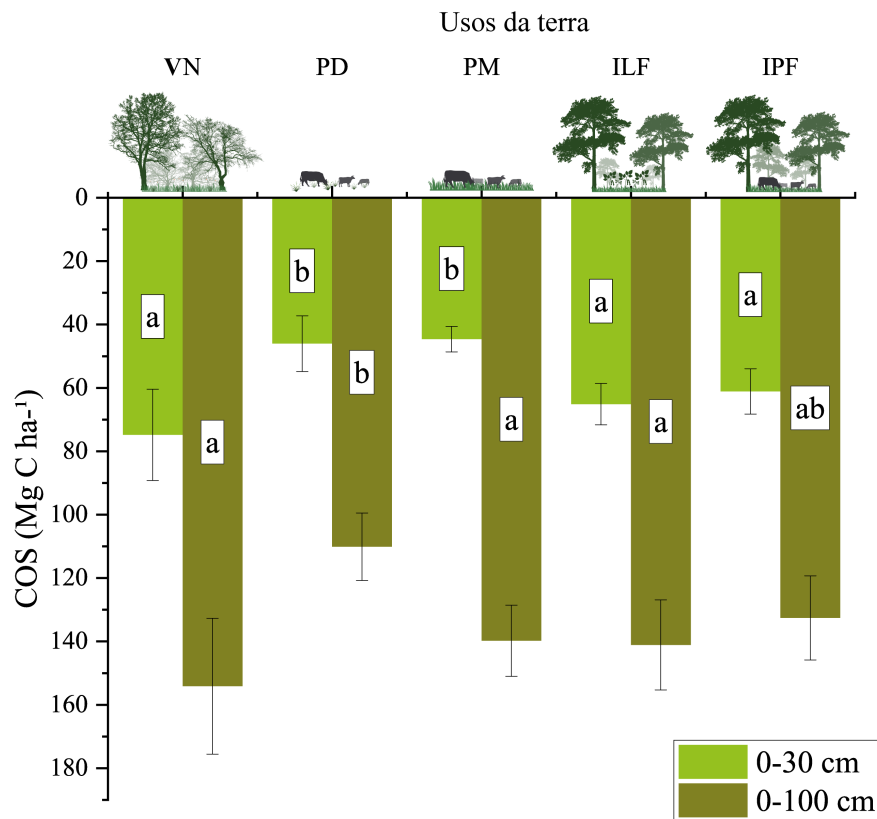


**Figura 9.** Valores médios da enzima arilsulfatase para a área de Bambuí (MG). Em áreas de vegetação nativa (VN), pastagem degradada (PD), pastagem melhorada (PM), integração lavoura-floresta (ILF) e integração pecuária-floresta (IPF). Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, dentro de cada tratamento e para cada profundidade pelo teste de T ( $p > 0,05$ ), <sup>ns</sup> não significativo.

As figuras 10 e 11, abaixo, mostram os valores médios de COS no perfil do solo, de forma mais superficial (0-30 cm) e de forma mais profunda (0-100 cm). Em ambas as faixas de profundidade e em ambas as áreas de estudo, houve diferença estatística significativa ( $p > 0,05$ ). Nos tratamentos da área de Prudente de Moraes, a PM se destacou dos demais usos da terra em ambas as faixas de profundidade. Em segundo lugar, a PN ficou com resultados próximos, principalmente na camada de 0-30 cm. Os tratamentos restantes, VN, ILPF1, ILPF2 e ILPF3, não diferiram entre si. Na área de Bambuí, a VN, o ILF e o IPF foram os dois tratamentos que se destacaram com as maiores médias de COS, em ambas as camadas calculadas (0-30 e 0-100 cm). A PM obteve resultado similar estatisticamente aos três tratamentos citados anteriormente apenas na camada de 0-100 cm, na camada superficial, PM e PD apresentaram os valores mais baixos de COS.



**Figura 10.** Valores médios de COS (estoque de carbono) na área de Prudente de Morais, nas camadas de 0-30 e 0-100cm. Em áreas de vegetação nativa (VN), pastagem nominal (PN), pastagem melhorada (PM) e integração lavoura-pecuária-floresta em três arranjos (ILPF 1, ILPF 2 e ILPF 3). Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, dentro de cada tratamento e para cada profundidade pelo teste de T ( $p > 0,05$ ), ns não significativo.



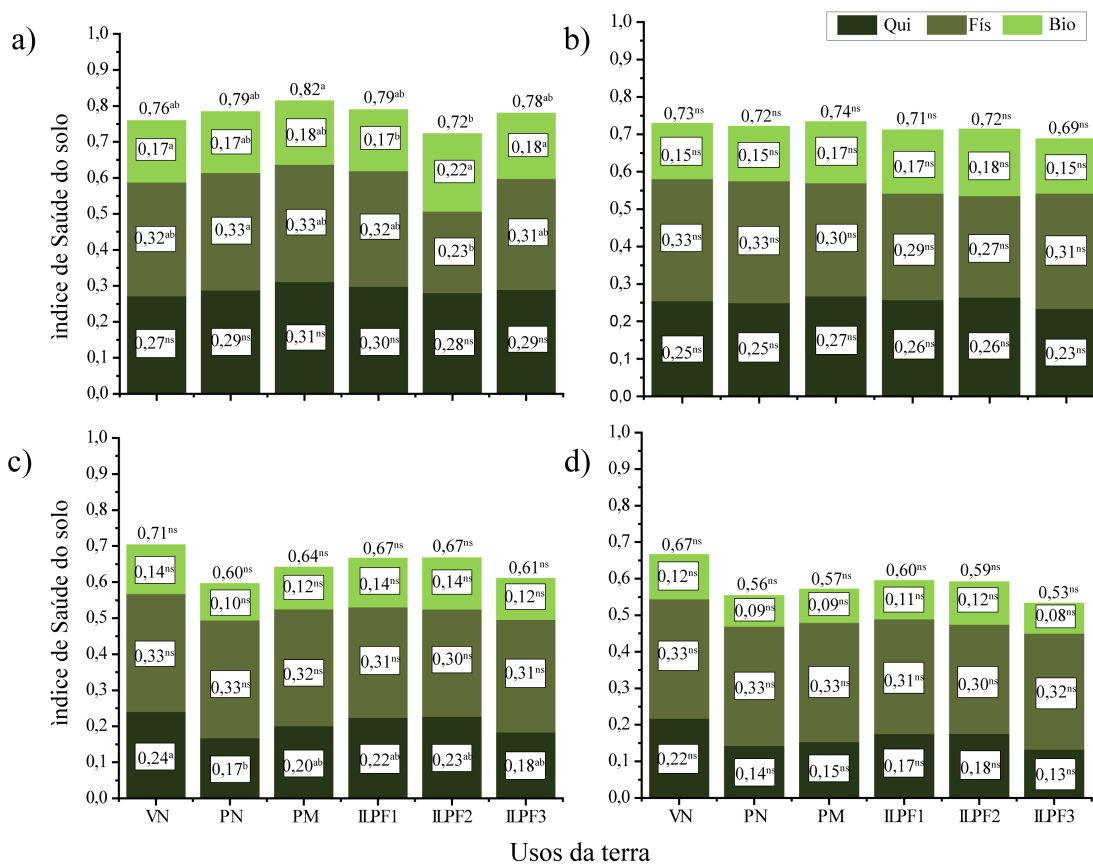
**Figura 11.** Valores médios de COS (estoque de carbono) na área de Bambuú, nas camadas de 0-30 e 0-100cm. Em áreas de vegetação nativa (VN), pastagem degradada (PD), pastagem melhorada (PM), integração lavoura-floresta (ILF) e integração pecuária-floresta (IPF). Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, dentro de cada tratamento e para cada profundidade pelo teste de T ( $p>0,05$ ), <sup>ns</sup> não significativo

### 3.4 Índice integrado de saúde do solo

Os impactos causados por cada uso da terra na saúde do solo foram avaliados em cada uma das duas áreas de estudo e foram encontradas diferenças significativas ( $p>0,05$ ) em algumas das profundidades avaliadas de forma individual (figuras 12 e 13). Na área experimental de Prudente de Moraes, o ISS variou com significância estatística apenas na superfície, de 0-5cm, onde a PM apresentou o maior índice (0,82), seguida por PN e ILPF1 (0,79), ILPF3 (0,78) e, por último, VN (0,76). Na segunda profundidade avaliada, 5-10 cm, PM trouxe novamente o maior valor de ISS (0,74), seguido por VN (0,73), PN e ILPF 2 (0,72), ILPF 1 (0,71) e ILPF 3 (0,69). De 10-20 cm, a VN representou o maior valor do índice (0,71), seguida por ILF1 e ILPF2 (0,67), PM (0,64), ILPF 3 (0,61) e PN (0,60). Na última profundidade, 20-30 cm, novamente a VN mediu o maior ISS (0,67), seguido por ILPF1 (0,60), ILPF2 (0,59), PM (0,57), PN (0,56) e ILPF3 (0,53).

