

SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA: EFEITOS SOBRE A QUALIDADE FÍSICA DE UM PLANOSSOLO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

PEDRO LUAN FERREIRA DA SILVA ^{1*}, FLÁVIO PEREIRA DE OLIVEIRA², ANDRE JULIO DO AMARAL³, ADRIANA FERREIRA MARTINS ², WALTER ESFRAIN PEREIRA ², DANILLO DUTRA TAVARES⁴, CAMILA COSTA DA NÓBREGA⁵

Recibido: 28/12/2020

Recibido con revisiones: 28/04/2021

Aceptado: 10/05/2021

RESUMO

Os solos do semiárido brasileiro estão sob um constante processo de degradação e estratégias sustentáveis de produção agropecuária devem ser adotadas de forma a mitigar este problema. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar o comportamento físico-hídrico do solo quatro anos após a implantação de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no semiárido Brasileiro. O experimento foi instalado no município de Alagoinha, PB, em um Planossolo Háplico de textura franco-arenosa. Foram avaliados cinco sistemas de integração em delineamento de blocos ao acaso (DBC) com quatro repetições: i) Ipê roxo (*Tabebuia impetiginosa*) + *Urochloa decumbens* (iPF1); ii) Gliricídia (*Gliricidia sepium*) + *Urochloa decumbens* (iPF2); iii) Sabiá (*Mimosa caesalpiniiifolia*) + *Urochloa decumbens* (iPF3); iv) Milho (*Zea mays*) + *Urochloa decumbens* (iLP); v) *Urochloa decumbens* (Pastagem). Os dados submetidos a análise de variância e teste de Tukey ($p < 0,05$) demonstraram que a integração Lavoura-Pecuária-Floresta, após o período de quatro anos, ainda não promoveu melhoria física significativa dos atributos físicos do Planossolo em estudo, porém, o índice S apresentou valores satisfatórios. Em relação a condição antecedente a implantação dos sistemas, verifica-se uma alteração positiva na estrutura, refletindo na redução da densidade do solo e aumento da porosidade total.

Palavras-Chave: Curva de retenção, água disponível, índice S, qualidade física do solo.

INTEGRATED CROP-LIVESTOCK SYSTEMS: EFFECTS ON THE PHYSICAL QUALITY OF ANALBAQUALFS IN THE BRAZILIAN SEMIARID

ABSTRACT

¹ Universidade Estadual de Maringá

² Universidade Federal da Paraíba

³ Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

⁴ Universidade Federal Rural de Pernambuco

⁵ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba

* Autor de contacto: pg403039@uem.br



The soils of the Brazilian semi-arid are under a constant process of degradation and sustainable agricultural production strategies must be adopted in order to alleviate this problem. Therefore, the objective of this work was to evaluate the physical-water behavior of an Albaqualfs four years after the implantation of crop-livestock-forest integration systems in the Brazilian semiarid. The experiment was installed in the county of Alagoinha, PB, in an Albaqualfs with a sandy-loam texture. Five integration systems in randomized block design (DBC) with four replications were evaluated: i) Purple Ipe (*Tabebuia impetiginosa*) + *Brachiaria decumbens* (iPF1); ii) *Gliricidia* (*Gliricidia sepium*) + *Urochloa decumbens* (iPF2); iii) Sabiá (*Mimosa caesalpiniiifolia*) + *Urochloa decumbens* (iPF3); iv) Maize (*Zea mays*) + *Urochloa decumbens* (iLP); v) *Urochloa decumbens* (pasture). The data submitted to analysis of variance and Tukey's test ($p < 0.05$) demonstrated that the crop-livestock-forest integrated system, after the period of four years, has not yet promoted significant physical improvement of the attributes of the Albaqualfs under study, however, an attribute such as the S index, presented satisfactory values. Regarding the condition prior to the implantation of the systems, there is a positive change in the structure, reflecting in the reduction of the bulk density of the soil and an increase in the total porosity.

Keywords: Water retention curve, available water, S index, soil physical quality.

INTRODUÇÃO

A integração lavoura-pecuária-floresta é um sistema de produção que tem por finalidade intensificar o uso do solo com o mínimo de impacto às funções ecossistêmicas (Valani *et al.* 2020), através da integração entre os componentes agrícola, pecuário e florestal por meio da rotação, consórcio ou sucessão dentro de uma mesma área de produção, em sinergia (Balbino *et al.* 2011). É uma estratégia de produção mais vantajosa que a agropecuária convencional, pois apresenta menor custo de produção, maior produtividade e menor risco sistemático devido a diversificada fonte de renda (Kichel *et al.* 2014). Esses sistemas podem fornecer soluções adaptáveis aos desafios de sustentabilidade da agricultura no século XXI, que incluem o fornecimento de alimentos e fibras para uma crescente população global cada vez mais dependente de recursos não renováveis (Faust *et al.* 2017). No Brasil, atualmente, existem 11,4

milhões de hectares ocupados com sistemas integrados de produção agropecuária (Rede ILPF, 2019).

