REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/05/2026 - **Accepted:** 29/06/2026
Vol: 13.14
DOI: 10.66104/42v3y894
Pages: 1-32

QUALIDADE FÍSICA DO SOLO EM PASTAGENS SOB DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO COM E SEM IRRIGAÇÃO NO CERRADO BRASILEIRO

SOIL PHYSICAL QUALITY IN PASTURES UNDER DIFFERENT MANAGEMENT SYSTEMS WITH AND WITHOUT IRRIGATION IN THE BRAZILIAN CERRADO

CALIDAD FÍSICA DEL SUELO EN PASTIZALES BAJO DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO COM Y SIN RIEGO EN EL CERRADO BRASILEÑO

Taísa Cristina Tinoco[1], José Luiz Rodrigues Torres[1], Eusímio Felisbino Fraga Júnior[2], Fernando Antônio de Souza[3], Luiz Felipe Leite Sabino de Oliveira[1], Paulo Henrique Angote[3], Dawson José Guimarães Faria[1], André Luís Teixeira Fernandes[4]

[1]Instituto Federal do Triângulo Mineiro Campus de Uberaba, Uberaba, Minas Gerais, Brasil. E-mail: taisa.tinoco@estudante.iftm.edu.br, jlrtorres@iftm.edu.br, luis.sabino@estudante.iftm.edu.br, dawson@iftm.edu.br; [2]Universidade Federal de Uberlândia Campus de Monte Carmelo, Monte Carmelo, Minas Gerais, Brasil. E-mail: eusimiofraga@ufu.br; [3]Secretaria Municipal do Agronegócio, Uberaba, Minas Gerais, Brasil. E-mail: nandodesouza@gmail.com, paulo.angote@gmail.com; [4]Universidade de Uberaba Campus de Uberaba, Uberaba, Minas Gerais, Brasil. E-mail: andre.fernandes@uniube.br

RESUMO

Neste estudo objetivou-se avaliar a qualidade física do solo em pastagens sob diferentes sistemas de manejo, com e sem irrigação, em diferentes faixas de profundidade, no município de Uberaba, MG. O experimento foi conduzido em delineamento de blocos ao acaso, com arranjo de parcelas subdivididas, com oito sistemas de manejo no tratamento principal: capim-Zuri irrigado por gotejamento subterrâneo (ZG); Tifton 85 + Braquiária irrigado por gotejamento subterrâneo (TG); capim-Zuri irrigado por aspersão (ZA); Tifton 85 + Braquiária irrigado por aspersão (TA); capim-Zuri em sequeiro (ZS); Tifton 85 + Braquiária em sequeiro (TS); pastagem de braquiária degradada (BD); e mata nativa do Cerrado (MN), utilizada como área de referência. As avaliações foram realizadas em quatro profundidades (0,00–0,10; 0,10–0,20; 0,20–0,30 e 0,30–0,40 m), com cinco repetições. Foram avaliadas a resistência mecânica do solo à penetração (RP), a densidade do solo (Ds), a umidade volumétrica (Uv) e os atributos relacionados ao sistema poroso em Latossolo Vermelho distrófico típico do Cerrado. Os sistemas conduzidos sob gotejamento subterrâneo apresentaram menores valores de RP e Ds, maior Uv e melhor distribuição do sistema poroso em comparação aos demais sistemas avaliados. Sob

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/05/2026 - **Accepted:** 29/06/2026
Vol: 13.14
DOI: 10.66104/42v3y894
Pages: 1-32

irrigação por aspersão (ZA e TA), observaram-se condições intermediárias entre os sistemas irrigados por gotejamento e aqueles conduzidos em sequeiro. Os sistemas em sequeiro (ZS e TS) e a pastagem degradada (BD) apresentaram menores teores de água no solo e maiores valores de RP durante o período avaliado. Nas condições em que o estudo foi conduzido, os sistemas de manejo sob gotejamento subterrâneo apresentaram condições físico-hídricas mais favoráveis no momento da avaliação, enquanto os sistemas conduzidos em sequeiro e a pastagem degradada apresentaram maior restrição física, considerando a interpretação integrada da resistência à penetração, da densidade do solo, da umidade volumétrica e da distribuição do sistema poroso.

Palavras-chave: densidade do solo; irrigação localizada; pastagens tropicais; porosidade do solo; resistência à penetração.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the soil physical quality in pastures under different management systems, with and without irrigation, at different soil depths, in the municipality of Uberaba, Minas Gerais, Brazil. The experiment was conducted in a randomized complete block design with split plots, comprising eight management systems as the main treatment: Zuri grass under subsurface drip irrigation (ZG); Tifton 85 + Brachiaria under subsurface drip irrigation (TG); Zuri grass under sprinkler irrigation (ZA); Tifton 85 + Brachiaria under sprinkler irrigation (TA); rainfed Zuri grass (ZS); rainfed Tifton 85 + Brachiaria (TS); degraded Brachiaria pasture (BD); and native Cerrado vegetation (MN), used as a reference area. Evaluations were performed at four soil depths (0.00–0.10, 0.10–0.20, 0.20–0.30, and 0.30–0.40 m), with five replicates. Soil penetration resistance (PR), bulk density (BD), volumetric water content (VWC), and pore system attributes were evaluated in a dystrophic Rhodic Oxisol. Management systems under subsurface drip irrigation showed lower PR and BD values, higher VWC, and better pore system distribution than the other evaluated systems. Sprinkler-irrigated systems (ZA and TA) showed intermediate conditions between subsurface drip irrigation and rainfed systems. Rainfed systems (ZS and TS) and the degraded pasture (BD) exhibited lower soil water content and higher PR values during the evaluation period. Under the conditions of this study, management systems under subsurface drip irrigation presented more favorable soil physical quality at the time of evaluation, whereas rainfed systems and the degraded pasture showed greater physical restriction, considering the integrated interpretation of penetration resistance, bulk density, volumetric water content, and soil pore system distribution.

Keywords: soil bulk density; soil penetration resistance; soil porosity; subsurface drip irrigation; tropical pastures.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/05/2026 - **Accepted:** 29/06/2026
Vol: 13.14
DOI: 10.66104/42v3y894
Pages: 1-32

RESUMEN

Este estudio tuvo como objetivo evaluar la calidad física del suelo en pastizales bajo diferentes sistemas de manejo, con y sin riego, en diferentes profundidades del suelo, en el municipio de Uberaba, Minas Gerais, Brasil. El experimento se realizó en un diseño de bloques completos al azar con parcelas subdivididas, compuesto por ocho sistemas de manejo como tratamiento principal: pasto Zuri bajo riego por goteo subterráneo (ZG); Tifton 85 + Brachiaria bajo riego por goteo subterráneo (TG); pasto Zuri bajo riego por aspersión (ZA); Tifton 85 + Brachiaria bajo riego por aspersión (TA); pasto Zuri de secano (ZS); Tifton 85 + Brachiaria de secano (TS); pastura degradada de Brachiaria (BD); y vegetación nativa del Cerrado (MN), utilizada como área de referencia. Las evaluaciones se realizaron en cuatro profundidades del suelo (0,00–0,10; 0,10–0,20; 0,20–0,30 y 0,30–0,40 m), con cinco repeticiones. Se evaluaron la resistencia mecánica del suelo a la penetración (RP), la densidad del suelo (Ds), el contenido volumétrico de agua (Uv) y los atributos relacionados con el sistema poroso en un Latosol Rojo distrófico. Los sistemas manejados con riego por goteo subterráneo presentaron menores valores de RP y Ds, mayor contenido de agua en el suelo y mejor distribución del sistema poroso en comparación con los demás sistemas evaluados. Los sistemas bajo riego por aspersión (ZA y TA) presentaron condiciones intermedias entre los sistemas con goteo subterráneo y los de secano. Los sistemas de secano (ZS y TS) y la pastura degradada (BD) presentaron menor contenido de agua en el suelo y mayores valores de RP durante el período de evaluación. En las condiciones en que se realizó el estudio, los sistemas de manejo bajo riego por goteo subterráneo presentaron atributos físicos del suelo más favorables en el momento de la evaluación, mientras que los sistemas de secano y la pastura degradada mostraron mayor restricción física, considerando la interpretación integrada de la resistencia a la penetración, la densidad del suelo, el contenido volumétrico de agua y la distribución del sistema poroso.

Palabras clave: densidad del suelo; pasturas tropicales; porosidad del suelo; resistencia a la penetración; riego por goteo subterráneo.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/05/2026 - **Accepted:** 29/06/2026
Vol: 13.14
DOI: 10.66104/42v3y894
Pages: 1-32

INTRODUÇÃO

A pecuária brasileira ocupa aproximadamente 160 a 170 milhões de hectares de pastagens, configurando-se como o principal uso agropecuário do território nacional (MapBiomas, 2024). Estima-se que entre 50% e 60% dessas áreas apresentem algum grau de degradação, caracterizado pela perda de vigor da vegetação, redução da capacidade de suporte animal e compactação do solo (Nóbrega *et al.*, 2017; LAPIG, 2023). Nesse bioma, que ocupa cerca de 24% do território brasileiro, consolida-se como a principal fronteira agropecuária do país (MapBiomas, 2024), reforçando a necessidade de estratégias que conciliam aumento de produtividade e conservação ambiental.

A intensificação sustentável das pastagens surge como alternativa para ampliar a produção sem a incorporação de novas áreas. Entre as estratégias de intensificação, a irrigação destaca-se por reduzir a sazonalidade da oferta forrageira e aumentar a estabilidade produtiva dos sistemas pecuários. Apesar disso, sua adoção ainda é limitada frente à dimensão das áreas de pastagem no país. O Censo Agropecuário de 2017 registra cerca de 6,7 milhões de hectares irrigados (IBGE, 2018), enquanto o Atlas da Irrigação estima aproximadamente 8,2 milhões de hectares em 2019 (ANA, 2021), valores modestos diante do potencial de intensificação dos sistemas pecuários brasileiros.

No Cerrado, a intensificação produtiva depende da manutenção da qualidade física do solo, uma vez que a conversão da vegetação nativa em pastagens pode alterar atributos hidrofísicos e o funcionamento do sistema solo-planta-atmosfera (Nóbrega *et al.*, 2017). A estrutura física do solo regula processos fundamentais, como infiltração de água, armazenamento hídrico, aeração e crescimento radicular, sendo frequentemente avaliada por indicadores como densidade do solo, porosidade e resistência mecânica à penetração, sensíveis às condições de manejo (Rocha Júnior *et al.*, 2017).

A escolha das espécies forrageiras também pode influenciar esses processos por meio de diferenças em suas características morfofisiológicas e na interação com o solo, podendo alterar a sua organização estrutural. Gramíneas dos gêneros *Megathyrsus* e *Urochloa* apresentam elevado potencial de reorganização estrutural

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/05/2026 - **Accepted:** 29/06/2026
Vol: 13.14
DOI: 10.66104/42v3y894
Pages: 1-32

do solo, enquanto espécies do gênero *Cynodon* podem contribuir para a formação de macroporos e para a redução da compactação superficial. Em Latossolos do Cerrado de Uberaba (MG), atributos como densidade do solo e porosidade total mostraram elevada sensibilidade às alterações impostas por diferentes sistemas de manejo (Torres *et al.*, 2020; Policarpo *et al.*, 2023; Feng *et al.*, 2023).

Os métodos de irrigação também condicionam a redistribuição da água no perfil do solo. Sistemas por aspersão tendem a concentrar o molhamento nas camadas superficiais, podendo favorecer processos como selamento superficial e aumento da resistência mecânica à penetração. Em contraste, o gotejamento subterrâneo tende a direcionar a água diretamente à zona radicular, podendo favorecer condições mais estáveis para a estrutura física do solo (Souza; Bizari, 2018; Wang *et al.*, 2018).

Apesar da relevância desses processos, ainda são escassos estudos que comparem, de forma integrada, diferentes sistemas de manejo com e sem irrigação quanto aos atributos físicos do solo em pastagens tropicais estabelecidas em Latossolos do Cerrado, considerando conjuntamente diferentes espécies forrageiras, métodos de irrigação e áreas de referência sob distintas condições de uso do solo.