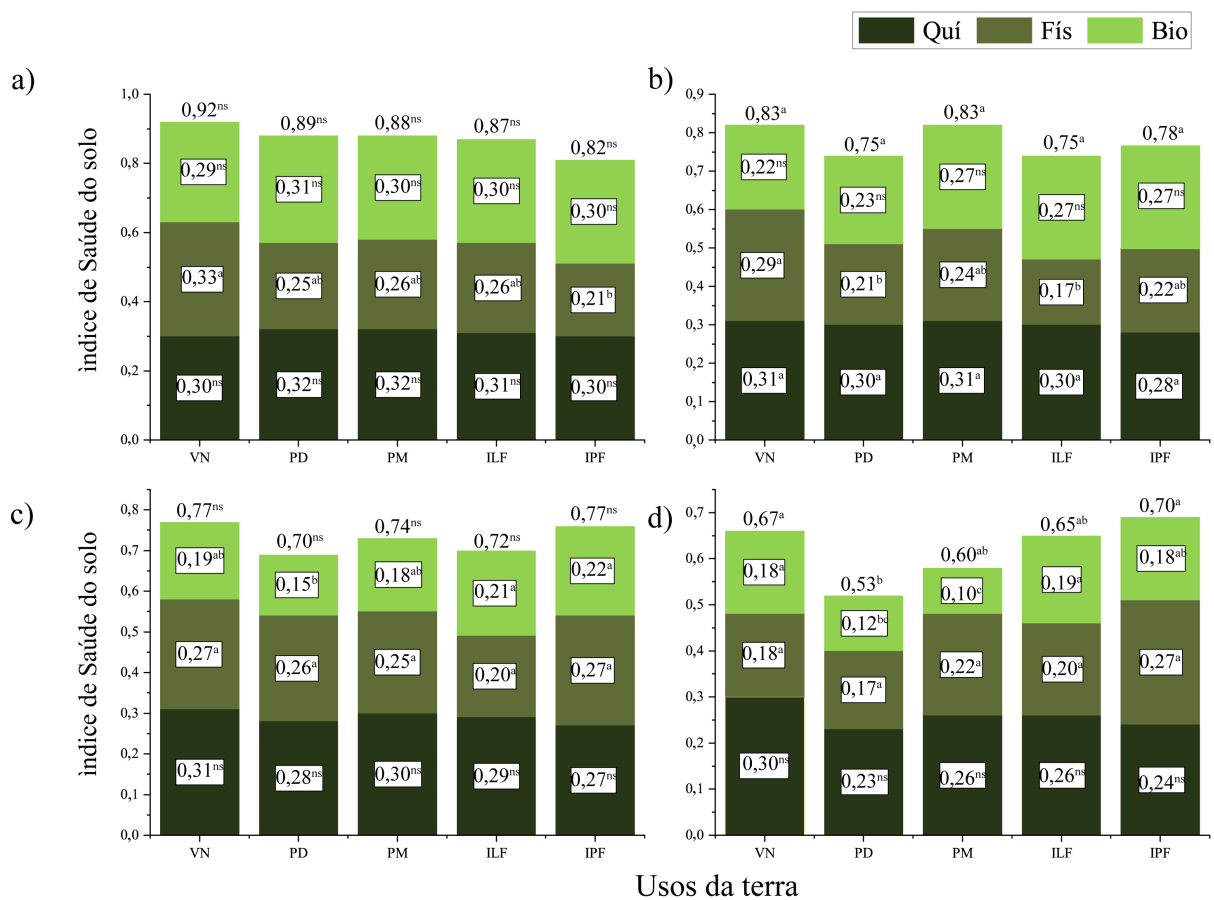
Na área de Bambuí, de 0-5 cm, o ISS da VN representou o maior valor entre os tratamentos (0,92), seguido pela PD (0,89), PM (0,88), ILF (0,87) e IPF (0,82), porém não houve diferença significativa entre esses valores ( $p < 0,05$ ). De 5-10 cm, houve diferença estatística, e o ISS novamente teve o valor mais alto encontrado na VN (0,83), seguida pela PM (0,83), IPF (0,78) e ILF e PD (0,75). Na terceira profundidade avaliada, não houve diferença significativa, e a sequência de valores de ISS ficou da seguinte maneira: VN e IPF (0,77), PM (0,74), ILP (0,72) e PD (0,70). Por fim, na última profundidade avaliada, o ISS apresentou valores com diferença estatística, e desta vez, o tratamento com maior valor do índice foi o IPF (0,70), seguido pela VN (0,67), ILF (0,65), PM (0,60) e PD (0,53).

As figuras 12 e 13 também expõem a contribuição ponderada dos componentes avaliados (químico, físico e biológico) no ISS para as duas áreas experimentais, dentro de cada profundidade e tratamento.

