



Atributos físicos de um planossolo sob sistemas integrados de produção agropecuária no semiárido Paraibano

Physical attributes of the Planosols under integrated crop production systems in the Semi-arid of Paraíba

Abraão Targino de Sousa Neto¹, Flávio Pereira de Oliveira², Pedro Luan Ferreira da Silva³, Milton César Costa Campos⁴, Paulo Roberto Megna Francisco⁵

RESUMO: O objetivo do presente estudo foi analisar a qualidade física de um Planossolo em ambiente semiárido sob sistemas integrados e convencionais de produção agropecuária após o período de oito anos de condução e verificar se as propriedades físicas do solo sob pastoreio respondem de distintamente aos diferentes sistemas de produção avaliados. O experimento está sendo conduzido desde o ano de 2015, em Alagoinha, Paraíba, sob um Planossolo Háptico. Os tratamentos foram compostos por: *Urochloa decumbens* + Ipê (BI); *Ur. decumbens* + Gliricídia (BG); *Ur. decumbens* + sabiá (BS); *Ur. decumbens* + milho (L) e *Ur. decumbens* (B). As amostras de solo foram coletadas no ano de 2022, nas camadas de 0-10, 10-20 e 20-30 cm de profundidade para determinação da densidade do solo (Ds), porosidade total (PT), macroporosidade (Mac), microporosidade (Mic) e condutividade hidráulica saturada (K θ). Os dados foram submetidos à análise de variância e análise de componentes principais (ACP) ($p < 0,05$). Os resultados demonstraram que não ocorre diferença ($p < 0,05$) entre os tratamentos avaliados, porém BI e B apresentam considerável K θ em superfície 7,5 e 3,1 cm h⁻¹, respectivamente. A Mac foi restritiva em todos os tratamentos na camada de 0-10 cm, com valores médios $< 0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Conclui-se que a qualidade física do solo sob pastejo é igual entre os sistemas integrados e convencionais (pastagem) de produção agropecuária após o período de oito anos.

Palavras-chave: Água no solo; Conservação; Porosidade do solo; Restauração física.

ABSTRACT: The aim of this study was to analyse the physical quality of a Planosols in the semi-arid environment under integrated and conventional agricultural production systems after eight years of management and to observe if the physical properties of the soil under grazing respond differently to the production systems assessment. The experiment has been carried out since 2015 in Alagoinha, Paraíba, on a Planosols. The treatments were composed of: *Urochloa decumbens* + Ipê (BI); *Ur. decumbens* + Gliricídia (BG); *Ur. decumbens* + sabiá (BS); *Ur. decumbens* + milho (L) and *Ur. decumbens* (B). Soil samples were collected in 2022 in the 0-10, 10-20 and 20-30 cm depth layers to determine soil bulk density (Bd), total porosity (TP), macroporosity (Mac), microporosity (Mic) and saturated hydraulic conductivity (K θ). The data was subjected to analysis of variance and principal component analysis (PCA) ($p < 0.05$). The results showed that there was no difference ($p < 0.05$) between the treatments evaluated, but BI and B showed considerable K θ on the surface 7.5 and 3.1 cm h⁻¹, respectively. Mac was restrictive in all treatments in the 0-10 cm layer, with average values $< 0.10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. It can be concluded that the physical quality of the soil under grazing is the same between integrated and conventional (pasture) agricultural production systems after a period of eight years.

Keywords: Soil water; Conservation; Soil porosity; Physical restoration.

Autor correspondente: Pedro Luan Ferreira da Silva
E-mail: pedroluanferreira@gmail.com

Recebido em: 27/10/2023
Aceito em: 01/04/2024

¹ Mestre em Ciência do Solo pela UFPB. Agente de Extensão do SENAR, Alagoa Nova (PB), Brasil.

² Doutor em Ciência do Solo, Docente do Programa de Ciência do Solo (PPGCS) da UFPB, Areia (PB), Brasil.

³ Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Agronomia (PGA) da UEM, Maringá (PR), Brasil.

⁴ Doutor em Ciência do Solo, Docente do Programa de Ciência do Solo (PPGCS) da UFPB, Areia (PB), Brasil.

⁵ Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais (PGRN) da UFCG, Campina Grande (PB), Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O semiárido se encontra em intenso processo de degradação (Santos *et al.*, 2017), ocasionado pela ação antrópica e por práticas de manejo do solo inadequadas (Blainski *et al.*, 2017). A instabilidade climática, juntamente com as ações antrópicas mal coordenadas de uso da terra, propiciam acentuada pressão nos sistemas de produção em regiões secas, que segundo Alves *et al.* (2022) são os principais entraves para a baixa produtividade da agropecuária nessas áreas.

No semiárido, sob o bioma Caatinga, estudos têm demonstrado que as ações antrópicas sobre a vegetação arbustiva estão promovendo a exposição da camada saprolítica do solo às intempéries ambientais, além de afetar a drenagem, a ciclagem de nutrientes e o estoque de carbono no solo (Macedo *et al.* 2023), já que a adoção de práticas agrícolas inadequadas é considerada a principal causa de degradação do solo de ambientes semiáridos no âmbito global e regional (Tavares, Arruda e Silva, 2019). No Agreste da Paraíba, a ocupação desordenada do solo aliada às práticas inadequadas de manejo do solo nas áreas de relevo acidentado tem ocasionado processos erosivos e a degradação do solo (Sousa *et al.*, 2023).

Nesse sentido, como alternativa sustentável para minimizar a degradação do solo em ambientes semiáridos surgem os sistemas integrados de produção agropecuária (SIPAs), como a integração lavoura-pecuária-floresta (iLPF). Esse sistema maximiza a produção de alimentos, fibras, energia e água, além de ser mais sustentáveis que os sistemas de produção convencionais (Assis *et al.*, 2017). Em âmbito regional, a adoção dos sistemas integrados de produção agropecuária é relativamente recente, contudo, diversos estudos como os de Silva *et al.* (2019) e Silva *et al.* (2021) tem demonstrado resultados satisfatórios, inclusive para o aporte de carbono em Planossolo do semiárido aos quatro anos de implantação do sistema (Silva *et al.*, 2019).