Assim, neste estudo objetivou-se avaliar a qualidade física do solo em pastagens sob diferentes sistemas de manejo, com e sem irrigação, no município de Uberaba, MG, por meio da análise integrada da resistência mecânica à penetração, densidade do solo, umidade volumétrica e atributos relacionados ao sistema poroso.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido na Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG) – Unidade Oeste, localizada no município de Uberaba, mesorregião do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba, Minas Gerais. A área experimental situa-se nas coordenadas aproximadas de 19°42’36” S e 47°56’56” W, a aproximadamente 800 m de altitude.

As avaliações foram realizadas entre abril e outubro de 2025, embora a área experimental seja acompanhada desde 2023, período correspondente à implantação

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/05/2026 - **Accepted:** 29/06/2026
Vol: 13.14
DOI: 10.66104/42v3y894
Pages: 1-32

e condução dos sistemas de manejo. As amostras destinadas às análises físicas do solo foram coletadas em 12 e 13 de agosto de 2025.

O solo das áreas experimentais foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico, de textura franco-argilo-arenosa (Santos *et al.*, 2018), apresentando, na camada de 0,00–0,20 m, teores de argila, areia e silte de 230, 670 e 100 g kg^{-1} na área cultivada, 198, 685 e 117 g kg^{-1} na área de mata nativa, e 219, 672 e 109 g kg^{-1} na área de braquiária degradada. Na camada de 0,20–0,40 m, os respectivos valores foram de 250, 640 e 110 g kg^{-1}, 213, 672 e 115 g kg^{-1}, e 232, 669 e 99 g kg^{-1}, caracterizando as três áreas, em ambas as profundidades, como pertencentes à classe textural franco-argilo-arenosa. A caracterização química inicial das áreas experimentais é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1- Caracterização química inicial do Latossolo Vermelho Distrófico das áreas experimentais, Uberaba, MG

Sistema	pH	P (Mehlich-1)	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Al^{3+}	H+Al	MO
	H_2O	mg dm^{-3}			$cmol_c$ dm^{-3}			g dm^{-3}
				0,00–0,20 m				
AC	5,70	4,80	0,22	1,60	0,70	0,10	2,60	28,49
MN	4,80	4,30	0,15	1,66	0,42	0,10	4,00	34,69
BD	5,00	8,30	0,11	1,77	0,55	-	3,10	15,40
				0,20–0,40 m				
AC	5,80	1,80	0,12	1,30	0,60	0,10	2,30	26,40
MN	4,70	2,60	0,12	1,35	0,28	0,10	4,20	32,30
BD	4,50	8,00	0,09	1,04	0,33	0,20	4,00	14,00

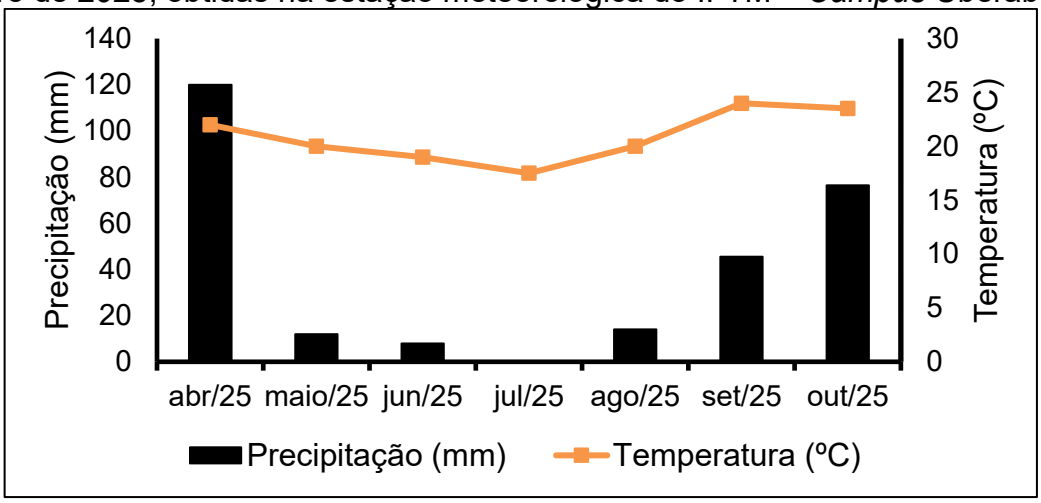
Fonte: elaborada pelos autores, 2025.
P (Mehlich-1): fósforo disponível; MO: matéria orgânica do solo; AC: área cultivada; MN: mata nativa; BD: braquiária degradada.

O clima regional é classificado como tipo Aw (tropical com inverno seco) segundo Köppen-Geiger (Beck *et al.*, 2018), caracterizado por verão chuvoso e inverno seco. A precipitação média anual é de aproximadamente 1680 mm, com temperatura média de 23 ºC e umidade relativa do ar de 68%. As condições meteorológicas observadas durante o período experimental (abril a outubro de 2025), incluindo precipitação pluvial e temperatura média, são apresentadas na Figura 1.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/05/2026 - **Accepted:** 29/06/2026
Vol: 13.14
DOI: 10.66104/42v3y894
Pages: 1-32

Figura 1- Precipitação pluvial e temperatura média do ar registradas entre abril e outubro de 2025, obtidas na estação meteorológica do IFTM – *Campus* Uberaba, MG



Fonte: elaborada pelos autores, 2025.

O experimento foi conduzido em delineamento de blocos ao acaso, em esquema de parcelas subdivididas, com cinco repetições, totalizando 40 parcelas experimentais. Os tratamentos corresponderam a oito sistemas de manejo das pastagens, constituídos por: (1) Capim-Zuri (*Megathyrsus maximus* cv. BRS Zuri) sob gotejamento subterrâneo (ZG); (2) Tifton 85 (*Cynodon* spp.) sob gotejamento subterrâneo (TG); (3) Capim-Zuri sob irrigação por aspersão (ZA); (4) Tifton 85 sob irrigação por aspersão (TA); (5) Capim-Zuri em condição de sequeiro (ZS); (6) Tifton 85 em condição de sequeiro (TS); (7) área de braquiária (*Urochloa decumbens*) implantada há mais de dez anos e em estágio de degradação (BD); e (8) área de mata nativa de Cerrado (MN). As duas últimas localizam-se em locais adjacentes ao experimento, sob as mesmas condições edafoclimáticas, e foram utilizadas como referências ecológicas para comparação dos atributos físicos do solo.

As subparcelas corresponderam às quatro profundidades de avaliação do solo (0,00–0,10; 0,10–0,20; 0,20–0,30 e 0,30–0,40 m), perfazendo 160 unidades experimentais. Os tratamentos foram constituídos por sistemas integrados, combinando espécie forrageira, condição hídrica, histórico de implantação e práticas adotadas ao longo da condução experimental.

Na implantação das áreas cultivadas, realizou-se subsolagem a 0,40 m de profundidade, com o objetivo de eliminar camadas compactadas e viabilizar a

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/05/2026 - **Accepted:** 29/06/2026
Vol: 13.14
DOI: 10.66104/42v3y894
Pages: 1-32

instalação dos sistemas de irrigação. Em seguida, efetuou-se gradagem pesada para destorroamento e, posteriormente, nivelamento com grade niveladora, visando uniformizar a superfície do terreno. A área experimental cultivada possui aproximadamente 6 ha, divididos em seis seções distintas de cerca de 1 ha cada, correspondentes aos sistemas cultivados avaliados.

O estabelecimento das pastagens ocorreu de forma escalonada entre os sistemas e as espécies. O Tifton 85 foi inicialmente implantado na área conduzida em condição de sequeiro, em 17 de abril de 2023, proporcionando a esse sistema maior tempo de estabelecimento. Posteriormente, entre janeiro e março de 2024, o Tifton 85 foi implantado nas áreas destinadas ao gotejamento subterrâneo e à aspersão. Em todos os casos, as mudas produzidas em tubetes foram alocadas em sulcos mecanicamente abertos, espaçados em 1,0 m, e distribuídas manualmente com aproximadamente 1,0 m entre plantas, seguidas de enterrio. Em razão da elevada infestação de braquiária, as áreas com Tifton 85 foram conduzidas e avaliadas como sistemas consorciados com braquiária.

A implantação do Capim-Zuri ocorreu posteriormente e de forma simultânea nos sistemas de sequeiro, aspersão e gotejamento subterrâneo, mediante semeadura a lanço com sementes previamente misturadas ao fertilizante. A adubação de estabelecimento consistiu na aplicação uniforme de 90 kg ha^{-1} de P_2O_5 em todas as áreas cultivadas, utilizando como fonte o fosfato monoamônico (MAP; 11-52-00).

As áreas cultivadas foram manejadas sob sistema de pastejo rotacionado, sendo cada tratamento subdividido em oito piquetes. Em cada sistema de manejo foram utilizados três animais (fêmeas Gir), que ingressaram nas áreas experimentais em junho de 2025, com peso corporal médio de aproximadamente 225 kg.

O manejo do pastejo foi realizado com base na altura das forrageiras, adotando-se, para o Capim-Zuri, alturas de entrada entre 75 e 80 cm e de saída entre 35 e 40 cm, enquanto para o Tifton 85 foram adotadas alturas de entrada entre 25 e 30 cm e de saída entre 10 e 15 cm. A entrada e a retirada dos animais nos piquetes foram definidas exclusivamente pelas alturas de manejo preconizadas para cada espécie forrageira, buscando padronizar a intensidade de desfolha entre os sistemas ao longo do período experimental.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/05/2026 - **Accepted:** 29/06/2026
Vol: 13.14
DOI: 10.66104/42v3y894
Pages: 1-32

Durante a condução do experimento, realizou-se adubação nitrogenada de manutenção utilizando ureia, aplicada de forma uniforme em todos os sistemas cultivados. As aplicações não foram realizadas após todos os ciclos de pastejo, sendo efetuadas aproximadamente três aplicações ao longo do período experimental. Em cada aplicação foram fornecidos 50 kg ha^{-1} de nitrogênio (N), na forma de ureia, totalizando aproximadamente 150 kg ha^{-1} de N durante o período experimental, de modo a uniformizar o manejo nutricional entre os sistemas cultivados.

A instalação dos sistemas de irrigação foi realizada em etapas distintas. Entre fevereiro e maio de 2024, implantou-se o sistema de irrigação por aspersão convencional, compreendendo a abertura de valetas, assentamento da adutora e das linhas secundárias, montagem das tubulações e instalação dos aspersores no campo.

No mesmo período, foi implantado o sistema de gotejamento subterrâneo, incluindo o enterrio das linhas gotejadoras com implemento acoplado a trator, aferição da profundidade de instalação, montagem dos chicotes de conexão e implementação do sistema de automação. Após a conclusão da instalação dos dois sistemas, foram realizados testes de funcionamento, uniformidade de aplicação e ajustes operacionais.

Nos tratamentos irrigados por aspersão, cada sistema foi subdividido em quatro setores operacionais. Em cada setor foram instalados 18 aspersores do modelo LF 2400, sendo 14 emissores de alcance total, com vazão nominal de 802 L h^{-1}, e quatro emissores setoriais, com vazão nominal de 654 L h^{-1}, posicionados nas extremidades das parcelas para adequação da área molhada. Essa configuração resultou em vazão total de 13,84 m^3 h^{-1} por setor. Os aspersores foram distribuídos em malha retangular, com espaçamento de 12 × 12 m. Considerando a área irrigada por setor (0,25 ha), a taxa média de aplicação foi de 5,54 mm h^{-1}. Para o manejo da irrigação, adotou-se eficiência de aplicação entre 70 e 80%, conforme recomendado para sistemas de aspersão convencional (Bernardo *et al.*, 2019).

Já nos tratamentos irrigados por gotejamento subterrâneo, cada sistema foi subdividido em dois setores operacionais. As linhas gotejadoras foram instaladas entre 0,25 e 0,30 m de profundidade, com espaçamento de 0,90 m entre linhas e 0,50 m entre emissores. Cada setor foi constituído por aproximadamente 5.555 m de linhas

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/05/2026 - **Accepted:** 29/06/2026
Vol: 13.14
DOI: 10.66104/42v3y894
Pages: 1-32

gotejadoras, totalizando cerca de 11.111 emissores, com vazão de projeto de 11,11 $m^3\ h^{-1}$ por setor, equivalente a aproximadamente 1,0 L h^{-1} por emissor. A taxa média de aplicação foi estimada em 2,22 mm h^{-1}. Para o manejo do sistema, adotou-se eficiência de aplicação entre 85 e 95%, conforme recomendado para sistemas de irrigação localizada (Bernardo *et al.*, 2019).