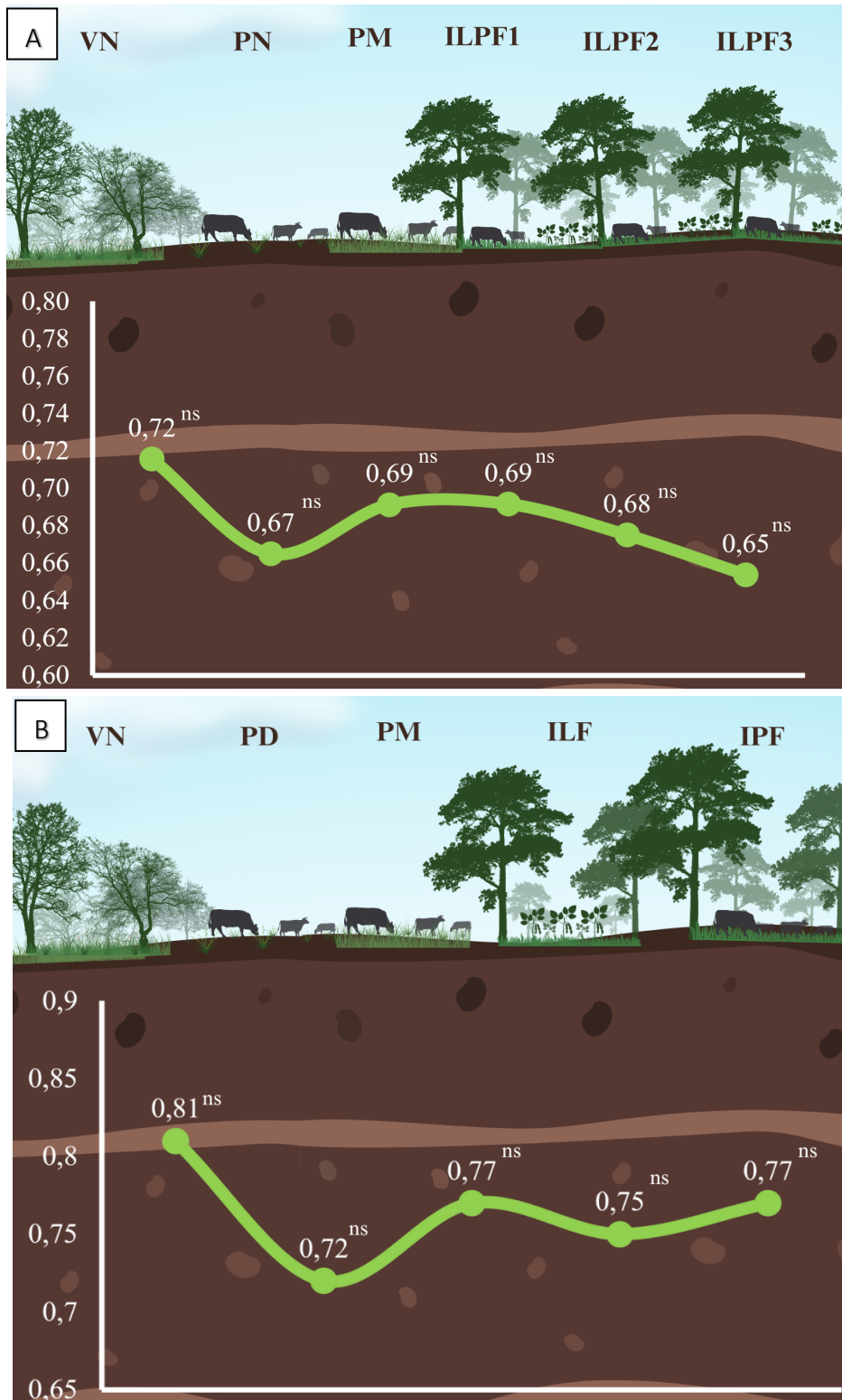


**Figura 12.** Valores médios de ISS (índice de saúde do solo) na área de Prudente de Morais, nas camadas de 0-5 (a), 5-10 (b), 10-20 (c) e 20-30 cm (d). Em áreas de vegetação nativa (VN), pastagem nominal (PN), pastagem melhorada (PM), integração lavoura-pecuária-floresta em três arranjos (ILPF 1, ILPF 2 e ILPF 3). Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, dentro de cada tratamento e para cada profundidade pelo teste de T ( $p > 0,05$ ), ns não significativo.

Também foi calculado o ISS de cada tratamento das duas áreas de estudo na profundidade total de 0-30cm, avaliando toda a camada superficial do solo com objetivo de comparar de forma geral a saúde do solo entre os diferentes usos da terra (figura 13). Em ambas as áreas, os valores não divergiram entre si de forma significativa pelo teste de T ( $p>0,05$ ). No entanto, foi possível observar nas duas áreas que a VN apresentou o maior valor de ISS para a camada total de 0-30cm, em seguida, a saúde do solo foi prejudicada nos usos da terra pastagem nominal e pastagem degradada. Os valores de ISS voltam a subir e ficar mais próximos ao valor da VN nos tratamentos PM, ILPF 1 e ILPF 2 (Prudente de Moraes) e PM, ILF e IPF (Bambu).



**Figura 13.** Valores médios de ISS (índice de saúde do solo) na área de Bambuí, nas camadas de 0-5 (a), 5-10 (b), 10-20 (c) e 20-30 cm (d). Em áreas de vegetação nativa (VN), pastagem degradada (PD), pastagem melhorada (PM), integração lavoura-floresta (ILF) e integração pecuária-floresta (IPF). Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, dentro de cada tratamento e para cada profundidade pelo teste de T ( $p>0,05$ ), ns não significativo.



**Figura 14.** Valores médios de ISS (índice de saúde do solo) nas áreas de Prudente de Moraes (A) e Bambuí (B), na camada de 0-30cm. Em áreas de vegetação nativa (VN), pastagem nominal (PN), pastagem melhorada (PM), integração lavoura-pecuária-floresta em três arranjos (ILPF 1, ILPF 2 e ILPF 3), pastagem degradada (PD), integração lavoura-floresta (ILF) e integração pecuária-floresta (IPF). Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, dentro de cada tratamento e para cada profundidade pelo teste de T ( $p>0,05$ ), ns não significativo.

## 4. DISCUSSÃO

### 4.1 Impactos da adoção de sistemas integrados nos estoques de C do solo

O potencial de sequestro de carbono em qualquer sistema de produção agrícola depende de diversos fatores e, especialmente nos sistemas integrados, devemos considerar as características das plantas no sistema, como espécies, idade, biodiversidade e população de árvores, fatores de manejo como palhada, adubações, regime de colheitas e outros, e por fim existem também características de solo e clima que vão influenciar fortemente o sequestro de carbono dentro de qualquer área (Feliciano et al., 2018). Outro fato conhecido é que o carbono no solo se apresenta de duas formas: carbono orgânico (SOC) e inorgânico. O SOC é composto por diferentes frações que possuem constituição, estabilidade e tempo de permanência no solo diversos e, o acúmulo desse tipo de carbono no solo acontece em função do equilíbrio entre a deposição de carbono (restos vegetais, excrementos animais e exsudatos de raízes) e a decomposição microbiana e estabilização de SOC (Jastrow et al., 2007). A combinação de leguminosas e forrageiras na mesma safra, é apontada como uma das estratégias que podem ajudar em uma maior concentração de MOC no solo (Soares et al., 2020). Os sistemas integrados se apresentam como uma importante opção na produção sustentável de alimentos atualmente, e representam a intensificação necessária para se produzir mais alimentos em uma menor área (Lal, 2023).

Diversos estudos da última década concluíram que os sistemas integrados possuem grande potencial de estocar mais carbono no solo em relação as áreas de pastagem degradada e monoculturas (Beckert et al., 2016; Damian et al., 2021; Freitas et al., 2020; Lal et al., 2018; Luz et al., 2019; Vogado et al., 2020). Os dados deste estudo, também corroboram essa afirmação, porém de forma diferente em cada uma das áreas de estudo em função das diferenças entre os sistemas integrados presentes em ambas. Algumas diferenças que são necessárias apontar entre os sistemas avaliados nos dois diferentes municípios é que os três arranjos de ILPF de Prudente de Moraes foram implantados em 2009, enquanto em Bambuí, ILF e IPF foram implantados em 2012. Em Prudente de Moraes, nas três primeiras safras foi cultivado milho nas entrelinhas do eucalipto recém implantado e, em 2013, a Braquiária foi implantada nos três arranjos de ILPF. Não houve pastoreio de animais nas áreas de Prudente de Moraes. Já em Bambuí, a Braquiária foi implantada um ano após o plantio das linhas de eucalipto. No IPF, houve pastoreio de animais, mantendo um resíduo de pasto de no mínimo 20 cm. No ILF, a soja foi plantada durante duas safras, 20/21 e 21/22, sendo que na primeira foi utilizado método de plantio convencional e na segunda safra, sistema de plantio direto. Matos et al. (2010) comparou



em seu trabalho o estoque de carbono de um sistema silvipastoril com 50 anos de implantação, e esse mesmo sistema foi convertido parte em pastagem e parte em terra arável por 4 anos. Os resultados mostraram que o estoque de carbono diminuiu 45% da primeira (0-10 cm) para a segunda camada (10-20cm) onde houve revolvimento do solo. A hipótese é de que isso acontece devido a MOS, que antes estava protegida nos macroagregados do solo, passa a ser exposta à oxidação e à ação dos microrganismos, reduzindo seu estoque no solo e contribuindo para emissões de CO<sub>2</sub> (Bayer et al., 2004). Na área de Bambuí, houve revolvimento do solo no tratamento ILF, porém os valores de estoque diminuíram da primeira (0-5 cm) para a segunda profundidade (5-10 cm) em todos os tratamentos.