O acúmulo de resíduos em solos sob sistemas integrados de produção agropecuária, no longo prazo, pode amenizar a compactação e o aumento de resistência à penetração do solo (Bonetti *et al.*, 2017; Bratti *et al.*, 2021). Estudos demonstram as vantagens que os sistemas integrados de produção agropecuária proporcionam às propriedades químicas, físicas e biológicas do solo (Assis *et al.*, 2015; Dollinger; Jose, 2018; Valani *et al.*, 2021; Matos *et al.*, 2022; Valani *et al.*, 2022; Bansal; Chakraborty; Kumar, 2022). Contudo, Valani *et al.* (2022) constataram que a qualidade do solo semelhante foi encontrada para sistemas de pastoreio integrados e não integrados. A hipótese levantada pelo presente estudo é que a qualidade física do solo em ambiente semiárido, no longo prazo, sob pastoreio e mais responsiva aos sistemas integrados de produção agropecuária em relação aos sistemas convencionais, como a pastagem, em função da complexidade de interações que os sistemas integrados promovem ao ambiente.

Dessa forma, o objetivo do presente estudo foi analisar a qualidade física de um Planossolo em ambiente semiárido sob sistemas integrados e convencionais de produção agropecuária após o período de oito anos de condução e verificar se as propriedades físicas do solo sob pastoreio respondem de distintamente aos diferentes sistemas de produção avaliados.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi implantado em julho de 2015 em área experimental da Empresa Paraibana de Pesquisa, Extensão Rural e Regularização Fundiária (EMPAER), em Alagoinha, Paraíba, Brasil (06°57'00" S e 35°32'42" W; 317 m. a.s.l.). O clima do município é caracterizado como tropical quente e úmido, tipo As' segundo a classificação climática de Köppen-Geiger (Silva *et al.* 2019), com chuvas de outono-inverno

e período chuvoso entre os meses de março e agosto. A precipitação média anual é de 995 mm, com temperatura variando de 22 a 26 °C e umidade relativa do ar de 65%. O solo da área experimental foi classificado como Planossolo Háplico Eutrófico mésico solódico com horizonte A moderado e de textura franco-arenosa (Santos *et al.*, 2018), conforme apresentado na Tabela 1. Realizou-se a caracterização química do solo da área experimental antes da implantação do experimento até a camada de 20 cm de profundidade e os dados estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 1. Caracterização física do Planossolo Háplico da área experimental sob sistemas integrados e convencional de produção agropecuária no Semiárido da Paraíba

Arcia	Silte	Argila	ADA	GF	Ds	Dp	PT
----- g kg ⁻¹ -----				--- Mg m ⁻³ ---		m ³ m ⁻³	
685	172	143	38	734	1,54	2,64	0,42

Legenda: ADA- Argila dispersa em água; GF- Grau de floculação, Ds- Densidade do solo, DP- Densidade de partículas, PT- Porosidade Total.

Tabela 2. Caracterização química do Planossolo Háplico da área experimental sob sistemas integrados e convencional de produção agropecuária no Semiárido da Paraíba

pH	P	K ⁺	Na	H+Al ⁺³	Al ⁺³	Ca ⁺²	Mg ⁺²	SB	CTC	COT	V
H ₂ O	-- mg dm ⁻³ --		----- cmol _c dm ⁻³ -----					g kg ⁻¹		%	
5,7	6,98	194,00	0,03	4,46	0,00	2,71	1,17	4,47	8,93	9,10	50,0

Legenda: P- Fósforo; K- Potássio; Na- Sódio, H- Hidrogênio, Ca- Cálcio; Mg- Magnésio; SB- Soma de bases; CTC- Capacidade de troca catiônica; COT- Carbono orgânico total do solo; V%- índice de saturação por bases

2.1 CARACTERIZAÇÃO DO EXPERIMENTO

Antes da implantação do experimento, a área encontrava-se cultivada com *Urochloa decumbens* sob pastejo extensivo com bovinos. No mês de setembro de 2015 realizou-se o transplante das espécies florestais *Gliricidia sepium*, *Mimosa caesalpiniaefolia* e *Handroanthus impetiginosus* nas parcelas experimentais com espaçamento de 2x3 m, em fileiras triplas, totalizando seis fileiras por parcela. Na safra 15/16 o sistema lavoura anual (LA) encontrava-se ocupado com o consórcio Milho + *Brachiaria decumbens*; na safra 16/17 - Soja + sorgo; na safra 17/18- algodão + feijão caupi e na safra 18/19 - Gergelim + sorgo + amendoim).

Adotou-se o delineamento experimental de blocos casualizados, com cinco tratamentos e quatro repetições (5x4), totalizando 20 parcelas experimentais, com área total de 760 m² por parcela. Os sistemas avaliados foram compostos pelos seguintes consórcios: i) *Urochloa decumbens* Stapf. + Ipê roxo (*Tabebuia impetiginosa*) (BI); ii) *Urochloa decumbens* Stapf. + Gliricídia (*Gliricidia sepium*) (BG); iii) *Urochloa decumbens* Stapf. + Sabiá (*Mimosa caesalpiniaefolia*) (BS); iv) *Urochloa decumbens* Stapf. + Milho (Lavoura anual - LA) e v) *Urochloa decumbens* Stapf. (BD).