Estudos recentes têm evidenciado o potencial dos sistemas integrados de produção agropecuária na melhoria da qualidade física, química e biológica do solo (Bonetti *et al.* 2018; Souza *et al.* 2019; Suárez *et al.* 2021). Dentre os benefícios, destaca-se o potencial na recuperação de pastagens degradadas e manutenção da matéria orgânica do solo (Loss *et al.* 2012), melhoria na formação e estabilidade de agregados do solo (Souza *et al.* 2019), aumento da água disponível às plantas (Pezarico *et al.* 2013), melhora a capacidade de troca catiônica do solo (Cogo *et al.* 2013), elevação da atividade enzimática do solo (Zago *et al.* 2020), aumento da porosidade total do solo (Simioni *et al.* 2016), além de possibilitar o aumento de produtividade das culturas com redução de custos (Conceição *et al.* 2014).



Em ambiente semiárido os sistemas integrados de produção agropecuária têm sido projetados como forma de lidar com as adversidades agroclimáticas das savanas tropicais, ao mesmo tempo que ameniza os efeitos da erosão dos solos e disponibiliza água e nutrientes para as plantas ao longo dos ciclos produtivos (Atangana *et al.* 2014). No entanto, diante da complexidade que esses sistemas apresentam (Moraes *et al.* 2014; Sánchez-Romero *et al.* 2021), é imprescindível conhecer o efeito que a integração entre plantas, animais e espécies florestais promovem às funções ecossistêmicas do solo no médio e longo prazo nas classes de solo que predominam no semiárido. Existem diferentes modalidades de integração com potencial adoção no semiárido brasileiro: integração lavoura-pecuária (iLP), pecuária-floresta (iPF), lavoura-floresta (iLF) e a integração lavoura-pecuária-floresta (iLPF), que se distinguem quanto a complexidade e possivelmente quanto a capacidade de melhoria de qualidade do solo.

As propriedades físicas são boas indicadores de qualidade do solo e podem ser utilizadas na distinção do sistema de integração que expressa melhor eficiência sobre a melhoria de qualidade do solo em ambiente semiárido, no curto, médio e longo prazo. Dentre esses indicadores os mais utilizados são a curva de retenção de água no solo, o índice S e água disponível as plantas (Andrade *et al.* 2013). Magalhães *et al.* (2018), estudando a curva de retenção

de água e o índice S em um solo sob sistemas integrados de produção agropecuária, observaram que a densidade e disposição das árvores influenciaram as propriedades físicas do solo.

Nesse sentido, a hipótese de que a melhoria da qualidade físico-hídrica do solo em ambiente semiárido é influenciada de acordo com a modalidade de sistema integrado de produção agropecuária adotado. O objetivo deste trabalho foi avaliar o comportamento físico-hídrico de um Planossolo Háplico quatro anos após a implantação de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no semiárido da Brasileiro.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização da área experimental

O experimento foi implantado em julho de 2015 em área experimental da Empresa Paraibana de Pesquisa, Extensão Rural e Regularização Fundiária (EMPAER), no município de Alagoinha, no estado da Paraíba, Brasil (06° 57' 00" S e 35° 32' 42" W; 317 m alt.). O clima do município é caracterizado como As', tropical quente e úmido, segundo a classificação climática de Köppen-Geiger (Peel *et al.* 2007), com 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 méxico solódico com horizonte A moderado, de



classificação textural franco-arenosa (Santos *et al.* 2018).

Realizou-se a caracterização física e química do solo da área antes da implantação do experimento até a profundidade de 20 cm, e o resultado obtido foi: 1) Física: 684, 159, 157, e 45 e 674 g kg⁻¹ de areia, silte, argila, argila dispersa em água e grau de floculação, respectivamente; densidade do solo = 1,55 g cm⁻³ e de partículas = 2,61 g cm⁻³; porosidade total = 0,40 m³ m⁻³; 2) Química e fertilidade: pH (H₂O 1:2,5) = 5,44; P = 4,53 mg dm⁻³; K = 135,84 mg dm⁻³; 0,03; 6,14; 0,22; 2,47; 1,26; 4,11 e 10,22 cmol_c dm⁻³ de Na⁺, H⁺+Al⁺³, Ca⁺², Mg⁺², SB e CTC, respectivamente e, 10,83 g kg⁻¹ de carbono orgânico total.