Na área de Prudente de Moraes, é válido pontuar as diferenças no espaçamento e população de árvores em cada um dos três sistemas ILPF presentes. Damian et al. (2021) usou o modelo DayCent para avaliar de forma simulada os efeitos da mudança do uso da terra de pastagens degradadas para sistemas de manejo mais intensivos e diversificados. Os resultados, especificamente em relação ao espaçamento das fileiras de árvores, revelaram que a redução de 12 para 9 m de espaçamento resultou na diminuição do COS, apontando principalmente o sombreamento causado nas forrageiras como razão principal para esse efeito. Existem também trabalhos que apontam que a adição do componente florestal ao sistema diminuiu o C do solo, como o de Bieluczyk et al. (2020), que concluiu como principal causa desse efeito o crescimento limitado das forrageiras induzido pelo sombreamento. Avaliando as áreas deste estudo, em Prudente de Moraes, o ILPF1, que possui 20 m de espaçamento entre as linhas de eucalipto, apresentou valores de estoque ligeiramente maiores que os de ILPF2 e ILPF 3, que possuem espaçamento de 9 m entre as linhas de eucalipto. No entanto, não houve diferenças estatísticas significativas entre os três sistemas avaliados, para comprovar a hipótese feita acima. Isso pode ser explicado pelo manejo de desbaste, que não foi feito, desde 2016, em nenhum dos três sistemas de ILPF avaliados, provocando um efeito similar de sombreamento tanto no sistema com maior espaçamento quanto nos mais adensados.

O trabalho de Frazão et al. (2021), encontrou valores de estoque de C semelhantes ao deste estudo para a camada 0-10 cm para os tratamentos de ILPF, no entanto, uma divergência a ser pontuada é que o COS da VN representou quase o dobro das médias de ILPF 1 e ILPF 2, no estudo citado anteriormente. Em sistemas florestais nativos, infere-se que a grande quantidade de espécies presentes e a instalação de associações simbióticas entre plantas, bactérias, fungos e micorrizas podem contribuir de forma significativa no acúmulo de C no solo (Braghirolli et al., 2012). Portanto, os sistemas integrados são os sistemas agrícolas que mais se assemelham a esse conceito considerando a rotação de culturas e espécies presentes

cultivadas ao mesmo tempo, e sendo bem manejados, com adubações periódicas e outros manejos importantes na manutenção do sistema, podem chegar, a longo prazo, a valores de estoque de C semelhantes ao de um fragmento de vegetação nativa. Os resultados desse estudo corroboram essa observação, pois os valores de COS da VN e dos sistemas integrados, em ambas as áreas avaliadas, foram seguidos pela mesma letra na avaliação estatística, ou seja, os valores de COS da VN e dos sistemas integrados não diferiram de forma significativa em ambas as profundidades calculadas (0-30 e 0-100 cm).

Por fim, é válido discutir e comparar os valores de COS encontrados neste estudo, em ambas as camadas calculadas (0-30 e 0-100 cm), com os resultados encontrados em outros trabalhos semelhantes. Na área de Prudente de Moraes, as médias dos valores de COS seguindo a ordem dos tratamentos (VN, PN, PM, ILPF1, ILPF2 e ILPF 3), para a profundidade de 0-30 cm, foram as seguintes: 84,49, 104,65, 123,46, 93,17, 92,85 e 88,52 Mg. ha<sup>-1</sup>. E na área de Bambuí, seguindo a sequência de tratamentos (VN, PD, PM, ILF e IPF), as médias de COS na camada 0-30 cm foram: 74,80, 46,01, 44,58, 65,10 e 61,09 Mg.ha<sup>-1</sup>. No geral, como é possível observar através dos valores, a área de Prudente de Moraes resultou em valores gerais maiores de COS, em todos os tratamentos, porém em relação a área de Bambuí, os sistemas integrados apresentaram valores de COS inferiores a ambas as pastagens, o que não aconteceu nos tratamentos de Bambuí, onde as pastagens, tanto a melhorada quanto a degradada, obtiveram os menores valores de COS. Freitas et al. (2020) calculou os estoques de C e N em sistema de ILF (integração lavoura-floresta), monocultura de capim-marandu (*Brachiaria brizantha*), pastagem de baixa produtividade (*Brachiaria decumbens*) e na vegetação nativa, em área também localizada no Cerrado. Os valores encontrados foram 71,84, 65,85, 59,27 e 116,23 Mg.ha<sup>-1</sup>, seguindo a ordem de tratamentos que foi descrita acima. É visível que os valores de COS seguem uma ordem lógica conforme os tratamentos, sendo que no trabalho de Freitas et al. (2020), o ILF foi ligeiramente superior as pastagens e a VN foi significativamente superior a todos os tratamentos.

Outro exemplo de trabalho com objetivo e tratamentos parecidos é o de Vogado et al. (2020) que avaliou áreas de ILPF, ILP com sistema de plantio direto, ILP em sistema de plantio convencional, pastagem (*Brachiaria brizantha* cv. MG5) e vegetação nativa local. Os valores encontrados pelos autores, nessa sequência de tratamentos, para a camada de 0-20 cm, foram: 35,20, 68,30, 68,50, 54,46 e 32,00 Mg. ha<sup>-1</sup>. Nesse trabalho, ambos os sistemas de ILP (plantio direto e convencional) apresentaram valores superiores de COS em comparação aos outros tratamentos, incluindo o ILPF e a VN. Contudo, tanto nos exemplos citados acima, quanto em outros trabalhos analisados para a escrita deste tópico, os valores de COS seguem uma faixa

numérica semelhante, mostrando até o momento uma ampla concordância dos valores de COS encontrados em áreas de sistemas integrados no Cerrado brasileiro. Por fim, sistemas integrados bem manejados e pastagens melhoradas são estratégias eficientes para sustentar e, a longo prazo, aumentar o conteúdo de SOC nos solos do Cerrado.

## **4.2 Impactos da adoção de sistemas integrados na saúde do solo**

### **4.2.1 Indicadores da saúde química do solo**

Na região do Cerrado, predominam-se solos ácidos e de baixa fertilidade química e, de acordo com o manual de correção do solo e adubação para o Cerrado (Sousa e Lobato, 2004), o índice de pH em  $\text{CaCl}_2$  ideal a ser atingido visando uma produção de grãos viável economicamente é de 5,0 a 6,0. A maioria dos tratamentos, mantiveram valores dentro da faixa ideal apenas na primeira profundidade (0-5cm), o que evidencia o efeito do calcário aplicado em superfície (Fontana et al., 2016). Tanto na área de Pudente de Moraes e quanto na de Bambuí, a VN apresentou os menores valores de pH em todas as quatro camadas avaliadas, porém, no geral os tratamentos apresentaram valores de pH abaixo de 5,0, demonstrando essa característica dos solos do Cerrado, que pode ter sido potencializada pela aplicação constante de fertilizantes nitrogenados (Siqueira Neto et al., 2009) e por serem solos classificados com textura argilosa, tendo uma maior capacidade tampão (de Camargo et al., 2010). Em relação a soma de  $\text{H}^+\text{Al}$  ou acidez potencial, os maiores valores encontrados foram na VN e na PD, na área experimental de Bambuí. Em Prudente de Moraes, os valores de  $\text{H}^+\text{Al}$  tiveram maiores variações a cada camada amostrada, de 5-10 cm os maiores valores da soma foram encontrados em VN e PN, no entanto, nas outras três profundidades o maior valor de  $\text{H}^+\text{Al}$  foi medido na PM, enquanto os três arranjos de ILPF ficaram com valores intermediários.