No mês de fevereiro de 2022 realizou-se a coleta das amostras de solo com estrutura deformada e indeformada para a avaliação da qualidade física do solo sob o renque das arbóreas, em três profundidades (0-10; 10-20; 20-30 cm), totalizando 240 amostras. Os atributos analisados foram: densidade do solo (Ds; Mg m⁻³), porosidade total (PT), macroporosidade (Mac) e microporosidade (Mic) (m³ m⁻³) e condutividade hidráulica saturada (cm h⁻¹). As amostras foram saturadas e submetida à mesa de tensão para determinação

da PT, Mac e Mic conforme metodologia descrita por Teixeira et al. (2017). A Ds foi determinada através da relação massa do solo seco sobre o volume (Blake; Hartge, 1986). A condutividade hidráulica saturada do solo foi determinada em permeâmetro de carga constante, conforme descrito por Teixeira *et al.* (2017).

2.2 PROCEDIMENTO ESTATÍSTICO

Os dados foram submetidos à análise de homogeneidade e homoscedasticidade e análise de variância. Quando significativas, aplicou-se o teste de média de Tukey ($p < 0,05$). Quando não significativas, as médias foram submetidas a análise multivariada, aplicando-se a análise de componentes principais utilizando o software R versão 4.4.2 e o pacote FactoMineR versão 2.7 (R Core Team, 2013).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 3 encontram-se apresentados os valores médios de Densidade do solo (Ds), porosidade total (PT), macroporosidade (Mac), microporosidade (Mic) e condutividade hidráulica saturada (K θ). Observa-se que não houve diferença significativa entre os tratamentos avaliados ($p > 0,05$).

Tabela 3. Densidade do solo (Ds), porosidade total (PT), macroporosidade (Mac), microporosidade (Mic) e condutividade hidráulica saturada (K θ) de um Planossolo Háplico sob sistemas integrados e convencional de produção agropecuária no Semiárido da Paraíba

Atributo físico	Camada (cm)	Tratamentos					Média
		BI	BG	BS	L	B	
Ds (Mg m ⁻³)	0-10	1,34 a	1,45 a	1,38 a	1,44 a	1,41 a	1,41 ± 0,02
	10-20	1,49 a	1,47 a	1,53 a	1,46 a	1,44 a	1,48 ± 0,02
	20-30	1,45 a	1,48 a	1,41 a	1,47 a	1,48 a	1,46 ± 0,02
PT (m ³ m ⁻³)	0-10	0,46 a	0,44 a	0,42 a	0,44 a	0,41 a	0,44 ± 1,32
	10-20	0,45 a	0,45 a	0,40 a	0,43 a	0,41 a	0,43 ± 1,32
	20-30	0,42 a	0,42 a	0,38 a	0,42 a	0,42 a	0,41 ± 1,32
Mac (m ³ m ⁻³)	0-10	0,08 a	0,08 a	0,08 a	0,09 a	0,08 a	0,08 ± 0,00
	10-20	0,11 a	0,10 a	0,08 a	0,10 a	0,10 a	0,10 ± 0,00
	20-30	0,09 a	0,10 a	0,10 a	0,10 a	0,10 a	0,10 ± 0,00
Mic (m ³ m ⁻³)	0-10	0,38 a	0,35 a	0,34 a	0,35 a	0,32 a	0,35 ± 0,0a
	10-20	0,34 a	0,35 a	0,32 a	0,33 a	0,31 a	0,33 ± 0,0ab
	20-30	0,32 a	0,32 a	0,29 a	0,31 a	0,31 a	0,31 ± 0,0b
K θ (cm h ⁻¹)	0-10	7,57 a	1,82 a	1,82 a	1,58 a	3,04 a	3,17 ± 1,07
	10-20	1,52 a	5,78 a	0,62 a	2,47 a	3,56 a	2,52 ± 1,07
	20-30	0,93 a	1,35 a	2,15 a	2,18 a	1,94 a	1,71 ± 1,07

Médias seguidas por letras iguais nas linhas não foram significativas ao nível ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey. BI- *Urochloa decumbens* + Ipê; BG- *Urochloa decumbens* + Gliricídia; BS- *Urochloa decumbens* + Sabiá; L- Lavoura (Milho + *Urochloa decumbens*) e B- *Urochloa decumbens*.

Apesar da D_s não ter diferido entre tratamentos ($p > 0,05$), observa-se na Tabela 3 que os valores médios estão abaixo do considerado crítico (D_{sc}) para solos de classificação textural franco arenoso, que é de 1,6 a 1,8 $Mg\ m^{-3}$, conforme Reynolds *et al.* (2002) e Reinert *et al.* (2008). Nos tratamentos BG, L e B verificou-se um incremento nos valores médios de D_s em profundidade, encontrando-se 1,53 $Mg\ m^{-3}$ para o tratamento BS. O aumento da D_s em profundidade pode estar relacionado ao peso da camada superior, a distribuição de partículas do solo e ao teor de areia (Pádua; Guerra; Zinn, 2015) ou mesmo pela pressão das raízes nos poros do solo durante o processo de crescimento (Reinert *et al.*, 2008).

Comparando os dados de D_s (Tabela 3) com os de Silva *et al.* (2019) e Silva *et al.* (2021), todos os tratamentos apresentaram incremento nos valores de D_s , independente da camada de solo avaliada. Esse resultado indica, portanto, que as práticas de manejo adotadas no local ou o pisoteio animal estão ocasionando aumento da degradação física do solo, mesmo que este aumento não seja considerado prejudicial para às culturas. A redução da porosidade do solo em função do aumento de D_s foi de 0,47% para PT, 18% para Mac e 13% para Mic. Por outro lado, observa-se que a $K\theta$ é mais sensível ao aumento de D_s , ou seja, 32% da redução da $K\theta$ foi influenciada pelo aumento de D_s .