Após a implantação das pastagens e dos sistemas de irrigação, não houve tráfego mecanizado sobre as parcelas experimentais. Todas as operações de manejo, incluindo adubações de manutenção, inspeções e demais intervenções necessárias durante a condução do experimento, foram realizadas manualmente, minimizando interferências externas sobre os atributos físicos do solo avaliados.

A irrigação foi conduzida com base na evapotranspiração da cultura (ETc), estimada a partir da evapotranspiração de referência (ETo) calculada pelo método de Penman-Monteith FAO (Allen *et al.*, 1998) e ajustada pelos coeficientes de cultura (Kc) recomendados para cada estádio de desenvolvimento das forrageiras (Bernardo *et al.*, 2019). O balanço de água no solo foi atualizado diariamente, sendo a necessidade de irrigação avaliada para cada sistema e as lâminas aplicadas sempre que necessárias para atender à evapotranspiração diária da cultura.

Os dados meteorológicos utilizados na estimativa da ETo foram obtidos diariamente na estação meteorológica do IFTM – Campus Uberaba, enquanto a precipitação pluvial foi monitorada por meio de pluviômetro manual tipo São Isidro, conforme Comunello *et al.* (2022).

Para o balanço de água no solo, adotou-se a profundidade efetiva do sistema radicular (Z) de 35 cm e fator de disponibilidade de água (f) igual a 0,40. A curva de retenção de água do solo foi obtida em laboratório, a partir de amostras indeformadas coletadas antes do início das atividades de irrigação, sendo ajustada pelo modelo de Van Genuchten (1980). Na determinação da capacidade de campo (CC), o potencial matricial utilizado foi −10 kPa e no ponto de murcha permanente (PMP), o potencial de −1500 kPa, conforme Reichardt e Timm (2012).

Assim, os valores médios de capacidade de campo encontrados foram de 0,29 $cm^3\ cm^{-3}$ na camada de 0,00–0,20 m e de 0,27 $cm^3\ cm^{-3}$ na camada de 0,20–0,40 m, nos diferentes sistemas de manejo. Os valores de ponto de murcha permanente

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/05/2026 - **Accepted:** 29/06/2026
Vol: 13.14
DOI: 10.66104/42v3y894
Pages: 1-32

corresponderam a 0,097 e 0,085 $cm^3\ cm^{-3}$ para o sistema de gotejamento subterrâneo e a 0,112 e 0,102 $cm^3\ cm^{-3}$ para o sistema por aspersão, nas camadas de 0,00–0,20 e 0,20–0,40 m, respectivamente, sendo esses parâmetros utilizados na atualização diária do balanço de água no solo e na definição das lâminas de irrigação ao longo do período experimental.

Durante a condução do experimento ocorreram intercorrências operacionais que ocasionaram interrupções temporárias no funcionamento dos sistemas de irrigação. Entre maio e o início de junho de 2025, uma falha no conjunto de bombeamento interrompeu o fornecimento de água por aproximadamente duas semanas. Posteriormente, no início de julho de 2025, ambos os sistemas permaneceram inoperantes por cerca de dez dias para realização de manutenção corretiva em vazamentos identificados na rede hidráulica.

Após o restabelecimento das operações, a irrigação foi retomada seguindo o manejo originalmente previsto, baseado na reposição diária da evapotranspiração da cultura (ETc), não sendo realizada reposição do déficit hídrico acumulado durante os períodos de interrupção. Adicionalmente, não foram registrados eventos pluviométricos entre 5 e 13 de agosto de 2025, período imediatamente anterior às coletas. Dessa forma, as condições de umidade observadas durante as avaliações refletiram o histórico hídrico efetivo dos sistemas.

Amostras indeformadas foram coletadas nas profundidades avaliadas utilizando anéis metálicos com 48 mm de diâmetro e 53 mm de altura, por meio de trado tipo Uhland. Nos sistemas irrigados por gotejamento subterrâneo, as amostragens foram realizadas entre as linhas gotejadoras, buscando representar as condições médias do volume de solo explorado pelo sistema radicular. Após a saturação das amostras, aplicação das tensões e secagem em estufa a 105 °C, determinaram-se a densidade do solo (Ds), a macroporosidade (Ma), a microporosidade (Mi) e a porosidade total (PT), conforme metodologia descrita por Teixeira *et al.* (2017). A relação entre macroporosidade e porosidade total (Ma/PT) foi obtida conforme Taylor e Ashcroft (1972).

A resistência mecânica do solo à penetração (RP) foi determinada utilizando penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar. Os valores obtidos em número de

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/05/2026 - **Accepted:** 29/06/2026
Vol: 13.14
DOI: 10.66104/42v3y894
Pages: 1-32

impactos foram convertidos em resistência à penetração conforme metodologia proposta por Stolf (1991), posteriormente expressos em kgf cm^{-2} segundo Sene *et al.* (1985) e convertidos para MPa conforme Arshad *et al.* (1996). A umidade gravimétrica (Ug) foi obtida em amostras deformadas pela relação entre a massa de água e a massa de solo seco após secagem em estufa a 105 °C, e a umidade volumétrica (Uv) foi estimada pelo produto entre a umidade gravimétrica e a densidade do solo (Uv = Ug × Ds), conforme Teixeira *et al.* (2017).

Os dados foram submetidos aos testes de normalidade de Lilliefors e de homogeneidade das variâncias pelos testes de Cochran e Bartlett. Atendidas as pressuposições, realizou-se a análise de variância (ANOVA) para o delineamento em blocos ao acaso, em esquema de parcelas subdivididas, considerando os sistemas de manejo como parcelas principais e as profundidades de avaliação como subparcelas. Quando verificado efeito significativo pelo teste F ($p \leq 0,05$), as médias foram comparadas pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade, utilizando o software AgroEstat® (Barbosa & Maldonado, 2015).

As relações entre os atributos físicos do solo foram avaliadas por meio da matriz de correlação de Pearson, considerando-se significativas as correlações com $p \leq 0,05$. Complementarmente, foi realizada a Análise de Componentes Principais (PCA) com o objetivo de reduzir a dimensionalidade dos dados e identificar padrões de associação entre os atributos físicos do solo e os sistemas avaliados, utilizando o software R (R Core Team, 2025).

Cada combinação entre sistema de manejo e profundidade de avaliação foi representada pela média das cinco repetições. A PCA foi conduzida utilizando as variáveis Ds, RP, Uv, Ma, Mi, PT e Ma/PT. Os fatores sistema de manejo e profundidade foram inseridos como variáveis qualitativas para auxiliar a interpretação gráfica.

As variáveis quantitativas foram previamente padronizadas pelo método z-score, conforme Kassambara (2017). A matriz de correlação de Pearson foi gerada a partir dos dados normalizados para avaliar a associação entre as variáveis quantitativas e auxiliar na interpretação da PCA.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/05/2026 - **Accepted:** 29/06/2026
Vol: 13.14
DOI: 10.66104/42v3y894
Pages: 1-32

RESULTADOS E DISCUSSÃO

De modo geral, os atributos físicos avaliados apresentaram respostas contrastantes entre os sistemas de manejo e ao longo do perfil (Tabela 2). A resistência mecânica à penetração (RP) e a umidade volumétrica (Uv) foram os atributos mais sensíveis, com valores de RP entre 1,32 e 2,56 MPa e de Uv entre 0,03 e 0,16 $cm^3\ cm^{-3}$, enquanto a densidade do solo (Ds) apresentou menor variação (1,36 e 1,50 $kg\ dm^{-3}$), sugerindo que as diferenças observadas entre os sistemas de manejo podem estar relacionadas à dinâmica hídrica e à distribuição da água no perfil do solo (Torres *et al.*, 2020).

A RP apresentou efeito significativo entre os sistemas de manejo e as profundidades avaliadas, indicando respostas distintas do solo às condições estabelecidas em cada sistema. Os valores médios oscilaram de 1,32 a 2,56 MPa, abrangendo desde condições de menor impedância mecânica até situações potencialmente restritivas. Essa amplitude reforça a sensibilidade da RP como indicador da condição físico-hídrica do solo em ambientes tropicais com elevada variabilidade hídrica (Martins *et al.*, 2025).

Tabela 2- Valores médios de resistência mecânica do solo à penetração (RP), densidade do solo (Ds) e umidade volumétrica (Uv), em pastagens sob diferentes sistemas de irrigação, em Uberaba, MG, 2025

	Atributos físicos		
Tratamento	RP	Ds	Uv
	MPa	$kg\ dm^{-3}$	$cm^3\ cm^{-3}$
		Sistema de manejo	
ZG	1,49 c	1,46 b	0,16 a
TG	1,32 c	1,42 b	0,15 b
ZA	2,14 b	1,50 a	0,14 c
TA	2,02 b	1,49 a	0,11 d
ZS	2,18 b	1,49 a	0,06 e
TS	1,60 c	1,36 b	0,07 e
BD	2,56 a	1,48 a	0,03 f
MN	1,67 c	1,42 b	0,07 e
m		Profundidade	
0,00–0,10	1,72 b	1,46 a	0,08 c
0,10–0,20	1,78 b	1,46 a	0,10 b
0,20–0,30	2,05 a	1,45 a	0,10 b

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/05/2026 - **Accepted:** 29/06/2026
Vol: 13.14
DOI: 10.66104/42v3y894
Pages: 1-32

0,30–0,40	2,06 a	1,44 a	0,11 a
Teste F SM	15,86**	3,13**	153,91**
Teste F P	59,29**	0,40^{ns}	10,26**
Teste F SM×P	1,56^{ns}	0,65^{ns}	10,36**
CV (%) SM	24,82	9,39	17,56
CV (%) P	12,81	6,75	17,63

Fonte: elaborada pelos autores, 2025.
Nota: ZA: Capim-Zuri irrigado com aspersão; TA: Tifton 85 + Braquiária irrigado com aspersão; ZG: Capim-Zuri irrigado com gotejo subterrâneo; TG: Tifton 85 + Braquiária irrigado com gotejo subterrâneo; ZS: Capim-Zuri em sequeiro; TS: Tifton 85 + Braquiária em sequeiro; BD: Braquiária em degradação; MN: Mata nativa. ^{ns} = Não significativo; ** = Significativo a 1% de probabilidade ($p < 0,01$), pelo teste F; Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$). CV = Coeficiente de variação; SM = Sistema de manejo; P = Profundidade.

A maior RP foi observada no solo sob Braquiária em degradação (BD) (2,56 MPa), diferindo estatisticamente dos demais sistemas. Os solos sob Capim-Zuri em sequeiro (ZS) (2,18 MPa) e irrigado por aspersão (ZA) (2,14 MPa) também apresentaram valores superiores aos verificados nas áreas irrigadas por gotejamento subterrâneo. As menores médias foram registradas no solo sob Tifton 85 + Braquiária irrigado por gotejamento subterrâneo (TG) (1,32 MPa) e sob Capim-Zuri irrigado pelo mesmo sistema (ZG) (1,49 MPa), sem diferença estatística entre si.

Essas diferenças devem ser interpretadas considerando a condição hídrica do solo no momento da avaliação. Reduções na Uv aumentam a coesão entre partículas e elevam a força necessária para o avanço do penetrômetro (Torres et al., 2020). No presente estudo, a CC foi estimada em 0,29 $cm^3\ cm^{-3}$ na camada de 0–20 cm e 0,27 $cm^3\ cm^{-3}$ na camada de 20–40 cm, enquanto a Uv variou de 0,02 a 0,20 $cm^3\ cm^{-3}$, indicando que as avaliações foram realizadas abaixo dessa condição.

Assim, os valores de RP devem ser interpretados como expressão da condição físico-hídrica do solo no momento da coleta, e não como evidência isolada de alteração estrutural permanente. Na literatura, valores de RP superiores a 2,0 MPa são frequentemente associados a maior impedância mecânica ao crescimento radicular, sobretudo quando associados à baixa disponibilidade hídrica (Taylor; Ashcroft, 1972).