O V%, como esperado, em ambas as áreas experimentais, apresentou valores maiores na primeira camada (0-5cm), e teve seus valores reduzidos a cada camada medida, e, no geral, apresentou sempre valores menores de 50%, indicando solos de baixa fertilidade, onde suas cargas estão sendo ocupadas pelos componentes de acidez, o que se relaciona com os altos valores de  $\text{H}^+\text{Al}$ . No Cerrado, os atributos de fertilidade química do solo apresentam tendência de diminuição em profundidade, e o solo se apresenta mais fértil na superfície (até 10 cm), onde se concentram os corretivos e fertilizantes aplicados (Martínez et al., 2016). Em relação aos nutrientes medidos, os teores de P, considerando a interpretação por teor de argila (>60%, em ambas as localidades), foram classificados como alto (Sousa e Lobato, 2004) em todos os tratamentos na profundidade 0-5cm. Conforme a profundidade, da segunda camada em diante os valores de P foram diminuindo e chegaram até a valores baixos, principalmente nos

tratamentos de pastagem nominal e degradada, onde não houve manejos de adubação constantes. Na área experimental de Bambuí, foi possível observar uma diferença entre o ILF e o IPF em relação aos valores de P, que se apresentaram superiores no ILF, onde houve cultivo de soja por dois anos consecutivos, com adubação direcionada para a cultura. É também relevante apontar que ambos os solos das áreas de estudo são do tipo Latossolo, que apresentam, em geral, alto grau de intemperização, e apresentam naturalmente baixa CTC da fração argila (Marcolin e Calegari, 2020). Tal fator, pode explicar os valores muito baixos de K encontrados em todas as camadas e em todos os tratamentos. Já em relação aos nutrientes Ca e Mg, os valores apresentados, de forma geral, foram altos para todos os tratamentos e profundidades, o que pode ter ajudado a aumentar os escores gerais dos indicadores químicos. Por último, a CTC foi configurada alta ( $>4,0 \text{ cmol}_c.\text{dm}^{-3}$ ) em todos os tratamentos em todas as profundidades.

#### 4.2.2 Indicadores da saúde física do solo

A densidade do solo (DS) refere-se à massa de solo seco por unidade de volume, englobando o espaço de poros e as partículas sólidas do solo, e a DS crítica determinada para solos argilosos é de 1,30 a 1,40  $\text{Mg m}^{-3}$ . Segundo Pachepsky e Park (2015), a DS é bastante usada como um indicador indireto de compactação, aeração e aptidão do solo em armazenar e estocar água. Portanto, é possível observar que todos os tratamentos, de ambas as áreas experimentais, e em todas as profundidades avaliadas, ficaram com valores de DS abaixo de 1,20  $\text{Mg m}^{-3}$ , demonstrando que não havia compactação do solo em nenhum dos usos da terra avaliados, e exibindo, no geral, boa saúde física do solo. Isso fica novamente evidente quando são avaliadas as contribuições ponderadas de cada componente (físico, químico e biológico) no índice geral de saúde do solo, onde o componente físico obteve maiores médias de escore individual em todos os tratamentos, na profundidade 0-30 cm. É importante observar que na área de Bambuí, houve pastoreio de animais, no tratamento IPF, enquanto nos três arranjos de ILPF da área de Prudente de Moraes, não houve entrada de animais. O valor de DS na camada mais superficial (0-5 cm) foi ligeiramente superior aos valores encontrados nos tratamentos ILF, ILPF1 e ILPF2. No entanto, a partir de 5-10 cm, ILF passa a apresentar maiores valores de DS em relação ao IPF, indicando que o tráfego de máquinas pode ser mais nocivo a saúde física do solo do que o pastoreio de animais, desde que sejam controlados a taxa de lotação e a altura mínima da forrageira (Moraes et al., 2014).

Na área de Bambuí, também foi calculada a porosidade total (PT), que diferiu estatisticamente entre os usos da terra apenas em uma profundidade avaliada (5-10 cm), de forma sutil. Avaliando de individualmente os componentes da PT (macroporosidade e

microporosidade), ambas diferiram estatisticamente nas duas últimas profundidades avaliadas (10-20 e 20-30 cm), com destaque para a microporosidade, que apresentou maiores divergências, enquanto a macroporosidade exibiu diferenças mais sutis. Valores de MA abaixo de 10% acarretam numa significativa diminuição do fluxo de oxigênio no solo (Reynolds et al., 2002). Nos tratamentos avaliados, na área de Bambuí, apenas um valor foi encontrado abaixo desse nível crítico, no ILF, de 5-10cm, que mediu 9 %. No geral, nenhum dos tratamentos, nas quatro profundidades apresentadas, exibiu valores críticos de MA. Em relação a MI, Cherubin et al. (2016) apresentaram três valores que definem o número mínimo, médio e bom de microporos no solo, na seguinte ordem: 0,15, 0,20 e 0,35 m<sup>3</sup>m<sup>-3</sup>. Os valores encontrados neste estudo variaram de 0,25 a 0,41 m<sup>3</sup>m<sup>-3</sup>, indicando valores dentro da faixa média, até acima da faixa considerada boa. Portanto, esses bons resultados da saúde física do solo corroboram com os encontrados por Nascimento et al. (2019), reafirmou o potencial que os sistemas integrados possuem na redução do impacto da produção agrícola nos indicadores físicos do solo, exibindo sua maioria de indicadores com resultados dentro da faixa adequada de valores.

#### **4.2.3 Indicadores da saúde biológica do solo**

Sistemas de produção mais intensivos e diversificados, como os sistemas integrados, podem alterar a estrutura da comunidade bacteriana do solo, influenciada por diversos fatores, como a maior diversidade de plantas no sistema e a adição de fertilizantes (Li et al., 2012). Portanto, análises que medem algumas atividades enzimáticas foram escolhidas para compor os indicadores de saúde biológica do solo, devido a ação desses compostos químicos em diversas reações importantes no solo, como, por exemplo, ciclagem de nutrientes e formação de MO (Jat et al., 2021). A enzima  $\beta$ -glicosidade exerce papel essencial na liberação de açúcares de baixo peso molecular, que são importantes fontes de energia para os microrganismos, associando-a ao ciclo do carbono (Bandick e Dick, 1999). A classificação, referente a Latossolos no bioma Cerrado, de acordo com Mendes et al. (2018), traz os seguintes intervalos, a fim de classificar os níveis de atividade em baixa, moderada e adequada:  $\leq 90$ , de 91 a 225 e  $>225 \mu\text{g PNGg}^{-1}$ . Tendo em vista esses valores, na área de Prudente de Moraes, mesmo na camada mais superficial, 0-5cm, os valores medidos ficaram abaixo de  $90 \mu\text{g PNGg}^{-1}$ , ou seja, os níveis de atividade enzimática foram baixos para todos os tratamentos e profundidades. No entanto, de 0-5cm, houve diferença estatística e a VN e o ILPF3 apresentaram os maiores valores dessa enzima. Apesar das amostras dessa área terem sido coletadas no período chuvoso, com certa umidade no solo, as amostras foram enviadas para realizar a análise através de

transporte rodoviário, o que demorou alguns dias e não ofereceu as condições de temperatura e armazenamento ideais.

Na área experimental de Bambuí, os valores totais de atividade enzimática, da enzima  $\beta$ -glicosidase, foram maiores do que da área anterior. Na profundidade de 0-5cm, as médias de todos os tratamentos ultrapassaram  $100 \mu\text{g PNGg}^{-1}$ , entrando na faixa de atividade enzimática moderada. Foi possível observar um gradiente decrescente de valores da enzima da primeira à última camada de solo, porém não houve diferença estatística significativa em nenhuma das camadas para a  $\beta$ glicosidase. Nas amostras de Bambuí, a atividade da enzima arilsulfatase também foi medida, e apresentou melhor resposta em comparação a  $\beta$ -glicosidase. A arilsulfatase é uma enzima que está associada ao ciclo do enxofre (S) e, segundo Mendes et al. (2020) foi o bioindicador que apresentou maior sensibilidade em um estudo com outros três indicadores avaliados. As classes de atividade para essa enzima são as seguintes, classificando em baixa, moderada e adequada, respectivamente:  $\leq 25$ , de 26 a 145 e  $>145 \mu\text{g PNGg}^{-1}$  (Mendes et al., 2018). Todos os valores de arilsulfatase medidos, até a última profundidade avaliada (20-30 cm), ficaram acima de  $145 \mu\text{g PNGg}^{-1}$ , com exceção dos dois tratamentos de pastagem (PM e PD), que de 20-30 cm mediram 80,56 e 97,36  $\mu\text{g PNGg}^{-1}$ , respectivamente.