Com relação à PT, apesar de não significativa (Tabela 3) os valores médios variaram de 0,38 a 0,46 $m^3\ m^{-3}$, ou seja, estão dentro da faixa considerada adequada para solos arenosos, que segundo Huang e Hartemink (2021) é de 0,33-0,60 $m^3\ m^{-3}$. Esse resultado demonstra que a PT não é um fator limitante no solo estudado, por outro lado, levando em consideração os valores médios de Mac, observa-se na camada de 0-10 cm de profundidade que os valores estão abaixo do considerado mínimo para o funcionamento do solo que é de 0,10 $m^3\ m^{-3}$, conforme observado por Centurion *et al.* (2007). Em sistemas com superlotação de animais, o aumento das unidades animais por área tende a reduzir os indicadores de qualidade física do solo, principalmente se este for submetido a práticas de manejo inadequadas (Rahaman *et al.*, 2019).

Na área experimental, os animais tendem a permanecer por um período de 45 dias pastejando em sistema extensivo, que no longo prazo pode responder com um efeito cumulativo e negativo às propriedades físicas do solo. Contudo, Bratti *et al.* (2021) destacam que no longo prazo, o constante aporte de resíduos nas áreas com sistemas integrados de produção agropecuária pode amenizar o impacto negativo do pisoteio animal sobre a redução de qualidade do solo, inclusive da macroporosidade.

A reduzida Mac em superfície reduz a taxa de infiltração de água no solo e induz o aparecimento da erosão devido o escoamento superficial da água (Stefanoski *et al.* 2013). Por outro Lado, a Mic apresentou valores variando de 0,29 a 0,38 $m^3\ m^{-3}$, sendo maior no tratamento BI na camada de 0-10 cm de profundidade, conforme destacado por Wendling *et al.* (2012) a PT do solo é constituída pela soma da Mac com a Mic, dessa forma a redução de uma tende a elevar a outra e vice-versa, explicando, dessa forma, a baixa Mac do solo no tratamento BI em superfície. A porosidade é um importante indicador de qualidade física do solo, devido sua sensibilidade às alterações estruturais do solo promovida pelas práticas de manejo, como visto por Rauber *et al.* (2018) em áreas de agricultura tradicional com aplicação de esterco bovino.

Na Figura 1 (a) encontra-se apresentado o cluster com a análise de hierarquia dos dados, observa-se que houve formação de três grupos: G1) AGR (agricultura convencional), G2) BG, BI, B e Mata e, G3) L e BS. Por outro lado, a análise de componentes principais explicou 79,6% da variância original dos dados, demonstrando a formação de três grupos (Figura 1b) conforme detalhado no dendrograma. O componente principal (CP1) acumulou 41,2% da variância total, enquanto o componente principal 2 (CP2) acumulou 38,4%. Na Tabela 4 estão apresentados os autovalores da ACP e os valores de correlação (r) dos atributos físicos do solo analisados.

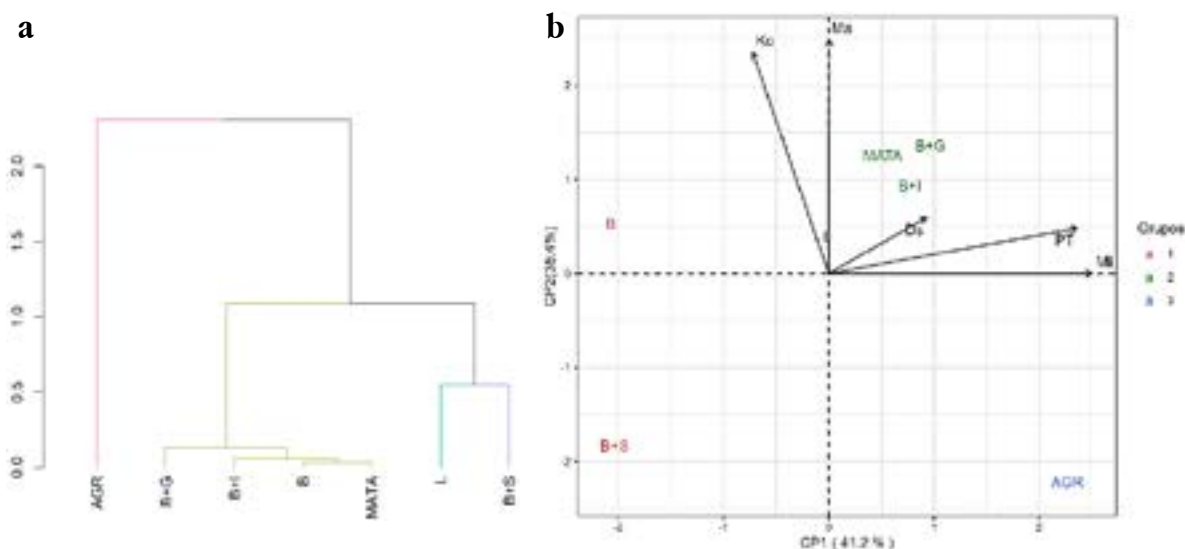


Figura 1. Agrupamento hierárquico de particionamento (a) e análise de componentes principais (ACP) (b) de um Planossolo Háplico sob sistemas integrados e convencional de produção agropecuária no Semiárido da Paraíba

Legenda: Ds- densidade do solo; PT: Porosidade total; Ma- Macroporosidade; Mi- Microporosidade e K θ - Condutividade hidráulica saturada; AGR- Agricultura; B- Braquiária; G- Gliricídia; I- Ipê; L- Lavoura e S- Sabiá.