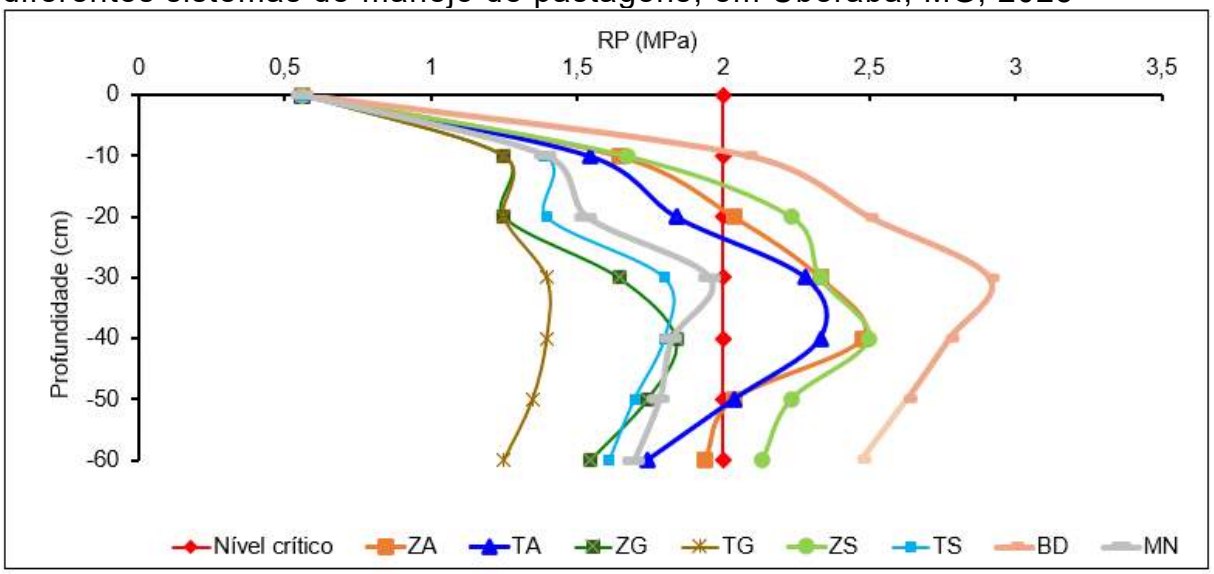
Embora a Tabela 2 apresente os valores médios de RP por sistema de manejo e profundidade, a distribuição desse atributo ao longo do perfil do solo permite compreender melhor seu comportamento nas diferentes camadas. Essa variação

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/05/2026 - **Accepted:** 29/06/2026
Vol: 13.14
DOI: 10.66104/42v3y894
Pages: 1-32

pode ser observada na Figura 2, que evidencia a evolução da RP em profundidade para cada sistema avaliado.

Figura 2- Perfil da resistência mecânica do solo à penetração (RP), em diferentes sistemas de manejo de pastagens, em Uberaba, MG, 2025



Fonte: elaborada pelos autores, 2025.
Nota: ZA: Capim-Zuri irrigado com aspersão; TA: Tifton 85 + Braquiária irrigado com aspersão; ZG: Capim-Zuri irrigado com gotejo subterrâneo; Tifton 85 + Braquiária irrigado com gotejo subterrâneo (TG); ZS: Capim-Zuri em sequeiro; TS: Tifton 85 + Braquiária em sequeiro; BD: Braquiária em degradação; MN: Mata nativa.

Observou-se aumento gradual da RP a partir da camada de 0,20 m na maioria dos sistemas de manejo, enquanto nas camadas superficiais (0,00–0,20 m) os valores permaneceram, em sua maioria, inferiores a 2,0 MPa. Em profundidade, os maiores valores concentraram-se principalmente nos sistemas ZA, ZS e BD, ao passo que ZG e TG apresentaram menor variação da RP ao longo do perfil, indicando comportamento mais uniforme desse atributo entre as camadas avaliadas.

Os sistemas sob gotejamento subterrâneo apresentaram menores valores de RP ao longo do perfil quando comparados aos sistemas sob aspersão e, principalmente, aos sistemas em sequeiro. Esse comportamento é consistente com os maiores teores de umidade volumétrica observados nesses tratamentos (Tabela 2), evidenciando a estreita relação entre a resistência à penetração e a condição hídrica do solo no momento da avaliação (Benevenute et al., 2020; Wang et al., 2020; Yang et al., 2023).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/05/2026 - **Accepted:** 29/06/2026
Vol: 13.14
DOI: 10.66104/42v3y894
Pages: 1-32

O solo sob Braquiária em degradação (BD) apresentou os maiores valores de RP ao longo de praticamente todo o perfil, enquanto a mata nativa (MN) apresentou menor variação da RP entre as camadas avaliadas. Esses resultados refletem condições distintas de uso e manejo do solo e corroboram estudos que relatam diferenças na qualidade física entre áreas antropizadas e ecossistemas naturais do Cerrado (Rocha Júnior et al., 2017; Pereira et al., 2018; Martins et al., 2025).

A Ds apresentou efeito significativo entre os sistemas de manejo, sem influência das profundidades avaliadas e da interação entre esses fatores, indicando que as diferenças observadas estiveram associadas aos sistemas avaliados. Os valores médios variaram de 1,36 a 1,50 kg dm^{-3}, faixa compatível com Latossolos de textura média sob uso agropecuário no Cerrado, nos quais a Ds tende a apresentar reduzida variação entre as camadas avaliadas em razão da estabilidade estrutural característica desses solos (Torres et al., 2020; Gubiani et al., 2024).

Os maiores valores de Ds foram observados nos sistemas sob aspersão e na área de Braquiária em degradação (BD), enquanto o menor valor foi registrado no sistema Tifton 85 + Braquiária em sequeiro (TS). Essas diferenças devem ser interpretadas considerando o histórico de implantação e manejo dos sistemas, uma vez que o TS foi estabelecido anteriormente aos demais tratamentos cultivados. Adicionalmente, o preparo inicial das áreas, com subsolagem seguida de gradagens antes da implantação das pastagens, pode ter contribuído para a uniformidade da Ds ao longo do perfil avaliado.

A ausência de efeito significativo da profundidade e da interação entre sistemas de manejo e profundidades demonstra que a Ds permaneceu estável nas quatro camadas avaliadas, independentemente do sistema de manejo. Esse comportamento indica que as diferenças observadas ocorreram entre os sistemas, e não entre as profundidades analisadas (Valani et al., 2025).

Embora tenham sido observadas diferenças estatísticas entre os sistemas de manejo, todos os valores permaneceram abaixo da faixa crítica de 1,55–1,65 kg dm^{-3} proposta para Latossolos de textura média (Reichert et al., 2009; Benevenute et al., 2020). Dessa forma, a Ds não indicou condição limitante ao crescimento radicular durante o período avaliado, reforçando que as diferenças entre os sistemas foram

REMUNOM
ISSN 2178-6925

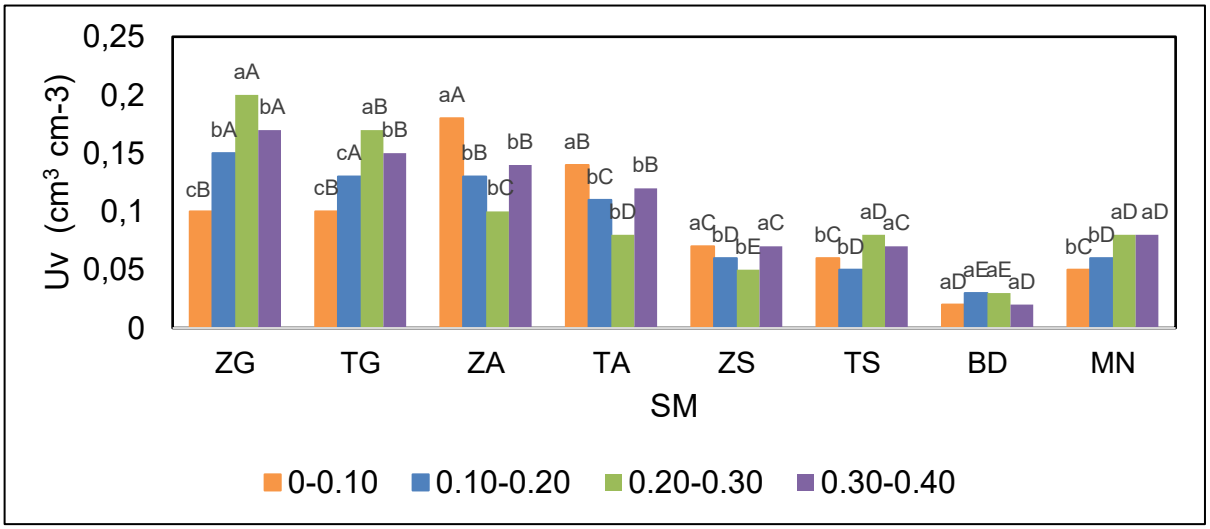
Received: 07/05/2026 - **Accepted:** 29/06/2026
Vol: 13.14
DOI: 10.66104/42v3y894
Pages: 1-32

mais bem evidenciadas por atributos sensíveis à dinâmica físico-hídrica do solo, como a resistência à penetração e a umidade volumétrica (Torres et al., 2020; Gubiani et al., 2024).

A Uv apresentou efeito significativo dos sistemas de manejo, das profundidades e da interação entre esses fatores, evidenciando elevada sensibilidade da dinâmica hídrica às condições dos sistemas avaliados. Os valores médios variaram de 0,03 a 0,16 cm^3 cm^{-3}, demonstrando ampla variação entre os tratamentos. Esse comportamento é esperado em Latossolos submetidos a diferentes estratégias de manejo da água, nos quais o conteúdo de água no solo é influenciado pela forma de aplicação da irrigação e pelas características de cada sistema de manejo (Silva Júnior et al., 2016; Stone et al., 2025).

Os maiores valores médios de Uv foram observados nos sistemas sob gotejamento subterrâneo (ZG e TG), diferindo dos sistemas em sequeiro (ZS e TS) e da área de Braquiária em degradação (BD), que apresentaram os menores teores de água no solo. Os sistemas sob aspersão (ZA e TA) apresentaram comportamento intermediário. Entretanto, as médias apresentadas na Tabela 2 não evidenciam a distribuição da umidade ao longo do perfil do solo, cuja variação é apresentada na Figura 3.

Figura 3- Desdobramento da interação entre sistema de manejo e profundidade do solo para umidade volumétrica (Uv), em pastagens sob diferentes sistemas de manejo, em Uberaba, MG, 2025



Fonte: elaborada pelos autores, 2025.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/05/2026 - **Accepted:** 29/06/2026
Vol: 13.14
DOI: 10.66104/42v3y894
Pages: 1-32

Nota: SM: Sistema de manejo; ZA: Capim-Zuri irrigado com aspersão; TA: Tifton 85 + Braquiária irrigado com aspersão; ZG: Capim-Zuri irrigado com gotejo subterrâneo; TG: Tifton 85 + Braquiária irrigado com gotejo subterrâneo; ZS: Capim-Zuri em sequeiro; TS: Tifton 85 + Braquiária em sequeiro; BD: Braquiária em degradação; MN: Mata nativa. Letras minúsculas comparam profundidades dentro de cada sistema de manejo; letras maiúsculas comparam os sistemas de manejo dentro de cada profundidade, pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

A Figura 3 evidencia que a distribuição da Uv ao longo do perfil variou entre os sistemas de manejo. Nos sistemas sob gotejamento subterrâneo (ZG e TG), os maiores valores foram registrados entre 0,20 e 0,30 m, correspondendo à camada em que se encontram instaladas as linhas gotejadoras. Esse comportamento é consistente com a aplicação localizada da água nessa camada, resultando em maior armazenamento hídrico em subsuperfície (Melo, 2018; Jabro et al., 2024).

Nos sistemas sob aspersão (ZA e TA), os maiores teores de água concentraram-se nas camadas superficiais, com redução da Uv em profundidade. Em contraste, os sistemas em sequeiro (ZS e TS) e a área de Braquiária em degradação (BD) apresentaram baixos valores de Uv em praticamente todo o perfil, enquanto a mata nativa (MN) apresentou comportamento intermediário e distribuição mais uniforme entre as camadas. Esses resultados refletem padrões distintos de armazenamento e distribuição da água entre os sistemas de manejo avaliados (Rocha Júnior et al., 2017; Pereira et al., 2018; Rego et al., 2023; Stone et al., 2025).