Por fim, o carbono do solo (C total) foi medido e representou o terceiro bioindicador de saúde do solo neste estudo. Os valores de C total (%) apresentaram diferença estatística significativa em todas as camadas, com exceção de uma, tanto em Prudente de Moraes (5-10 cm) quanto em Bambuí (70-80 cm). Em Prudente de Moraes, a PM apresentou as maiores porcentagens de C total ao longo do perfil do solo, o que corrobora a afirmação de Luz et al. (2019) de que pastagens melhoradas, após um longo prazo de manejo adequado, tem potencial para aumentar o conteúdo de C no solo. Na área de Bambuí, ambas as pastagens apresentaram, na maioria das camadas avaliadas, os menores valores de C total (%). A VN e os dois sistemas integrados (ILP e IPF) exibiram valores próximos desse bioindicador por quase todo o perfil de solo avaliado. É pertinente mencionar, a qualidade e a quantidade dos resíduos vegetais aportados ao solo. O grande apelo dos sistemas integrados é exatamente a alternância de cultivos, que proporciona uma contribuição maior na quantidade e na diversidade dos resíduos orgânicos oferecidos ao sistema (Silva et al., 2011). A vegetação nativa, por sua vez, especificamente no Cerrado, é capaz de aportar restos vegetais mais complexos e lignificados do que nas áreas agrícolas (Mendes et al., 2020). Contudo, os resultados de C total e de COS deste estudo, em Bambuí, mostraram a semelhança nos valores encontrados nos sistemas integrados e nas áreas nativas, confirmando o potencial que os sistemas agrícolas integrados

têm em proporcionar condições similares de aporte de resíduos e na sustentação dos valores de C do solo.

#### **4.2.4 Índice integrado de saúde do solo (ISS)**

Em ambas as áreas estudadas, as médias do ISS calculadas não diferiram entre os tratamentos, para a profundidade total de 0-30 cm. No entanto, os valores de ISS diferiram estatisticamente em algumas profundidades, em Prudente de Moraes (0-5 cm) e em Bambuí (5-10 e 20-30 cm). Foi possível observar que os valores de ISS foram diminuindo conforme a profundidade das camadas medidas. Entre os três grupos de indicadores utilizados (químicos, físicos e biológicos), na área de Prudente de Moraes, a saúde física do solo se destacou, apresentando escores superiores aos recebidos pelos medidores químicos e, principalmente, os biológicos, que apresentaram escores baixos nessa área, com contribuição dos baixos valores nas análises enzimáticas. Em Bambuí, os escores dos três grupos de indicadores se mostraram mais equilibrados, com exceção da última profundidade avaliada, 20-30 cm, onde os indicadores biológicos obtiveram escores menores.

Muito se fala sobre a saúde física dos solos sob sistemas de ILPF, Silva et al. (2015) encontraram resultados que permitiram os autores a concluir que a baixa saúde física da superfície do solo no ILPF pode influenciar maiores perdas de água no solo e, conseqüentemente, perdas de nutrientes. No entanto, este estudo demonstrou que sistemas contendo o componente florestal são capazes de apresentar bons resultados em relação a saúde física do solo, se bem manejados em relação a qualidade e manejo da forrageira e com bom planejamento de lotação de animais durante o pastoreio. Outro fator que é frequentemente apontado como uma possível interferência negativa dos sistemas de ILPF na saúde do solo é o sombreamento causado pela cultura florestal nas forrageiras ou leguminosas cultivadas na entrelinha, o que reduz a cobertura do solo e, conseqüentemente, a posterior produção de resíduos vegetais (Gamarra et al., 2017). Neste estudo, o efeito do sombreamento foi observado, de forma sutil, pois tanto ILPF2 quanto ILPF3, que possuem espaçamento de 9m entre linhas de eucalipto, apresentaram valores de ISS mais baixos em comparação ao ILPF1, que possui espaçamento de 20m, porém os valores não apresentaram diferença estatística entre si.

Na área de Prudente de Moraes, o solo sob VN, de 0-30 cm, estava funcionando com 72% de sua capacidade total, e essa capacidade foi reduzida para 67% quando foi introduzida a PN. A PM restaurou a capacidade do solo a 69%, mesmo valor encontrado no ILPF1. Nos dois sistemas de ILPF (2 e 3) que possuem menos espaçamento entre linhas de eucalipto (9 m), os valores voltaram a regredir e ficaram a 68 e 65%, respectivamente, sendo o ILPF3 o sistema

com menor valor total de ISS entre os cinco usos da terra avaliados. Em Bambuí, o solo presente na VN apresentou 81% de sua capacidade total, decaindo para 72% na PD. O IPF e a PM mediram 77% da capacidade total do solo e, por fim, o ILF apresentou 75%, demonstrando uma sequência mais clara e divergente de valores do que os da área anterior. O trabalho de Cherubin et al. (2017) trouxe resultados próximos, onde a vegetação nativa atuava em 80% de seu potencial total, e um sistema de 20 anos com cultivo de grãos (milho, soja e aveia) causou a queda desse valor para 64%. Entretanto, Luz et al. (2019) apresentaram resultados que permitiram os autores a concluírem que o sistema de integração lavoura-pecuária, associado ao sistema de plantio direto, possui potencial para aumentar e restabelecer a saúde do solo. Os resultados deste estudo confirmam essa tendência.

Em relação a metodologia SMAF, Valani et al. (2020) destacou a capacidade dos indicadores de saúde do solo escolhidos para o conjunto mínimo de dados da SMAF, pois eles foram capazes de apontar as diferenças entre os diferentes usos da terra. Neste estudo, também foram usados o mesmo conjunto mínimo de indicadores, e cada indicador individualmente apresentou pontuais diferenças significativas para os diferentes tratamentos. Em relação ao índice que integra os indicadores físicos, químicos e biológicos, Cherubin et al. (2021) já havia apontado a necessidade de atualização e refinamento das atuais curvas de pontuação SMAF para grande parte dos indicadores utilizados, tendo em vista que ainda permanecem com conjunto de dados limitados para as regiões tropicais. Novas curvas de pontuação precisam ser desenvolvidas para indicadores essenciais, que ainda não estão disponíveis na SMAF, como: porosidade do solo, resistência a penetração, infiltração de água, frações lábeis de C, entre outros. Por isso, melhorias são necessárias para consolidarem essa ferramenta, e permitir a visualização mais clara dos benefícios de sistemas de produção mais sustentáveis. Contudo, alguns valores encontrados nos sistemas integrados deste estudo, se confirmaram dentro da faixa sugerida por Karlen et al. (2013), de 75 a 85%, para sistemas de cultivo conservacionistas em condições de clima temperado, confirmando a tendência de manutenção da saúde do solo proposta pelos sistemas integrados.





## 5. CONCLUSÃO

Esse estudo demonstrou que a conversão da vegetação nativa para um sistema de pastagem degradada (BambuÍ) diminui consideravelmente o estoque de carbono no solo (COS). Os sistemas integrados e as pastagens melhoradas são capazes de manter valores de COS próximos (BambuÍ) e até superiores (Prudente de Moraes) em relação a vegetação nativa coletada no local e, portanto, demonstraram que são capazes de aumentar os valores de COS no solo.

O índice de saúde do solo (ISS), apesar de não ter apresentado diferenças estatísticas na camada 0-30 cm em ambas as áreas de estudo analisadas, exibiu os maiores valores de ISS para a vegetação nativa, em ambas as áreas de estudo. Em seguida, a PM e o ILPF1, em Prudente de Moraes, e a PM e o IPF, em Bambuí, apresentaram os segundos maiores valores de ISS. Os menores valores de ISS foram medidos na pastagem degradada e nominal, respectivamente. Contudo, foi possível concluir que os sistemas integrados foram capazes de impactar positivamente a saúde do solo, e, a longo prazo, dependerá de fatores como arranjo e espaçamento do componente florestal, tráfego de máquinas, pastoreio de animais, manejo de adubação, eficiência da rotação de culturas, entre outros. O manejo das áreas, que estava ineficiente, ajuda-nos a explicar os resultados positivos, porém com ausência das diferenças estatísticas.