Tabela 4. Autovetores associados à análise de componentes principais (ACP) para atributos físicos de um de um Planossolo Háplico sob sistemas integrados e convencional de produção agropecuária no Semiárido da Paraíba., com variância total acumulada de 79,6% ($\alpha = 0,05$)

Variável	PC1 (41,21%)			PC2 (38,40%)		
	r	R ²		Variável	r	R ²
Ds	0,255	6,50		Ds	0,169	2,85
PT	0,649	41,12		PT	0,137	1,87
Mac	0,001	0,00		Mac	0,708	50,12
Mic	0,688	47,30		Mic	0,000	0,00
K θ	-0,198	3,92		K θ	0,670	44,89

Legenda: Ds- densidade do solo; PT: Porosidade total; Ma- Macroporosidade; Mi- Microporosidade e K θ - Condutividade hidráulica saturada.

Com base na análise de hierarquia e componentes principais verificou-se associação significativa entre a PT ($r = 0,649$; $p < 0,05$) e Mic ($r = 0,688$; $p < 0,05$) com o grupo 3 (G3), formado pelos tratamentos BI, BG e Mata. A Ds relacionou-se aos tratamentos do G3 contudo, o valor de $r = 0,255$ e $0,169$ é baixo, dessa forma, não pode ser utilizado para explicar a resposta da qualidade física do solo aos diferentes tratamentos avaliados. Esse resultado está de acordo com o apresentado na Tabela 3 (análise univariada) ao demonstrar valores de Ds abaixo da Dsc em todos os tratamentos e camadas. No CP2, os atributos físicos do solo com maior poder de explicação foram a Mac ($r = 0,708$; $p < 0,01$) e K θ ($r = 0,670$; $p < 0,05$) (Tabela 4).

No CP2 os atributos físicos do solo Mac e K θ estiveram mais relacionados à lavoura, ou seja, são atributos que conseguem explicar as mudanças estruturais do solo provocada pela associação entre duas gramíneas nesse tratamento. Por outro lado, verifica-se que a Mac não teve efeito considerável sobre o CP1 com poder de carga (explicação da variável R²) igual a 0%. Na avaliação da qualidade física do solo sob os diferentes tratamentos, os atributos com maior poder de carga foram Mac com 50,12%, Mic com 47,30%, K θ com 44,89% e PT com 41,12%.

O maior poder de explicação da Mac indica o quanto esse atributo é sensível às mudanças de uso do solo. Após a conversão de áreas de pastagem em ILP o sistema tende a reduzir os valores de Ds e a Mac

tende a aumentar, contudo, após três anos a tendência é que esses valores se assemelhem aos anteriormente detectados antes da implantação (Bonetti *et al.*, 2018). O impacto ocasionado pelo tráfego de animais sobre a qualidade física do solo geralmente ocorre na camada de 0-5 cm de profundidade e efeitos benéficos ocorrem no longo prazo (Bonetti *et al.*, 2019). A recuperação do solo depende de suas condições iniciais, dos ciclos de umedecimento e secagem e do manejo, principalmente em sistemas de pastoreio intensivo, devido ao aumento de Ds (Bonetti *et al.*, 2023). No longo prazo, Dhaliwal e Kumar (2020) constataram que a adoção dos sistemas integrados de produção melhorou a retenção de água, a macroporosidade, a taxa de infiltração de água e a porosidade total em comparação ao sistema de produção convencional.

Com base na dimensão dos autovalores individuais dos tratamentos, o maior percentual da variância dos dados foi explicado pela seguinte ordem decrescente: AGR (3,181), BS (2,931), BI (2,327), B (2,119), BG (1,671), Mata (1,433) e L (1,242). A maior variância dos dados no tratamento AGR pode estar relacionada as mudanças de uso do solo, nesse sistema as técnicas utilizadas para o preparo do solo são intensificadas e mudam a variabilidade espacial e temporal dos atributos. O uso agrícola do solo tende a alterar os atributos físicos do solo, essa alteração induz uma deterioração da qualidade do solo em detrimento da retirada da cobertura vegetal e do uso da mecanização (Silva *et al.*, 2005). Conforme constatado por Williams *et al.* (2020) o manejo do solo afeta consideravelmente os indicadores de saúde do solo, com pior qualidade nos campos agrícolas quando comparados as áreas não manejadas. Para os autores, o aumento da diversidade de culturas, a omissão de preparo do solo e a correção orgânica são fundamentais para a promoção e manutenção da saúde do solo e do índice de manejo, quanto maior o índice de manejo, melhor é a qualidade física do solo.

Os resultados do presente estudo estão de acordo com os observados por Assis *et al.* (2015) em solo sob diferentes sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta, ao constatarem que a Mic e PT apresentaram alta correlação dentro da análise de componentes principais, conseguindo discriminar o ambiente de pastagem dos demais sistemas avaliados. Esse fato decorre da sensibilidade do sistema poroso do solo às alterações provocadas pelo uso e manejo do solo. O resultado do presente estudo difere dos resultados de Silva *et al.* (2020) avaliando a qualidade física do solo na mesma área experimental. Os autores observaram que apenas 59,27% da variância foi explicada pelos componentes principais CP1 e CP2 e os valores de correlação dos atributos Mac, Mic, PT e K θ foram muito baixos, sem considerável poder de explicação. Segundo Ryschawy *et al.* (2017) a resposta do solo de ambientes semiáridos é muito lenta e respostas sutis podem ser observadas ao longo do tempo.

Os solos do ambiente semiárido tropical são sujeitos a degradação devido as razões climáticas, tornando-o um ambiente pedoambiental hostil, com evidente deterioração das propriedades químicas, físicas e biológicas do solo (Bhattacharyya *et al.*, 2016). Esse fato, talvez, possa explicar a baixa variação entre os tratamentos (Tabela 1) mesmo após oito anos de consolidação do sistema, ou seja, a melhoria física desse solo em função do iLPF ocorre no longo prazo. A principal problemática relacionada à baixa resiliência de solos em ambientes semiáridos estão o baixo teor de carbono no solo, menos que o limite crítico, baixa umidade do solo, erosão, textura e estrutura (Velayutham e Pal, 2016). Segundo esses autores, a melhoria do armazenamento e disponibilidade de água seria uma ferramenta útil para melhorar a qualidade do solo sob as condições de ambiente semiárido.