Antes da implantação do experimento, a área encontrava-se cultivada com *Urochloa decumbens* sob pastejo extensivo com bovinos das raças Sindi e Guzerá. No mês de setembro de 2015 implantou-se o componente arbóreo com espécies florestais *Gliricidia sepium* (Gliricídia), *Mimosa caesalpiniaefolia* (Sabiá) e *Handroanthus impetiginosus* (Ipê roxo), com espaçamento de 2x3 m, totalizando seis renques, três em cada extremidade da parcela. O componente agrícola foi realizado da seguinte ordem cronológica: safra 15/16: cultivado milho + *Urochloa decumbens*; na safra 16/17: Soja + sorgo; na safra 17/18: algodão + feijão caupi e na safra 18/19: Gergelim + sorgo + amendoim. Em janeiro de 2019 foram

inseridas 30 unidades animal (UA) da raça Sindi na área experimental, que pastejaram por 35 dias. Logo após a retirada dos animais, procedeu-se a amostragem de solo.

Delineamento experimental, coleta e preparo de amostras

O delineamento experimental adotado foi em blocos casualizados, com cinco sistemas e quatro repetições (5 x 4), totalizando 20 parcelas experimentais, cada parcela com dimensões de 38 x 20 m, totalizando 760 m². Os tratamentos avaliados foram compostos pelos seguintes sistemas: iPF1) *Urochloa decumbens* Stapf. + Ipê roxo (*Tabebuia impetiginosa*); iPF2) *Urochloa decumbens* Stapf. + Gliricídia (*Gliricidia sepium*); iPF3) *Urochloa decumbens* Stapf. + Sabiá (*Mimosa caesalpiniaefolia*); iLP) *Urochloa decumbens* Stapf. + milho (*Zea mays*) e Pastagem - *Urochloa decumbens* Stapf., este último foi utilizado como tratamento referência.

Nas parcelas experimentais com componente arbóreo, as amostras foram coletadas sob o renque das espécies florestais, sendo dois pontos amostrais por extremidade, com distância de 10 metros sob e 20 metros entre renques. Nas parcelas sem o componente arbóreo, as amostras foram coletadas em pontos amostrais pré-definidos, com uma grade amostral de 10 m entre os pontos.

Foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada em anéis metálicos do



tipo Umland com volume de 102,09 cm³. Foram duas camadas de solo avaliadas (0-10 e 10-20 cm). Após as coletas, as amostras de solo foram encaminhadas ao Laboratório de Análises Físicas de Solo da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) para a realização de análises.

Indicadores de qualidade do solo analisados

Densidade do solo (ρ_s), densidade máxima do solo (ρ_{MAX}), grau de compactação (GC), condutividade hidráulica saturada (K_θ), curva de retenção de água no solo (CRA), índice S, potencial matricial no ponto de inflexão (Ψ_i), umidade do solo no ponto de inflexão (θ_{INFL}), capacidade de campo (θ_{CC}), ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), água disponível (θ_{AD}) e água prontamente disponível às plantas (θ_{APD}), umidade do solo em que a porosidade de aeração é 10% (θ_{ar}), capacidade de campo relativa (CCr).

Densidade do solo e grau de compactação

A densidade do solo (ρ_s) foi determinada nas amostras de solo com estrutura indeformada conforme Blake & Hartge (1986), através da relação entre a massa do solo seco e o volume da amostra. A densidade máxima do solo (ρ_{MAX}) foi determinada utilizando uma função de pedotransferência (FTP) proposta por Marcolin & Klein (2011), conforme apresentado na equação 1:

$$\rho_{MAX} = (2,03133855 - 0,00320878 * MOS - 0,00076508 * Argila) \quad (1)$$

onde, ρ_{MAX} é a densidade máxima do solo (g cm⁻³); MOS é o teor de matéria orgânica do solo (g kg⁻¹) e Argila (g kg⁻¹).

Com os dados de densidade do solo e densidade máxima determinou-se o grau de compactação do solo (Equação 2).

$$GC = \left[\frac{\rho}{\rho_{MAX}} \right] * 100 \quad (2)$$

onde ρ é a densidade do solo (adimensional); ρ_{MAX} é a densidade máxima do solo (g cm⁻³); GC é o grau de compactação do solo (%).