Os atributos relacionados à porosidade do solo apresentaram efeito significativo entre os sistemas de manejo, sem influência das profundidades avaliadas e da interação entre esses fatores (Tabela 3). A microporosidade (Mi), a macroporosidade (Ma), a porosidade total (PT) e a relação Ma/PT responderam de forma distinta aos sistemas avaliados, evidenciando alterações na distribuição do sistema poroso. A ausência de efeito da profundidade indica comportamento semelhante desses atributos nas camadas de 0,00–0,40 m, padrão frequentemente observado em Latossolos altamente intemperizados (Torres et al., 2020; Cherubin et al., 2017).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/05/2026 - **Accepted:** 29/06/2026
Vol: 13.14
DOI: 10.66104/42v3y894
Pages: 1-32

Tabela 3- Valores médios de microporosidade (Mi), macroporosidade (Ma), porosidade total (PT) e relação Ma/PT, em pastagens sob diferentes sistemas de manejo, em Uberaba, MG, 2025

Tratamento	Porosidade do solo			
	Mi	Ma	PT	Ma/PT
	..... $dm^3\ dm^{-3}$			
	Sistema de manejo			
ZG	34,34 a	20,27 b	53,36 a	0,38 b
TG	35,33 a	21,25 b	55,97 a	0,38 b
ZA	30,97 b	23,69 a	52,02 b	0,46 a
TA	30,78 b	20,64 b	50,54 b	0,41 a
ZS	32,89 a	18,99 b	51,36 b	0,37 b
TS	31,99 a	23,76 a	55,75 a	0,43 a
BD	27,81 b	19,78 b	47,09 c	0,41 a
MN	33,20 a	19,20 b	51,88 b	0,36 b
m	Profundidade			
0,00–0,10	32,70 a	20,21 a	52,72 a	0,39 a
0,10–0,20	33,08 a	20,55 a	52,07 a	0,39 a
0,20–0,30	31,04 a	21,09 a	51,22 a	0,42 a
0,30–0,40	31,83 a	21,28 a	52,97 a	0,40 a
Teste F SM	3,90**	2,94*	4,61**	3,43**
Teste F P	$1,81^{ns}$	$1,32^{ns}$	$1,24^{ns}$	$1,75^{ns}$
Teste F P×SM	$1,47^{ns}$	$1,20^{ns}$	$0,71^{ns}$	$1,12^{ns}$
CV (%) SM	16,54	24,85	11,46	19,29
CV (%) P	13,34	16,79	8,48	16,98

Fonte: elaborada pelos autores, 2025.
Nota: ZA: Capim-Zuri irrigado com aspersão; TA: Tifton 85 + Braquiária irrigado com aspersão; ZG: Capim-Zuri irrigado com gotejo subterrâneo; TG: Tifton 85 + Braquiária irrigado com gotejo subterrâneo; ZS: Capim-Zuri em sequeiro; TS: Tifton 85 + Braquiária em sequeiro; BD: Braquiária em degradação; MN: Mata nativa. ^{ns} = Não significativo; * = Significativo a 5% de probabilidade ($p < 0,05$), pelo teste F; ** = Significativo a 1% de probabilidade ($p < 0,01$), pelo teste F; Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$). CV = Coeficiente de variação; SM = Sistema de manejo; P = Profundidade.

A Mi variou de 27,81 a 35,33 $dm^3\ dm^{-3}$, com maiores valores observados nos sistemas de manejo ZG (34,34 $dm^3\ dm^{-3}$) e TG (35,33 $dm^3\ dm^{-3}$), diferindo estatisticamente de ZA, TA e da área de Braquiária em degradação (BD), que apresentaram as menores médias (Tabela 3). Entre os sistemas avaliados, os maiores valores de Mi estiveram associados à maior proporção de poros responsáveis pela retenção de água no solo, condição compatível com os elevados valores de PT observados nesses mesmos tratamentos. Estudos recentes demonstram que sistemas submetidos a condições físicas mais favoráveis tendem a apresentar

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/05/2026 - **Accepted:** 29/06/2026
Vol: 13.14
DOI: 10.66104/42v3y894
Pages: 1-32

maiores valores de Mi, favorecendo a retenção de água e a qualidade física do solo (Benevenute et al., 2020; Grandinetti et al., 2022; Gubiani et al., 2024).

Entre os sistemas de manejo avaliados, a área de Braquiária em degradação apresentou a menor Mi (27,81 $dm^3\ dm^{-3}$), indicando menor proporção de poros responsáveis pela retenção de água. Esse comportamento tem sido frequentemente associado à redução da qualidade física do solo quando comparado a sistemas de manejo e áreas sob vegetação nativa que preservam melhor a distribuição do sistema poroso (Cherubin et al., 2017; Rocha Júnior et al., 2017).

A Ma apresentou valores entre 18,99 e 23,76 $dm^3\ dm^{-3}$, com maiores médias registradas nos sistemas ZA (23,69 $dm^3\ dm^{-3}$) e TS (23,76 $dm^3\ dm^{-3}$). Entretanto, a interpretação desse atributo deve ser realizada em conjunto com a Mi, a PT e a relação Ma/PT. Os contrastes observados entre ZA e TS evidenciam essa necessidade: enquanto no ZA a maior Ma esteve associada à menor Mi e ao maior valor da relação Ma/PT, no TS a elevada macroporosidade ocorreu simultaneamente a elevados valores de Mi e PT. Esses resultados indicam que valores semelhantes de Ma podem representar condições físicas distintas, dependendo da distribuição dos demais componentes da porosidade, não sendo esse atributo suficiente para caracterizar, isoladamente, a qualidade física do solo (Reynolds et al., 2009; Rabot et al., 2018; Gubiani et al., 2024).

A PT variou de 47,09 a 55,97 $dm^3\ dm^{-3}$, com os maiores valores observados nos sistemas TG (55,97 $dm^3\ dm^{-3}$) e TS (55,75 $dm^3\ dm^{-3}$), diferindo estatisticamente da área de Braquiária em degradação, que apresentou a menor média (47,09 $dm^3\ dm^{-3}$). A maior PT observada nesses sistemas foi compatível com os elevados valores de Mi, enquanto a menor PT em BD esteve associada à redução do volume total de poros. Resultados semelhantes foram descritos por Cherubin et al. (2017), Grandinetti et al. (2022) e Cuo et al. (2025), que associam menores valores de PT à degradação da qualidade física do solo.

Embora a relação Ma/PT tenha variado de 0,36 a 0,46 entre os sistemas avaliados, sua interpretação deve considerar simultaneamente os valores de Mi, Ma e PT, bem como o comportamento dos demais atributos físicos discutidos anteriormente. Assim, sistemas com relações Ma/PT semelhantes podem apresentar

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/05/2026 - **Accepted:** 29/06/2026
Vol: 13.14
DOI: 10.66104/42v3y894
Pages: 1-32

condições físicas distintas, conforme observado em ZA, TS e BD. Em conjunto, os resultados evidenciam que as diferenças entre os sistemas de manejo estão relacionadas à distribuição dos diferentes componentes da porosidade, reforçando a necessidade de interpretação integrada desses atributos, em vez da análise isolada de um único indicador (Rabot et al., 2018; Gubiani et al., 2024).

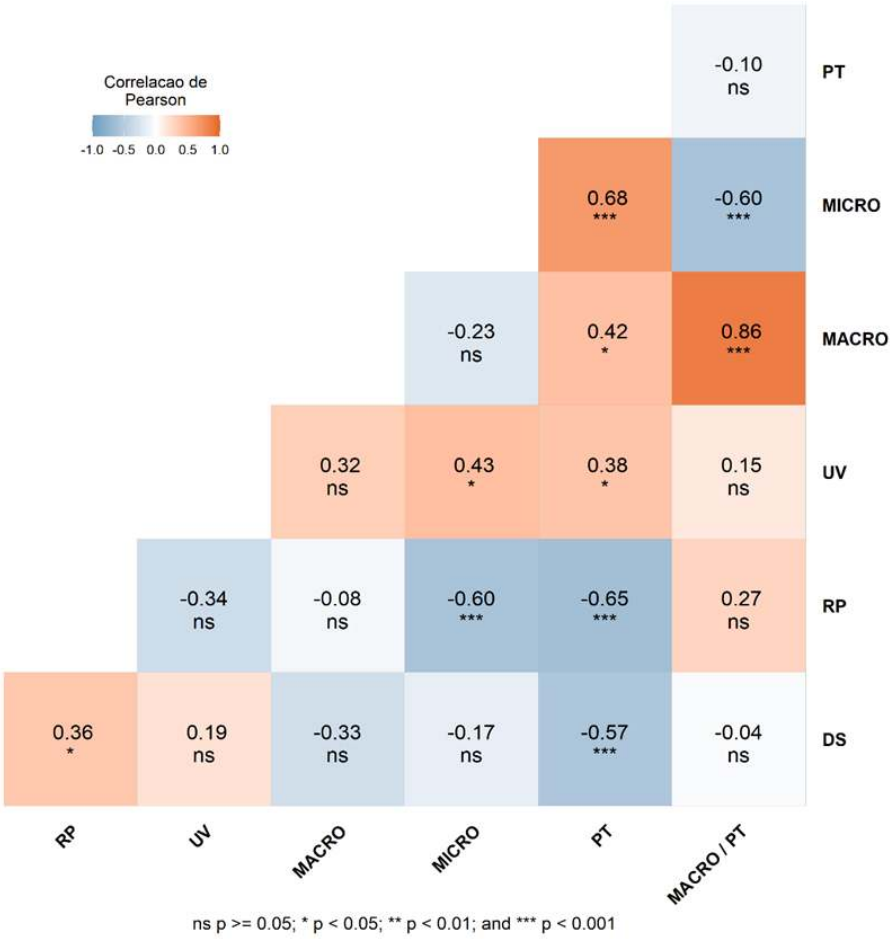
A matriz de correlação de Pearson (Figura 4) sintetiza as relações entre os atributos físicos do solo, evidenciando que sua interpretação deve ser realizada de forma integrada. A porosidade total apresentou correlação positiva com a Mi (r = 0,68), a Ma e a Uv, enquanto se correlacionou negativamente com a RP e a Ds. Esses resultados indicam que sistemas de manejo com maior volume de poros e maior retenção de água tendem a apresentar melhores condições físicas do solo, corroborando resultados observados em Latossolos manejados sob diferentes usos (Cherubin et al., 2017; Benevenute et al., 2020).

A associação negativa entre a RP e a Mi reforça que esse atributo deve ser interpretado em conjunto com a distribuição do sistema poroso e com a umidade do solo, e não de forma isolada. Por outro lado, a ausência de correlação significativa entre RP e Ma demonstra que esse atributo, isoladamente, não explica as diferenças observadas entre os sistemas de manejo, reforçando a necessidade de avaliação conjunta dos indicadores físicos para caracterizar a qualidade estrutural do solo (Rabot et al., 2018; Gubiani et al., 2024).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/05/2026 - **Accepted:** 29/06/2026
Vol: 13.14
DOI: 10.66104/42v3y894
Pages: 1-32

Figura 4- Matriz de correlação de Pearson entre atributos físicos do solo em pastagens sob diferentes sistemas de manejo, Uberaba, MG, 2025



Fonte: elaborada pelos autores, 2025.
Nota: RP = resistência à penetração; Ds = densidade do solo; Uv = umidade volumétrica; Macro = macroporosidade; Micro = microporosidade; PT = porosidade total; Macro/PT = relação entre macroporosidade e porosidade total. Valores positivos indicam associação direta entre os atributos, enquanto valores negativos indicam relação inversa. Coeficientes de correlação de Pearson calculados utilizando os dados padronizados dos atributos físicos do solo.