Estudos constataram que a adoção de sistemas agroflorestais em ambiente semiárido não modificou o índice de qualidade física do solo, ao contrário do pousio que atingiu valores equivalentes aos encontrados em ambiente de mata (Fialho *et al.*, 2013), pois os benefícios vão depender da manutenção da cobertura do solo (Liebig *et al.*, 2020; Tonucci *et al.*, 2023). Conforme, Macedo *et al.* (2024) os atributos físicos do solo são menos sensíveis as práticas de manejo e a pedogênese em solo de semiárido quando comparados

aos atributos químicos. A degradação do solo em ambiente semiárido altera a comunidade microbiana, suas funções e a dinâmica de carbono no solo, processo esse que é revertido após o processo de restauração (Pereira *et al.*, 2022).

A alta temperatura do solo e a seca diminuem a abundância microbiana e a atividade enzimática do solo, que geralmente são recuperadas após eventos climáticos extremos (Pérez-Guzmán *et al.*, 2020), contudo, os autores elencam que se tratando de textura, os solos arenosos são mais resilientes que os argilosos em ambiente semiárido. A melhoria física do solo sob sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta em solo de ambiente semiárido é mais efetiva no longo prazo, e novos estudos devem ser realizados a fim de avaliar o tempo mínimo necessário para ocorrer melhorias físicas e estruturais efetivas, além do arranjo mais eficiente a ser adotado.

4 CONCLUSÕES

Conclui-se que não houve melhoria da qualidade física do solo entre os sistemas integrados e convencional de produção agropecuária avaliados. A qualidade Física do solo sob pastagem é igual ao observado nos tratamentos com sistemas integrados de produção, independente da camada de solo avaliada.

A análise de componentes principais demonstrou que os atributos físicos do solo porosidade total, condutividade hidráulica saturada e macroporosidade são indicadores de qualidade física do solo sensíveis para diferenciar os diferentes tratamentos avaliados no Planossolo em ambiente Semiárido.

REFERÊNCIAS

- ALVES, H.K.M.N.; JARDIM, A.M.R.F.; ARAÚJO JÚNIOR, G.N.; SOUZA, C.A.A.; LEITE, R.M.C.; SILVA, G.I.N.; SOUZA, L.S.B.; SILVA, T.G.F. Uma abordagem sobre práticas agrícolas resilientes para maximização sustentável dos sistemas de produção no semiárido brasileiro. **Rev. Bras. Geogr. Fís.** Recife, v. 15, n. 1, p. 373-392, maio/jun. 2022. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.1.p373-392>
- ASSIS, P.C.R.; STONE, L.F.; MEDEIROS, J.C.; MADARI, B.E.; OLIVEIRA, J.M.; WRUCK, F.J. Atributos físicos do solo em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta. **Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient.** Campina Grande, v. 19, n. 4, p. 309-316, abr. 2015. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n4p309-316>
- ASSIS, P.C.R.; STONE, L.F.; SILVEIRA, A.L.R.; OLIVEIRA, J.M.; WRUCK, F.J.; MADARI, B.E. Biological soil properties in integrated crop-livestock-forest systems. **Rev. Bras. Ciênc. Solo.** Viçosa, v. 41, e0160209, jan./dez. 2017. <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20160209>
- BANSAL, S.; CHAKRABORTY, P.; KUMAR, S. Crop-livestock integration enhanced soil aggregate-associated Carbon and Nitrogen, and phospholipid fatty acid. **Sci Rep.** London, v. 12, n. 1, p. e2781, feb. 2022. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06560-6>
- BHATTACHARYYA, T.; PAL, D.K.; WANI, S.P.; SAHRAWAT, K.L. Resilience of the semiarid tropical soils. **Curr. Sci.** Bangalore, v. 110, n. 9, p. 1784-1788, May. 2016. <http://dx.doi.org/10.18520/cs/v110/i9/1784-1788>

BLAINSKI, É.; PORRAS, E.A.A.; GARBOSSA, L. H. P.; PINHEIRO, A. Simulation of land use scenarios in the Camboriú river basin using the Swat model. **RBRH**. Porto Alegre, v. 22, n. 33, p. 1-12, jan./dez. 2017. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.011716110>

BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A., Ed., **Methods of Soil Analysis, Part 1-Physical and Mineralogical Methods**, 2nd Edition, Agronomy Monograph 9, American Society of Agronomy-Soil Science Society of America, Madison, 1986, pp. 363-382.

BONETTI, J.A.; ANGHINONI, I.; GUBIANI, P.O.; CECAGNO, D.; MORAES, M.T. Impact of a long-term crop-livestock system on the physical and hydraulic properties of an Oxisol. **Soil Till Res**. Amsterdam, v. 186, n. 1, p. 280-291, March, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.11.003>

BONETTI, J.A.; ANGHINONI, I.; BREDEMEIER, C.; MORAES, M.T.; TORMENA, C.A.; GUBIANI, P.I. Physical recovery of an Oxisol under an integrated crop-livestock system in southern Brazil. **Arch Agron Soil Sci**, London, v. 69, n. 4, p. 507-518, Dec. 2023. <https://doi.org/10.1080/03650340.2021.2013471>

BONETTI, J.A.; ANGHINONI, I.; MORAES, M.T.; FINK, J.R. Resilience of soils with different texture, mineralogy and organic matter under long-term conservation systems. **Soil Till Res**, Amsterdam, v. 141, n. 1, p. 104-112, Dec. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.06.008>