O SMAF foi eficiente para a definição dos valores de saúde do solo tanto nas pastagens quanto nos sistemas integrados, em áreas do Cerrado brasileiro, e é uma ferramenta útil para profissionais do agronegócio a fim de tomar decisões de manejo mais sustentáveis dentro de um sistema agrícola. É importante, contudo, que esse tipo de estudo se repita para uma maior variedade de condições climáticas, edáficas e agroecológicas, pois ainda não está definido quais são as melhores decisões de manejo, ou práticas dentro dos sistemas integrados que promovem maiores benefícios ao COS e ao ISS, e pesquisas de longo prazo são necessárias para uma compreensão mais completa e interdisciplinar. Novos estudos como este são incentivados, para explorar e evidenciar o potencial regional desses sistemas em um território diverso como o do Brasil. Contudo, os sistemas integrados demonstraram seu potencial de manutenção da saúde do solo, podendo contribuir abundantemente no alcance de metas como a de mitigação das emissões de GEE (reduzir em 37% até 2025 e 43% até 2030).



**REFERÊNCIAS**

- Assis, P.C.R., Stone, L.F., Medeiros, J.C., Madari, B.E., De Oliveira, J.M., Wruck, F.J., 2015. Atributos físicos do solo em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta. *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.* 19, 309–316. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/AGRIAMBI.V19N4P309-316>
- Bandick, A.K., Dick, R.P., 1999. Field management effects on soil enzyme activities. *Soil Biol. Biochem.* 31, 1471–1479. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(99\)00051-6](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00051-6)
- Bayer, C., Martin-Neto, L., Mielniczuk, J., Pavinato, E.A., 2004. Armazenamento de carbono em frações lábeis da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. *Pesqui. Agropecuária Bras.* 39, 677–683. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2004000700009>
- Bayer, C., Mielniczuk, J., Giasson, E., Martin-Neto, L., Pavinato, A., 2007. Tillage Effects on Particulate and Mineral-Associated Organic Matter in Two Tropical Brazilian Soils. <http://dx.doi.org/10.1080/00103620500446928> 37, 389–400. <https://doi.org/10.1080/00103620500446928>
- Beckert, M.R., Smith, P., Lilly, A., Chapman, S.J., 2016. Soil and tree biomass carbon sequestration potential of silvopastoral and woodland-pasture systems in North East Scotland. *Agrofor. Syst.* 90, 371–383. <https://doi.org/10.1007/S10457-015-9860-4/FIGURES/5>
- Bieluczyk, W., Piccolo, M. de C., Pereira, M.G., Moraes, M.T. de, Soltangheisi, A., Bernardi, A.C. de C., Pezzopane, J.R.M., Oliveira, P.P.A., Moreira, M.Z., Camargo, P.B. de, Dias, C.T. dos S., Batista, I., Cherubin, M.R., 2020. Integrated farming systems influence soil organic matter dynamics in southeastern Brazil. *Geoderma* 371, 114368. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2020.114368>
- Bonanomi, J., Tortato, F.R., Gomes, R. de S.R., Penha, J.M., Bueno, A.S., Peres, C.A., 2019. Protecting forests at the expense of native grasslands: Land-use policy encourages open-habitat loss in the Brazilian Cerrado biome. *Perspect. Ecol. Conserv.* 17, 26–31. <https://doi.org/10.1016/J.PECON.2018.12.002>
- Braghirolli, F.L., Sgrott, A.F., Pescador, R., Uhlmann, A., Stürmer, S.L., 2012. Fungos micorrízicos arbusculares na recuperação de florestas ciliares e fixação de carbono no solo. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 36, 733–744. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000300005>
- Cherubin, M.R., Karlen, D.L., Franco, A.L.C., Cerri, C.E.P., Tormena, C.A., Cerri, C.C., 2016. A Soil Management Assessment Framework (SMAF) Evaluation of Brazilian Sugarcane Expansion on Soil Quality. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 80, 215–226. <https://doi.org/10.2136/SSSAJ2015.09.0328>
- Cherubin, M.R., Tormena, C.A., Karlen, D.L., 2017. Soil Quality Evaluation Using the Soil Management Assessment Framework (SMAF) in Brazilian Oxisols with Contrasting Texture. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 41, e0160148. <https://doi.org/10.1590/18069657RBCS20160148>

- da Silva, E.F., Lourente, E.P.R., Marchetti, M.E., Mercante, F.M., Ferreira, A.K.T., Fujii, G.C., 2011. Frações lábeis e recalcitrantes da matéria orgânica em solos sob integração lavoura-pecuária. *Pesqui. Agropecuária Bras.* 46, 1321–1331. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011001000028>
- Damian, J.M., da Silva Matos, E., e Pedreira, B.C., de Faccio Carvalho, P.C., de Souza, A.J., Andreote, F.D., Premazzi, L.M., Cerri, C.E.P., 2021. Pastureland intensification and diversification in Brazil mediate soil bacterial community structure changes and soil C accumulation. *Appl. Soil Ecol.* 160, 103858. <https://doi.org/10.1016/J.APSOIL.2020.103858>
- De Camargo, M.S., Barbosa, D.S., Resende, R.H., Korndörfer, G.H., Pereira, H.S., 2010. Fósforo em solos de cerrado submetidos à calagem. *Biosci. J.* 26, 187–194. <https://seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/7055>.
- De Moraes, A., Carvalho, P.C. de F., Anghinoni, I., Lustosa, S.B.C., Costa, S.E.V.G. de A., Kunrath, T.R., 2014. Integrated crop–livestock systems in the Brazilian subtropics. *Eur. J. Agron.* 57, 4–9. <https://doi.org/10.1016/J.EJA.2013.10.004>
- de Sant-Anna, S.A.C., Jantalia, C.P., Sá, J.M., Vilela, L., Marchão, R.L., Alves, B.J.R., Urquiaga, S., Boddey, R.M., 2017. Changes in soil organic carbon during 22 years of pastures, cropping or integrated crop/livestock systems in the Brazilian Cerrado. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 108, 101–120. <https://doi.org/10.1007/S10705-016-9812-Z/FIGURES/7>
- Dollinger, J., Jose, S., 2018. Agroforestry for soil health. *Agrofor. Syst.* 92, 213–219. <https://doi.org/10.1007/S10457-018-0223-9/METRICS>
- Fontana, A., Teixeira, W.G., Balieiro, F. de C., de Moura, T.P.A., de Menezes, A.R., Santana, C.I., 2016. Características e atributos de Latossolos sob diferentes usos na região Oeste do Estado da Bahia. *Pesqui. Agropecuária Bras.* 51, 1457–1465. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900044>
- Frazão, L.A., Cardoso, P.H.S., Neta, M.N.A., Mota, M.F.C., Almeida, L.L. de S., Ribeiro, J.M., Bicalho, T.F., Feigl, B.J., Harper, R., Frazão, L.A., Cardoso, P.H.S., Neta, M.N.A., Mota, M.F.C., Almeida, L.L. de S., Ribeiro, J.M., Bicalho, T.F., Feigl, B.J., Harper, R., 2021. Carbon and nitrogen stocks and organic matter fractions in the topsoil of traditional and agrisilvicultural systems in the Southeast of Brazil. *Soil Res.* 59, 794–805. <https://doi.org/10.1071/SR20150>
- Gamarra, É.L., Morais, M.D.G., De Almeida, R.G., Paludetto, N.A., Pereira, M., De Oliveira, C.C., 2017. Produção de bovinos de corte em sistemas de integração estabelecidos. *Semin. Ciências Agrárias* 38, 3241–3252. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2017v38n5p3241>
- Jastrow, J.D., Amonette, J.E., Bailey, V.L., 2007. Mechanisms controlling soil carbon turnover and their potential application for enhancing carbon sequestration. *Clim. Change* 80, 5–23. <https://doi.org/10.1007/S10584-006-9178-3/METRICS>