Considerando que os atributos físicos do solo apresentaram relações significativas entre si (Figura 4), realizou-se a Análise de Componentes Principais (PCA) para sintetizar essas associações e identificar os padrões. Os três primeiros componentes principais, selecionados pelo critério de Kaiser, explicaram aproximadamente 90% da variabilidade total dos dados, indicando adequada representação da estrutura multivariada. A contribuição de cada atributo físico para a formação desses componentes é apresentada na Tabela 4.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/05/2026 - **Accepted:** 29/06/2026
Vol: 13.14
DOI: 10.66104/42v3y894
Pages: 1-32

Tabela 4- Contribuição percentual das variáveis físicas do solo para os três primeiros componentes principais (PCA)

Variável	Componente 1	Componente 2	Componente 3
Ds	8,530	4,436	45,689
RP	24,583	0,059	0,037
Uv	8,290	2,992	49,663
Ma	0,860	43,533	0,055
Mi	25,100	7,015	2,418
PT	28,960	2,924	1,099
Ma/PT	3,674	39,037	1,035

Fonte: elaborada pelos autores, 2025.
Nota: RP = resistência à penetração; Ds = densidade do solo; Uv = umidade volumétrica; Ma = macroporosidade; Mi = microporosidade; PT = porosidade total; Ma/PT = relação entre macroporosidade e porosidade total.

O primeiro componente principal (Dim1), responsável pela maior parcela da variabilidade dos dados, foi influenciado principalmente pela PT (28,96%), Mi (25,10%) e RP (24,58%), indicando que a maior parte da variabilidade explicada pelo primeiro componente esteve associada à PT, Mi e RP do solo (Tabela 4). Esse resultado confirma as associações observadas na matriz de correlação (Figura 4) (Rabot et al., 2018; Gubiani et al., 2020).

O segundo componente principal (Dim2) foi determinado principalmente pela Ma (43,53%) e pela relação Ma/PT (39,04%), indicando que esses atributos contribuíram de forma complementar para a diferenciação dos sistemas de manejo. Já o terceiro componente principal (Dim3) foi influenciado predominantemente pela Uv (49,66%) e pela Ds (45,69%), evidenciando a contribuição conjunta dessas variáveis para a organização multivariada dos dados.

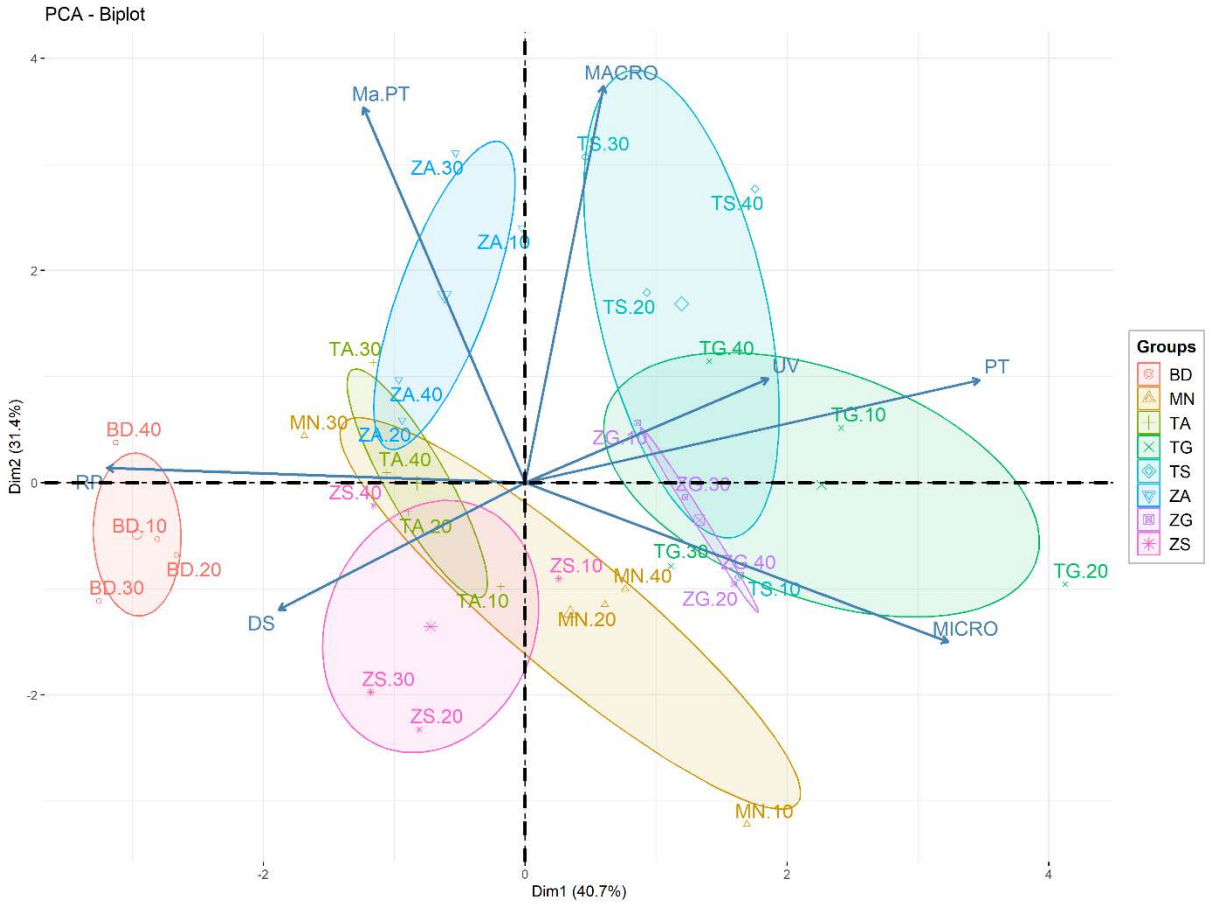
A Figura 5 evidencia o agrupamento dos sistemas de manejo de acordo com a similaridade de seus atributos físicos. O Dim1, influenciado principalmente por PT, Mi e RP (Tabela 4), foi o principal responsável pela separação dos tratamentos, enquanto o Dim2 refletiu predominantemente a contribuição da Ma e da relação Ma/PT.

Os sistemas sob gotejamento subterrâneo (ZG e TG) apresentaram maior associação com os vetores relacionados à PT, Mi e Uv. Destacaram-se as observações TG.20 e TG.40, mais próximas dos vetores associados à PT e à Mi, enquanto ZG.20 apresentou maior associação com a Uv. Esses padrões reforçam as diferenças observadas nas análises univariadas.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/05/2026 - **Accepted:** 29/06/2026
Vol: 13.14
DOI: 10.66104/42v3y894
Pages: 1-32

Figura 5- Biplot da análise de componentes principais (PCA) dos atributos físicos do solo em pastagens sob diferentes sistemas de manejo, considerando os componentes 1 e 2, Uberaba, MG, 2025



Fonte: elaborada pelos autores, 2025.
Nota: ZA: Capim-Zuri irrigado com aspersão; TA: Tifton 85 + Braquiária irrigado com aspersão; ZG: Capim-Zuri irrigado com gotejo subterrâneo; TG: Tifton 85 + Braquiária irrigado com gotejo subterrâneo; ZS: Capim-Zuri em sequeiro; TS: Tifton 85 + Braquiária em sequeiro; BD: Braquiária em degradação; MN: Mata nativa. RP = resistência à penetração; Ds = densidade do solo; Uv = umidade volumétrica; Macro = macroporosidade; Micro = microporosidade; PT = porosidade total; Macro/PT = relação entre macroporosidade e porosidade total.Os vetores indicam a direção e a magnitude da contribuição de cada variável. Os componentes 1 e 2 explicam conjuntamente 72% da variância total dos dados.

Em contraste, a área de Braquiária em degradação (BD) posicionou-se em sentido oposto aos vetores da PT e da Mi, corroborando os menores valores desses atributos observados nas Tabelas 2 e 3.

Os sistemas conduzidos sob aspersão (ZA e TA), bem como aqueles em condição de sequeiro (ZS e TS), ocuparam posições intermediárias no plano

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/05/2026 - **Accepted:** 29/06/2026
Vol: 13.14
DOI: 10.66104/42v3y894
Pages: 1-32

bidimensional, indicando condição física intermediária entre os sistemas sob gotejamento subterrâneo e a área de BD (Rabot et al., 2018).

Embora os Componentes 1 e 2 expliquem a maior parte da variabilidade dos dados, a inclusão do Componente 3 incorpora a contribuição da Uv e da Ds (Tabela 4), complementando a interpretação dos sistemas de manejo.

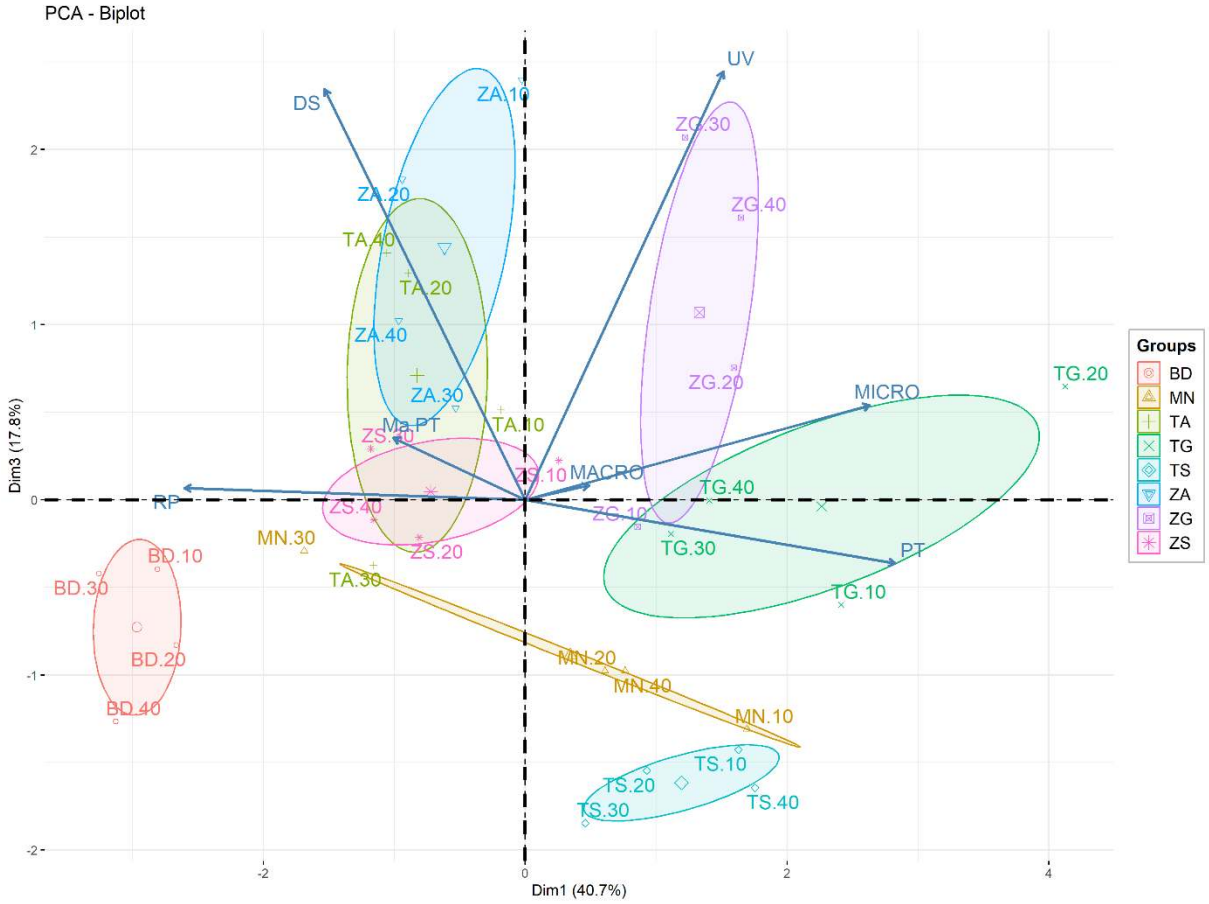
A Figura 6 demonstra a distribuição dos sistemas de manejo no plano formado pelos Componentes 1 e 3, evidenciando maior diferenciação entre os tratamentos em função principalmente da Uv e da Ds. Destaca-se a maior proximidade de ZG.20 com o vetor da Uv, enquanto TG.20 e TG.40 permaneceram associados aos vetores da PT e da Mi. Em contraste, ZA apresentou maior associação com o vetor da Ds, ao passo que TA ocupou posição intermediária no plano multivariado.