BONETTI, J.A.; PAULINO, H.B.; SOUZA, E.D.; CARNEIRO, M.A.C.; CAETANO, J.O. Soil physical and biological properties in an integrated crop-livestock system in the Brazilian Cerrado. **Pesq. Agropec. Bras**. Brasília, v. 53, n. 11, p. 1239-1347, 2018. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2018001100006>

BRATTI, F.; LOCATELLI, J.L.; RIBEIRO, R.H.; MELLO, G.R.; BESEN, M.R.; PIVA, J.T. Soil resistance to penetration in integrated crop-livestock with grazing intensities and fertilization. **Sci. Agrar. Parana**. Marechal Cândido Rondon, v. 20, n. 4, p. 327-335, out./dez. 2021. <https://doi.org/10.18188/sap.v20i4.28190>

CENTURION, J.F.; FREDDI, O.S.; ARATANI, R.G.; METZNER, A.F.M.; BEUTLER, A.N.; ANDRIOLI, I. Influência da cana-de-açúcar e da mineralogia da argila nas propriedades físicas de Latossolo Vermelho. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 31, n. 2, p. 199-209, abr. 2007. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000200002>

DHALIWAL, J.K.; KUMAR, S. Hydro-physical soil properties as influenced by short long-term integrated crop-livestock agroecosystems. **Soil Sci. Soc. of Am. J.** Madison, v. 85, n. 3, p. 789-799, May/June. 2021. <https://doi.org/10.1002/saj2.20214>

DOLLINGER, J.; JOSE, S. Agroforestry for soil health. **Agrofor. Syst.** Berlim, v. 92, p. 213- 219, March. 2018. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0223-9>

FIALHO, J.S.; AGUIAR, M.I.; MAIA, L.S.; MAGALHÃES, R.B.; ARAÚJO, F.C.S.; CAMPANHA, M.M.; OLIVEIRA, T.S. Soil quality, resistance, and resilience in traditional agricultural and agroforestry agroecosystems in Brazil's semiarid region. **Afr. J. Agric. Res.** Maiduguri, v. 8, n. 40, p. 5020-5031, October. 2013. <https://doi.org/10.5897/AJAR2013.6712>

GUZMÁN-PÉREZ, L.; ACOSTA-MARTÍNEZ, V.; PHILLIPS, L.A.; MAUGET, S.A. Resilience of the microbial communities of semiarid agricultural soils during natural climatic variability events. **Appl. Soil Ecol.** Amsterdam, v. 149, n. 1, p. 103487, May. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.103487>

HUANG, J.; HARTEMINK, A. Soil and environmental issues in sandy soils. **Earth Sci Rev.** Amsterdam, v. 73, n. 1, e13147, Sep. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103295>

LIEBIG, L.A.; FAUST, D.R.; ARCHER, D.W.; KRONBERG, S.L.; HENDRICKSON, J.L.; TANAKA, D.L. Integrated crop-livestock effects on soil carbon and nitrogen in a semiarid region. **Agrosyst. Geosci. Environ.** Madison, v. 3, n. 1, p. e20098, Sep. 2020. <https://doi.org/10.1002/agg2.20098>

MACEDO, R.S.; LIMA, R.P.; CARNEIRO, K.A.A.; MORO, L.; REFATI, D.C.; CAMPOS, M.C.C.; BEIRIGO, R.M.; CRUZ, G.K.G.; SOUSA, A.A.P.; BRITO NETO, J.F.; DUARTE, J.A.; COSTA, D.T. Assessment of soil quality of smallholder Agroecosystems in the Semi-arid region of Northeastern Brazil. **Land**, Basel, v. 13, n. 3, p. e304, March. 2024. <https://doi.org/10.3390/land13030304>

MACEDO, R.S.; MORO, L.; LAMBAIS, É.O.; LAMBIS, G.R.; BAKKER, A.P. Effects of degradation on soil attributes under Caatinga in the Brazilian semi-arid. **Ver. Árvore**, Viçosa, v. 47, e4702, jan./dez. 2023. <https://doi.org/10.1590/1806-9088202300000002>

MATOS, A.M.S.; BONINI, C.S.B.; MOREIRA, B.R.A.; ABDREOTTI, M.; HEINRICHS, R.; SILVA, D.T.; SOUZA, J.A.L.; SANTOS, M.A.; ANDRIGHETTO, C.; PAVAN, G.M.; BARRETTO, V.C.M.; BONINI NETO, A. Long-term integrated crop-livestock-forestry systems recover the structural quality of Ultisol soil. **Agronomy**, Basel, v. 12, n. 12, p. e2961, Dec. 2022. <https://doi.org/10.3390/agronomy12122961>

PÁDUA, E.J.; GUERRA, A.R.; ZINN, Y.L. Modelagem da densidade do solo em profundidade sob vegetação nativa em Minas Gerais. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 39, n. 3, p. 725-736, maio/jun. 2015. <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20140028>

PEREIRA, A.P.A.; MENDES, L.W.; OLIVEIRA, F.A.S.; ANTUNES, J.E.L.; MELO, V.M.M.; ARAÚJO, A.S.F. Land degradation affects the microbial communities in the Brazilian Caatinga biome. **Catena**, Amsterdam, v. 211, n. 1, p. 105961, April. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105961>

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2013. Available: < <https://www.r-project.org/> >

RAHIMI, A.A.; SEPASKAH, A.R.; AHMADI, S.H. Evaluation of different methods for the prediction of saturated hydraulic conductivity in tilled and untilled soils. **Arch. Agron. Soil Sci.** New Jersey, v. 57, n. 8, p. 899-914, August. 2011. <https://doi.org/10.1080/03650340.2010.498010>

RAUBER, L.P. et al. Soil physical indicators of management systems in traditional agricultural areas under manure application. **Sci. Agric.** Piracicaba, v. 75, n. 4, p. 354-359, jul./ago. 2018. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2016-0453>