- Jat, H.S., Kumar, V., Kakraliya, S.K., Abdallah, A.M., Datta, A., Choudhary, M., Gathala, M.K., McDonald, A.J., Jat, M.L., Sharma, P.C., 2021. Climate-smart agriculture practices influence weed density and diversity in cereal-based agri-food systems of western Indo-Gangetic plains. *Sci. Reports* 2021 11(11), 1–15. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-95445-1>
- Karlen, D.L., Mausbach, M.J., Doran, J.W., Cline, R.G., Harris, R.F., Schuman, G.E., 1997. Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation (A Guest Editorial). *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61, 4–10. <https://doi.org/10.2136/SSSAJ1997.03615995006100010001X>
- Karlen, D.L., Rice, C.W., 2015. Soil Degradation: Will Humankind Ever Learn? *Sustain.* 2015, Vol. 7, Pages 12490–12501. <https://doi.org/10.3390/SU70912490>
- Lal, R., 2023. Farming systems to return land for nature: It's all about soil health and re-carbonization of the terrestrial biosphere. *Farming Syst.* 1, 100002. <https://doi.org/10.1016/J.FARSYS.2023.100002>
- Li, Y., Rao, P., Wang, J., Song, S., Wang, R., Liu, S., Che, L., 2021. Study on preparation and application of a multifunctional microspheric soil conditioner based on Arabic gum, gelatin, chitosan and  $\beta$ -cyclodextrin. *Int. J. Biol. Macromol.* 183, 1851–1860. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2021.05.205>
- Luz, F.B., da Silva, V.R., Kochem Mallmann, F.J., Bonini Pires, C.A., Debiasi, H., Franchini, J.C., Cherubin, M.R., 2019. Monitoring soil quality changes in diversified agricultural cropping systems by the Soil Management Assessment Framework (SMAF) in southern Brazil. *Agric. Ecosyst. Environ.* 281, 100–110. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2019.05.006>
- Marcolin, L., Calegari, M.R., 2020. Atributos químicos, físicos e mineralogia de Latossolos e sua relação com a paisagem no oeste do Paraná. *Rev. do Dep. Geogr.* 39, 48–61. <https://doi.org/10.11606/RDG.V39I0.158400>
- Martínez, I., Chervet, A., Weisskopf, P., Sturny, W.G., Etana, A., Stettler, M., Forkman, J., Keller, T., 2016. Two decades of no-till in the Oberacker long-term field experiment: Part I. Crop yield, soil organic carbon and nutrient distribution in the soil profile. *Soil Tillage Res.* 163, 141–151. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2016.05.021>
- Mendes, I.C., Marchão, L.R., Junior, F.B.R., Chaer, G.M., Salton, J.C., Vilela, L., Oliveira, M.I.L. de, Tomazi, M., Benites, V.M., 2022. Saúde Do Solo Em Sistemas De Integração Lavoura Pecuária Capítulo 7.
- Mendes, L.C., Tormena, C.A., Cherubin, M.R., Karlen, D.L. 2018. Soil health assessment and maintenance, in: Central and South Central Brazil. In: Reicosky, D, Editor. *Managing Soil Health for Sustainable Agriculture*. Burleigh Dodds Science Publishing Limited, Cambridge, pp. 379–415.
- Nair, P.K.R., Kumar, B.M., Nair, V.D., 2009. Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 172, 10–23. <https://doi.org/10.1002/JPLN.200800030>

- Nascimento, D.M. do, Cavalieri-Polizeli, K.M.V., Silva, A.H. da Favaretto, N., Parron, L.M., 2019. Soil physical quality under long-term integrated agricultural production systems. *Soil Tillage Res.* 186, 292–299. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2018.08.016>
- Pachepsky, Y., Park, Y., 2015. Saturated Hydraulic Conductivity of US Soils Grouped According to Textural Class and Bulk Density. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 79, 1094–1100. <https://doi.org/10.2136/SSSAJ2015.02.0067>
- Polidoro, J.C., Freitas, P.L. De, Hernani, L.C., Anjos, L.H.C. Dos, Rodrigues, R.D.A.R., Cesário, F.V., Andrade, A.G. De, Ribeiro, J.L., 2020. The impact of plans, policies, practices and technologies based on the principles of conservation agriculture in the control of soil erosion in Brazil. *Authorea Prepr.* <https://doi.org/10.22541/AU.158750264.42640167>
- Reynolds, W.D., Bowman, B.T., Drury, C.F., Tan, C.S., Lu, X., 2002. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. *Geoderma* 110, 131–146. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00228-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00228-8)
- Ribeiro, A.C., Guimarães, P.T.G., Alvarez V., V.H., 1999. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª Aproximação, 5ª. ed. Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, Viçosa.
- Rinot, O., Levy, G.J., Steinberger, Y., Svoray, T., Eshel, G., 2019. Soil health assessment: A critical review of current methodologies and a proposed new approach. *Sci. Total Environ.* 648, 1484–1491. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2018.08.259>
- Silva, H. Da Favaretto, N., Cavalieri, K.M. V., Dieckow, J., Vezzani, F.M., Parron, L.M., Cherobim, V.F., Marioti, J., Ferrari Neto, H., 2015. Atributos físicos do solo e escoamento superficial como indicadores de serviços ambientais. In: Parron, L. M.; Garcia, J. R.; Oliveira, E. B. De; Brown, G. G.; Prado, R. B. (Ed.). *Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do Bioma Mata Atlântica*. Brasília, DF: Embrapa, 2015.
- Siqueira Neto, M., Piccolo, M.C., Scopel, E., Da Costa Junior, C., Cerri, C.C., Bernoux, M. 2009. Carbono total e atributos químicos com diferentes usos do solo no Cerrado. *Acta Sci. Agron.* 31, 709–717. <https://doi.org/10.4025/ACTASCIAGRON.V31I4.792>
- Smith, P., Powlson, D.S., Glendining, M.J., Smith, J.U., 1997. Potential for carbon sequestration in European soils: preliminary estimates for five scenarios using results from long-term experiments. *Glob. Chang. Biol.* 3, 67–79. <https://doi.org/10.1046/J.1365-2486.1997.00055.X>
- Soares, M.B., Freddi, O. da S., Matos, E. da S., Tavanti, R.F.R., Wruck, F.J., de Lima, J.P., Marchioro, V., Franchini, J.C., 2020. Integrated production systems: An alternative to soil chemical quality restoration in the Cerrado-Amazon ecotone. *CATENA* 185, 104279. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2019.104279>
- Tabatabai, M.A., 1994. Soil Enzymes, in: R. W. Weaver, J. S. Angle, P. S. Botttomley (Eds.), *Methods of Soil Analysis: Microbiological and Biochemical Properties*. Madison, WI: Soil Science Society of America. pp. 775–833.

- Vilela, L., Martha, G.B., Macedo, M.C.M., Marchão, R.L., Guimarães, R., Pulrolnik, K., Maciel, G.A., 2011. Sistemas de integração lavoura-pecuária na região do Cerrado. *Pesqui. Agropecuária Bras.* 46, 1127–1138. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011001000003>
- Vilela, L., Souza, D.M.G. de, Silva, J.E. da, 2004. Cerrado: correção do solo e adubação. *Cerrado - Correção do Solo e Adubação* 176–180.
- Vogado, R.F., Souza, H.A. de, Matias, S.S.R., Gualberto, A.V.S., Cunha, J.R. da, Leite, L.F.C., 2020. Spatial variability of carbon and nitrogen stocks in integrated management systems and pasture in a Cerrado region. *Res. Soc. Dev.* 9, e67291110220–e67291110220. <https://doi.org/10.33448/RSD-V9I11.10220>