A área de Braquiária em degradação permaneceu isolada e próxima ao vetor da RP, corroborando os maiores valores de RP observados nas análises univariadas. Os sistemas conduzidos em sequeiro apresentaram distribuição intermediária entre os grupos (Rabot et al., 2018).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/05/2026 - **Accepted:** 29/06/2026
Vol: 13.14
DOI: 10.66104/42v3y894
Pages: 1-32

Figura 6- Biplot da análise de componentes principais (PCA) considerando os componentes 1 e 3 dos atributos físicos do solo em pastagens sob diferentes sistemas de manejo, Uberaba, MG, 2025



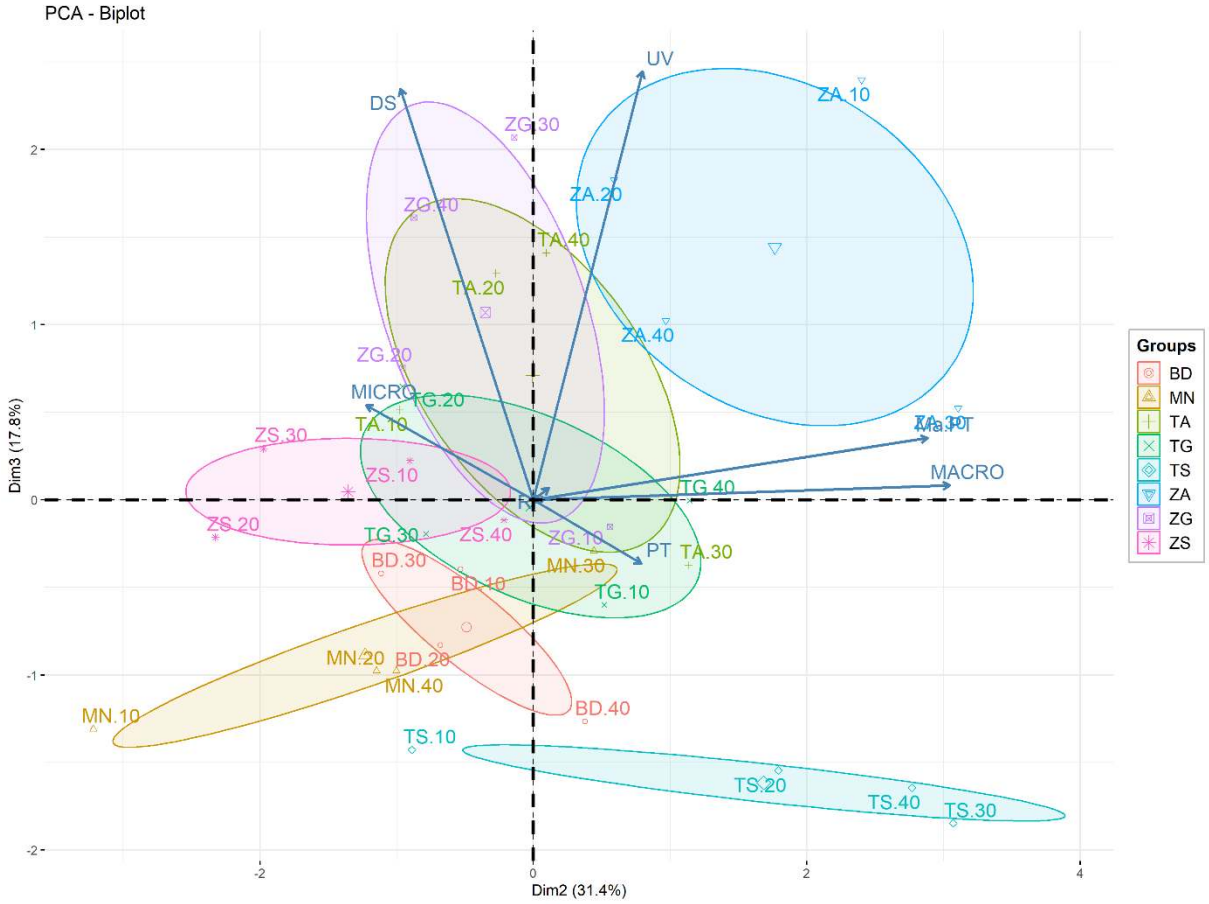
Fonte: elaborada pelos autores, 2025.
Nota: ZA: Capim-Zuri irrigado com aspersão; TA: Tifton 85 + Braquiária irrigado com aspersão; ZG: Capim-Zuri irrigado com gotejo subterrâneo; TG: Tifton 85 + Braquiária irrigado com gotejo subterrâneo; ZS: Capim-Zuri em sequeiro; TS: Tifton 85 + Braquiária em sequeiro; BD: Braquiária em degradação; MN: Mata nativa. RP = resistência à penetração; Ds = densidade do solo; Uv = umidade volumétrica; Macro = macroporosidade; Micro = microporosidade; PT = porosidade total; Macro/PT = relação entre macroporosidade e porosidade total. Os vetores indicam a direção e a magnitude da contribuição de cada variável. Os componentes 1 e 3 explicam conjuntamente 48% da variância total dos dados.

A projeção dos sistemas de manejo no plano formado pelos Componentes Principais 2 e 3 é apresentada na Figura 7. Como esse plano reúne os componentes responsáveis principalmente pela distribuição da Ma, da relação Ma/PT, da Uv e da Ds, sua interpretação complementa os resultados obtidos nos planos anteriores.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/05/2026 - **Accepted:** 29/06/2026
Vol: 13.14
DOI: 10.66104/42v3y894
Pages: 1-32

Figura 7- Biplot da análise de componentes principais (PCA) considerando os componentes 2 e 3 dos atributos físicos do solo em pastagens sob diferentes sistemas de manejo no Cerrado, Uberaba, MG, 2025



Fonte: elaborada pelos autores, 2025.
Nota: ZA: Capim-Zuri irrigado com aspersão; TA: Tifton 85 + Braquiária irrigado com aspersão; ZG: Capim-Zuri irrigado com gotejo subterrâneo; TG: Tifton 85 + Braquiária irrigado com gotejo subterrâneo; ZS: Capim-Zuri em sequeiro; TS: Tifton 85 + Braquiária em sequeiro; BD: Braquiária em degradação; MN: Mata nativa. RP = resistência à penetração; Ds = densidade do solo; Uv = umidade volumétrica; Macro = macroporosidade; Micro = microporosidade; PT = porosidade total; Macro/PT = relação entre macroporosidade e porosidade total. Os vetores indicam a direção e a magnitude da contribuição de cada variável. Os componentes 2 e 3 explicam conjuntamente 39% da variância total dos dados.

A distribuição dos sistemas de manejo no plano formado pelos Componentes Principais 2 e 3 evidencia padrões distintos de associação entre os atributos físicos do solo. Observa-se que os sistemas sob aspersão apresentaram maior dispersão nesse plano, com ZA.10 e ZA.20 associados ao vetor da Uv, enquanto TA.30 apresentou maior proximidade com o vetor da Ma. Esses resultados indicam que a

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/05/2026 - **Accepted:** 29/06/2026
Vol: 13.14
DOI: 10.66104/42v3y894
Pages: 1-32

diferenciação desses sistemas esteve relacionada principalmente à redistribuição dos poros e à condição hídrica do solo.

Os sistemas sob gotejamento subterrâneo mantiveram associação com atributos relacionados à PT e à Mi, embora apresentem maior dispersão entre as profundidades avaliadas nesse plano. Destaca-se que TG.10 e TG.40 permaneceram próximos ao vetor da PT, enquanto ZG.30 e ZG.40 apresentaram maior proximidade com o vetor da Ds.

A área de Braquiária em degradação e a mata nativa permaneceram agrupadas em regiões distintas dos sistemas irrigados, reforçando seus papéis como referências de condições contrastantes de manejo. Em conjunto, os três planos da análise de componentes principais demonstram que a diferenciação entre os sistemas de manejo decorre da interação entre atributos mecânicos, estruturais e físico-hídricos do solo, corroborando os resultados obtidos nas análises univariadas e na matriz de correlação (Figura 4) (Benevenute et al., 2020).

De forma integrada, as análises univariadas, a matriz de correlação e a análise de componentes principais demonstraram resultados convergentes na diferenciação dos sistemas de manejo quanto à qualidade física do solo. Os resultados indicam que essa diferenciação esteve associada à interação entre a Uv e os atributos do sistema poroso, reforçando a importância da avaliação conjunta dos atributos mecânicos, estruturais e físico-hídricos para compreender as diferenças observadas entre os sistemas de manejo. Por se tratar de uma avaliação realizada em um único momento, essas interpretações devem ser restritas às condições observadas durante o período experimental, sem estabelecer relações causais entre os fatores que compõem cada sistema avaliado (Cherubin et al., 2017; Rabot et al., 2018; Gubiani et al., 2024).

CONCLUSÃO

Os sistemas de manejo apresentaram diferenças quanto aos atributos físicos do solo. No momento da avaliação, os sistemas sob gotejamento subterrâneo apresentaram condições físico-hídricas mais favoráveis, caracterizadas por menores valores de resistência mecânica à penetração, maiores teores de umidade volumétrica e melhor distribuição do sistema poroso, enquanto os sistemas conduzidos em

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/05/2026 - **Accepted:** 29/06/2026
Vol: 13.14
DOI: 10.66104/42v3y894
Pages: 1-32

sequeiro e a área de Braquiária em degradação apresentaram condições menos favoráveis. As análises univariadas, a matriz de correlação e a análise de componentes principais foram concordantes, reforçando a importância da avaliação integrada dos atributos físicos do solo. Por se tratar de uma avaliação pontual, as interpretações devem ser restritas às condições observadas durante o período experimental.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Atlas irrigação:** uso da água na agricultura irrigada no Brasil. Brasília: ANA, 2021. Disponível em: https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/1b19cbb4-10fa-4be4-96db-b3dcd8975db0. Acesso em: 21 nov. 2025.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. Disponível em: https://www.fao.org/4/x0490e/x0490e00.htm. Acesso em: 27 nov. 2025

ARSHAD, M. A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. *In:* DORAN, J. W.; JONES, A. J. Methods for assessing soil quality. **Soil Science Society of America**, Madison, p. 123–141, 1996. DOI: https://doi.org/10.2136/sssaspecpub49.c7. Acesso em: 29 nov. 2025.

BAPTISTELLA, J. L. C. Urochloa in tropical agroecosystems: functional traits and ecosystem services. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, Lausanne, v. 4, 2020. DOI: https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00035. Acesso em: 14 ago. 2025.

BARBOSA, J. C.; MALDONADO JÚNIOR, W. **Experimentação agronômica & AgroEstat – sistemas para análise estatística de ensaios agronômicos**. Jaboticabal: FUNEP, 2015. 396 p.

BECK, H. E.; ZIMMERMANN, N. E.; MCVICAR, T. R.; VERGOPOLAN, N.; BERG, A.; WOOD, E. F. Present and future Köppen–Geiger climate classification maps at 1-km resolution. **Scientific Data**, London, v. 5, art. 180214, 2018. DOI: https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214. Acesso em: 14 ago. 2025

BENEVENUTE, P. A. P.; MORAES, E. G.; SOUZA, A. A.; VASQUES, I. C. F.; CARDOSO, D. P.; SALES, F. R.; SEVERIANO, E. C.; HOMEM, B. G. C.; CASAGRANDE, D. R.; SILVA, B. M. Penetration resistance: an effective indicator for monitoring soil compaction in pastures. **Ecological Indicators**, Amsterdam, v. 117,

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/05/2026 - **Accepted:** 29/06/2026
Vol: 13.14
DOI: 10.66104/42v3y894
Pages: 1-32

art. 106647, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106647. Acesso em: 12 jun. 2025.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 9. ed. Viçosa: UFV, 2019.

CHERUBIN, M. R.; FRANCO, A. L. C.; GUIMARÃES, R. M. L.; TORMENA, C. A.; CERRI, C. E. P.; KARLEN, D. L.; CERRI, C. C. Assessing soil structural quality under Brazilian sugarcane expansion areas using visual evaluation of soil structure (VESS). **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 173, p. 64–74, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.still.2016.05.004. Acesso em: 15 out. 2025.

COLOMBI, T.; TORRES, L. C.; WALTER, A.; KELLER, T. Feedbacks between soil penetration resistance, root architecture and water uptake limit water accessibility and crop growth. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 626, p. 1026–1035, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.129. Acesso em: 01 set. 2025.

COMUNELLO, E.; FIETZ, C. R.; FLUMIGNAN, D. L. **Estimativa das chuvas por pluviômetros manuais de baixo custo**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, Comunicado Técnico, 268, 2022.