REINERT, D.J.; ANDRADE, A.P.; FRIEDERICHS, A.; MAFRA, A.L.; BARETTA, D.; ROSA, M.G.; MAFRA, M.S.H.; CORREA, J.C. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento das raízes das plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 32, n. 5, p. 1805-1816, jul./ago. 2008. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2016-0453>

REYNOLDS, W.D.; BOWMAN, B.T.; DRURY, C.F.; TAN, C.S.; XU, L. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. **Geoderma**, Amsterdam, v. 110, n. 1, p. 131-146, Nov. 2002. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00228-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00228-8)

RYSCHAWY, J.; LIEBIG, M.A.; KRONBERG, S.L.; ARCHER, D.W.; HENDRICKSON, J.R. Integrated crop-livestock management effects on soil quality dynamics in a semiarid region: A typology of soil change in over time. **Appl. Environ. Soil Sci.** Cairo, v. 2017, n. 1, p. 1-10, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/3597416>

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

SANTOS, K.F.; BARBOSA, F.T.; BERTOL, I.; WERNER, M.S.; WOLSCHICK, N.H.; MOTA, J.M. Study of soil physical properties and water infiltration rates in different types of land use. **Semina Ciênc. Agrar.** Londrina, v. 39, n. 1, p. 87-98, jan. 2018. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2018v39n1p87>

SILVA, P.F.L.; OLIVEIRA, F.P.; MARTINS, A.F.; TAVARES, D.D.; AMARAL, A.J. Fertility, carbon stock and aggregate stability of an Alfisol under integrated farming system. **Pesqui. Agropecu. Trop.** Goiânia, v. 51, n. 1, e66505, jan./dez. 2021. <https://doi.org/10.1590/1983-40632021v5166505>

SILVA, P.L.F.; OLIVEIRA, F.P.; MARTINS, A.F.; PEREIRA, W.E.; TAVARES, D.D.; AMARAL, A.J.; AMARAL, A.J.; SILVA, A.J. Soil health of an Albaquults under integrated crop-livestock-forest system through multivariate analysis. **Res. Soc. Develop.** Vargem Grande Paulista, v. 9, n. 11, p. e2929119835, nov. 2020. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i11.9835>

SILVA, P.L.F.; OLIVEIRA, F.P.; TAVARES, D.D.; NÓBREGA, C.C.; AMARAL, A.J. Water availability in a Planosol under integrated crop-livestock-forestry system in the Agreste region of Paraíba, Brazil. **Rev. Caatinga**, Mossoró, v. 32, n. 2, p. 449-457, Apr./Jun. 2019. <https://doi.org/10.1590/1983-21252019v32n218rc>

SILVA, R.R.; SILVA, M.L.N.; FERREIRA, M.M. Atributos físicos indicadores de qualidade do solo sob sistemas de manejo na bacia do alto do Rio Grande- MG. **Ciênc. Agrotec.** Lavras, v. 29, n. 4, p. 719-730, jul./agro. 2005.

SOUSA, C.S.; MAVEDO, R.S.; CARNEIRO, K.A.A.; MORO, L.; SILVA, K.C.G.; BRITO NETO, J.F.; CAMPOS, M.C.C. Caracterização física, química e mineralógica de solos sob diferentes usos em vertentes do Brejo paraibano. **Rev. Valore**, Volta Redonda, v. 8, n. especial, p. 317-224, jan./dez. 2023. <https://doi.org/10.22408/rev8020231472217-224>

STEFANOSKI, D.C.; SANTOS, G.G.; MARCHÃO, R.L.; PETTER, F.A.; PACHECO, L.P. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**. Campina Grande, v. 17, n. 12, p. 1301-1309, dez. 2013. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013001200008>

TAVARES, V.C.; ARRUDA, I.R.P.; SILVA, D.G. Desertificação, mudanças climáticas e secas no semiárido brasileiro: Uma revisão bibliográfica. **Geosul**, Florianópolis, v. 34, n. 70, p. 385-405, jan./abr. 2019. <https://doi.org/10.5007/2177-5230.2019v34n70p385>

TEIXEIRA, P.C.; DONAGEMMA, G.K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W.G. **Manual de métodos e análise de solos**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 573 p.2017.

TONUCCI, R.G.; VOGADO, R.F.; SILVA, R.D.; POMPEU, R.C.F.F.; ODA-SOUZA, M.; SOUZA, H.A. Agroforestry systems improves soil carbon and nitrogen stocks in depth after land-use change in the Brazilian Semi-arid region. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 47, n. 1, p. e0220124, 2023. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20220124>

VALANI, G.P.; MARTÍBI, A.F.; PEZZOPANE, J.R.M.; BERNARDI, A.C.C.; COOPER, M. Soil physical quality in topsoil of integrated and non-integrated grazing systems in a Brazilian Ferralsol. **Soil Till. Res.** Amsterdam, v. 220, n. 1, p. e105357, Jun. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105357>

VELAYUTHAN, M.; PAL, D.K. Soil resilience and sustainability of semiarid and humid tropical soils of India: A commentary. **Agropedology**, Nagpur, v. 26, n. 1, p. 1-9, Jan. 2016. <http://dx.doi.org/10.47114/j.agroped.2016.jun1>

WENDLING, B. VINHAL-FREITAS, I.C.; OLIVEIRA, R.C.; BABATA, M.M.; BORGES, E.N. Densidade, agregação e porosidade do solo em áreas de conversão do Cerrado em floresta de pinus, pastagem e plantio direto. **Biosci. J.** Uberlândia, v. 28, sup. 1, p. 256-265, 2012.

WILLIAMS, H.; COLOMBI, T.; KELLER, T. The influence of soil management on soil health: An on-farm study in southern Sweden. **Geoderma**, Amsterdam, v. 360, n. 1, p. 114010, February. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114010>