CUO, M.; XU, L.; YUAN, B.; NIE, Y.; WEI, J. Pastureland soil organic carbon storage regulated by pasture species and age under nitrogen and water addition in Northern China. **Agronomy**, Basel, v. 15, n. 2, art. 399, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy15020399. Acesso em 06 set. 2025.

FENG, S.; HUANG, F.; NG, C. W. W.; CHEN, F. Q.; QIAN, X.; ZHAO, N. K. Roots of Cynodon dactylon increase gas permeability and gas diffusion coefficient of highly compacted soils. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 492, p. 329–351, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/s11104-023-06173-6. Acesso em: 07 jul. 2025.

FRIZZONE, J. A. **Os métodos de irrigação**. Piracicaba: ESALQ/USP, 2017. Disponível em: https://www.esalq.usp.br/departamentos/leb/disciplinas/Frizzone/LEB_1571/TEXTO_COMPLEMENTAR_1_-_METODOS_DE_IRRIGACAO.pdf. Acesso em: 8 jan. 2026.

GRANDINETTI, L.; CANTERO-MARTÍNEZ, C.; RAMOS, M. C. Aggregate stability and soil surface sealing in irrigated soils. **Land Degradation & Development**, Chichester, v. 33, n. 1, p. 123–133, 2022. DOI: https://doi.org/10.1002/ldr.4316. Acesso em: 6 jan. 2026.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/05/2026 - **Accepted:** 29/06/2026
Vol: 13.14
DOI: 10.66104/42v3y894
Pages: 1-32

GUBIANI, P. I.; SANTOS, V. P.; MULAZZANI, R. P.; SUZUKI, L. E. A. S.; DRESCHER, M. S.; ZWIRTES, A. L.; KOPPE, E.; PEREIRA, C. A.; MENTGES, L. R.; GALARZA, R. M.; BOENO, D.; EURICH, K.; BITENCOURT JUNIOR, D.; MARCOLIN, C. D.; MÜLLER, E. A. Relationship between plant-available water and soil compaction in Brazilian soils. **Sustainability**, Basel, v. 16, n. 16, art. 6951, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/su16166951. Acesso em: 20 nov. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo agropecuário 2017**. Rio de Janeiro: IBGE, 2018. Disponível em: https://www.ibge.gov.br. Acesso em: 20 nov. 2025.

JABRO, J. D.; STEVENS, W.; IVERSEN, W.; SAINJU, U.; CHEN, C. Soil-water retention curves and pore-size distribution in different tillage systems. **Land**, Basel, v. 13, n. 12, art. 1987, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/land13121987. Acesso em: 21 ago. 2025.

KASSAMBARA, A. Practical guide to principal component methods in r: pca, m(ca), famd, mfa, hcpc, factoextra. **STHDA**, v. 2, 2017. 169 p. ISBN 978-1-975721-13-8. Disponível em: https://www.sthda.com/english/wiki/practical-guide-to-principal-component-methods-in-r. Acesso em: 30 nov. 2025.

LABORATÓRIO DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS E GEOPROCESSAMENTO. **Atlas das Pastagens**. Goiânia: LAPIG, 2023. Disponível em: https://lapig.iesa.ufg.br/p/38972-atlas-das-pastagens. Acesso em: 21 nov. 2025.

MAPBIOMAS. Projeto MapBiomas, **Coleção 9.0: uso e cobertura da terra no Brasil**. 2024. Disponível em: https://mapbiomas.org. Acesso em: 20 nov. 2025.

MARTINS, J. V. S.; TORRES, J. L. R.; LEAL, A. B.; TEIXEIRA, D. O.; ORIOLI JÚNIOR, V.; LOSS, A. Physicochemical soil quality in areas under different management systems in the Cerrado. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 12, n. 2, e9284, 2025. DOI: https://doi.org/10.32404/rean.v12i2.9284. Acesso em: 07 jan. 2026.

MELO, M. C. **Irrigação em pastagens por gotejamento subsuperficial e modelagem do movimento de água no solo**. 2018. 81 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Produção Vegetal) – Universidade Federal de Viçosa, Campus Rio Paranaíba, Rio Paranaíba, MG, 2018. Disponível em: https://posagroprodvegetal.crp.ufv.br/wp-content/uploads/2018/08/Mariana-Cecilia-Melo.pdf. Acesso em: 6 jan. 2026.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/05/2026 - **Accepted:** 29/06/2026
Vol: 13.14
DOI: 10.66104/42v3y894
Pages: 1-32

NÓBREGA, R. L. B.; GUZHA, A. C.; TORRES, G. N.; KOVACS, K.; LAMPARTER, G.; AMORIM, R. S. S.; COUTO, E.; GEROLD, G. Effects of conversion of native cerrado vegetation to pasture. **PLOS ONE**, San Francisco, v. 12, n. 6, e0179414, 2017. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179414. Acesso em: 09 ago. 2025.
PAIVA FILHO, S. V. de; TAVARES, R. L. M.; FERREIRA, C. J. B.; SANTOS, G. O.; NASCIMENTO, H. L. B. Variation in soil penetration resistance as a function of soil moisture under crop management systems. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 55, e20238683, 2024. DOI: https://doi.org/10.5935/1806-6690.20240043. Acesso em: 09 ago. 2025.

PEREIRA, O. J. R.; FERREIRA, L. V.; PINHEIRO, T. F.; CARVALHO, L. M.; GOMES, A. D.; MARTINS, F. S. Assessing pasture degradation in the Brazilian Cerrado. **Remote Sensing**, Basel, v. 10, n. 11, art. 1761, 2018. DOI: https://doi.org/10.3390/rs10111761. Acesso em: 16 nov. 2025.

POLICARPO, V. H. C.; COSTA, R. D. da; NASCIMENTO, H. L. B.; TAVARES, R. L. M.; FERREIRA, C. J. B.; BOLDRIN, P. F. Root parameters and physical soil attributes with forage growth of “Panicum” and “Urochloa” grasses forage. **Evidência**, Joaçaba, v. 23, n. 2, p. 113–128, 2023. DOI: https://doi.org/10.18593/evid.32576. Acesso em: 12 out. 2025.

R CORE TEAM. R: a language and environment for statistical computing. **R Foundation for Statistical Computing**, Viena, 2025. Disponível em: https://www.R-project.org/. Acesso em: 16 nov. 2025.

RABOT, E.; WIESMEIER, M.; SCHLÜTER, S.; VOGEL, H.-J. Soil structure as an indicator of soil functions. **Geoderma**, Amsterdam, v. 314, p. 122–137, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009. Acesso em: 16 nov. 2025.

REGO, C. A. R. de M.; OLIVEIRA, P. S. R. de; MUNIZ, L. C.; ROSSET, J. S.; MATTEI, E.; COSTA, B. P.; PEREIRA, M. G. Chemical, physical, and biological soil properties of soil with pastures recovered by integration crop-livestock system in Eastern Amazon. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 47, e0220094, 2023. DOI: https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20220094. Acesso em: 03 jul. 2025.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. 2. ed. Barueri: Manole, 2012. Disponível em: https://repositorio.usp.br/item/003103881. Acesso em: 26 nov. 2025.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; HORN, R.; HAKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness. **Soil & Tillage**

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/05/2026 - **Accepted:** 29/06/2026
Vol: 13.14
DOI: 10.66104/42v3y894
Pages: 1-32

Research, Amsterdam, v. 102, p. 242–254, 2009. DOI: https://doi.org/10.1016/j.still.2008.07.002. Acesso em: 12 out. 2025.

ROCHA JÚNIOR, P. R.; DONAGEMMA, G. K.; ANDRADE, F. V.; PASSOS, R. R.; COSTA, A. S. V.; RUIZ, H. A. Field-based quality indicators in degraded pasture. Australian **Journal of Crop Science**, Brisbane, v. 11, n. 6, p. 652–661, 2017. DOI: https://doi.org/10.21475/ajcs.17.11.06.p326. Acesso em: 02 ago. 2025.

SANTOS, H. G. *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília: Embrapa, 2018. 356 p.

SENE, M.; VEPRASKAS, M. J.; NADERMAN, G. C.; DENTON, H. P. Relationships of soil texture and structure to corn yield response to subsoiling. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 49, n. 2, p. 422–427, 1985. DOI: https://doi.org/10.2136/sssaj1985.03615995004900020030x. Acesso em: 23 set. 2025.

SILVA JUNIOR, VALDEMIR P.; MONTENEGRO, ABELARDO A. A.; MELO, Rogério O. de. Temporal stability of soil moisture in an experimental watershed in the Pernambuco semi-arid region. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 20, n. 10, p. 880–885, 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/308768271_Temporal_stability_of_soil_moisture_in_an_experimental_watershed_in_the_Pernambuco_semi-arid_region. Acesso em: 06 nov. 2025.

SOUZA, C. F.; BIZARI, D. R. Soil solution distribution in subsurface drip irrigation in sugarcane. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 38, n. 2, p. 217–224, 2018. DOI: https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v38n2p217-224/2018. Acesso em: 12 dez. 2025.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 15, n. 1, p. 229–235, 1991. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/288962136_Teoria_e_teste_experimental_de_formulas_de_transformacao_dos_dados_de_penetrometro_de_impacto_em_resistencia_do_solo. Acesso em: 04 ago. 2025.

STONE, L. F.; CARVALHO, M. T. M.; SILVA, M. A. S.; CALIL, F. N.; SIQUEIRA, M. M. B. Intrinsic soil properties shape water availability. **Soil Advances**, Amsterdam, v. 4, art. 100082, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.soilad.2025.100082. Acesso em: 24 out. 2025.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/05/2026 - **Accepted:** 29/06/2026
Vol: 13.14
DOI: 10.66104/42v3y894
Pages: 1-32

TAYLOR, S. A.; ASHCROFT, G. L. **Physical edaphology: the physics of irrigated and nonirrigated soils**. San Francisco: W. H. Freeman, 1972. 532 p.

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

TORRES, J. L. R.; MOREIRA, L. R.; MAGESTE, J. G.; MAZETTO JÚNIOR, J. C.; SILVA JÚNIOR, J.; BORGES, G. V. A.; COELHO, L.; LEMES, E. M. Soil attributes, soil organic carbon and relations with rubber-tree morphology. **Agriculture and Forestry**, Podgorica, v. 66, n. 1, p. 191–201, 2020. DOI: https://doi.org/10.17707/AgricultForest.66.1.18. Acesso em: 22 set. 2025.

VALANI, G. P.; MARTÍNI, A. F.; MACHADO, C. B.; DUARTE, D. A.; COOPER, M. Soil porosity in integrated and non-integrated grazing systems. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 237, art. 110557, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.110557. Acesso em: 05 jul. 2025.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 5, p. 892–898, 1980. DOI: https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x. Acesso em: 29 out. 2025.

WANG, S.; JIAO, X.; GUO, W.; GAO, Y.; ZHANG, X.; NIU, Y.; QU, Y. Adaptability of shallow subsurface drip irrigation of alfalfa. **PLOS ONE**, San Francisco, v. 13, n. 4, e0195965, 2018. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0195965. Acesso em: 13 nov. 2025.

WANG, Y. D.; KOU, D.; MUNEER, M. A.; FANG, G. J.; SU, D. R. The effects of irrigation regimes on soil moisture dynamics, yield and quality of lucerne under subsurface drip irrigation. **Applied Ecology and Environmental Research**, Budapest, v. 18, n. 3, p. 4179–4194, 2020. DOI: https://doi.org/10.15666/aeer/1803_41794194. Acesso em: 06 jun. 2025.

YANG, P.; ZHANG, Y.; LI, J.; WANG, Q.; ZHAO, X.; LIU, Y.; CHEN, M. Review on drip irrigation. **Water**, Basel, v. 15, n. 9, art. 1733, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/w15091733. Acesso em 14 dez. 2025.

AGRADECIMENTOS

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/05/2026 - **Accepted:** 29/06/2026
Vol: 13.14
DOI: 10.66104/42v3y894
Pages: 1-32

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), à Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial (EMBRAPII) e à Braskem pelo apoio financeiro e pelo suporte ao desenvolvimento do projeto. Agradecem, ainda, à Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG) pela disponibilização da infraestrutura experimental e suporte técnico, e ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Triângulo Mineiro (IFTM) pelo apoio acadêmico e institucional.