Condutividade hidráulica saturada

A condutividade hidráulica saturada (K_θ) foi determinada de acordo com Teixeira *et al.* (2017). Adotou-se as amostras anteriormente utilizadas na determinação da curva de retenção de água no solo, com volume conhecido de 102,09 cm³. As amostras foram saturadas e após 48 horas foram introduzidas em permeâmetro de carga constante até atingir o equilíbrio na taxa de percolação de água. O cálculo da condutividade foi realizado utilizando a equação 3:

$$K_\theta = \frac{Q L}{A H T} \quad (3)$$

Curva de retenção de água no solo (CRA), índice S e água disponível

Para a determinação da curva de retenção de água no solo (CRA), as amostras com estrutura preservada (102,09 cm³) foram saturadas por capilaridade durante



72 horas e, em seguida, submetidas aos potenciais matriciais (Ψ_m) -60hPa em mesa de tensão; -100, -330, -1000, -3000, -5000, -10000 e -15000hPa em câmara de Richards com placas porosas (Klute, 1965). Em seguida os dados de umidade do solo foram ajustados de acordo com os procedimentos sugeridos por van Genuchten (1980), usando o programa SWRC (Dourado Neto *et al.* 2000), para determinação dos coeficientes utilizados na equação 4.

$$\theta = \theta_r + \left\{ \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha |\Psi_m|)^m]} \right\} \quad (4)$$

onde, θ é teor de água ($m^3 m^{-3}$) correspondente ao respectivo (Ψ_m) após o equilíbrio; θ_s é o teor de água determinado na saturação ($m^3 m^{-3}$); θ_r é a umidade residual do solo ($m^3 m^{-3}$); n , m e α são parâmetros empíricos da curva de retenção, com α expresso em kPa^{-1} ; m é a restrição ($m = 1 - 1/n$) (Mualem, 1976).

O índice S foi determinado conforme descrito por Dexter (2004), utilizando a equação 5.

$$S = - (\theta_s - \theta_r) \left[1 - \frac{1}{n} \right] - (1+m) \quad (5)$$

onde, S é o valor de inclinação da CRA no ponto de inflexão.

Conforme proposto por Dexter (2004), os valores foram apresentados em módulo, de forma a facilitar a discussão e compreensão dos resultados (adimensional). O potencial matricial no ponto de inflexão (Ψ_i) e a umidade no ponto de inflexão

(θ_{INFL}), foram determinados utilizando as Equações 6 e 7 (Dexter & Bird, 2001):

$$\Psi_i = \frac{1}{\alpha} \left[\frac{1}{m} \right]^{1/n} \quad (6)$$

$$\theta_{INFL} = (\theta_r - \theta_r) \left[1 + \frac{1}{m} \right]^m + \theta_r \quad (7)$$

onde, Ψ_i é o potencial matricial no ponto de inflexão (kPa) e θ_{INFL} é a umidade do solo no ponto de inflexão ($m^3 m^{-3}$).

A água prontamente disponível às plantas (θ_{APD} ; $m^3 m^{-3}$), foi determinada através da relação entre [$(\Psi_m - 60) - (-1000hPa)$] (Barbosa *et al.* 2014). A capacidade de campo (θ_{CC} ; $m^3 m^{-3}$), o ponto de murcha permanente (θ_{PMP} ; $m^3 m^{-3}$) e a água disponível (θ_{AD} ; $m^3 m^{-3}$), foram determinados conforme proposto por Richards (1947). Por ser um solo arenoso, utilizou-se o potencial matricial de $\Psi_m = -100hPa$ para a θ_{CC} e $-15000 hPa$ para o θ_{PMP} . A θ_{AD} foi obtida através da relação entre a ($\theta_{CC} - \theta_{PMP}$) (Richards & Weaver, 1943). A umidade do solo em que a porosidade de aeração é 10% (θ_{ar}) foi determinada de acordo como descrito por Silva *et al.* (1994), utilizando a equação 8:

$$\theta_{ar} = \left[1 - \left(\frac{\rho_s}{\rho} \right) \right] - 0,1 \quad (8)$$

onde θ_{ar} umidade do solo em que a porosidade de aeração é 10% ($m^3 m^{-3}$); ρ_s é a densidade do solo ($g cm^{-3}$); ρ é a densidade de partículas ($g cm^{-3}$).

A capacidade de campo relativa (CCr) foi determinada conforme descrito por



Reynolds *et al.* (2007), utilizando a equação 9.

$$CCr = \frac{\theta_{cc}}{\theta_s} \quad (9)$$

onde CCr é a capacidade de campo relativa (adimensional); θ_{cc} é a capacidade de campo correspondente ao potencial de -10 kPa ($m^3 m^{-3}$); θ_s é a umidade do solo saturado ($m^3 m^{-3}$).

Análise estatística

Os valores médios dos atributos físicos do solo correspondentes aos diferentes sistemas foram analisados por meio da análise de variância, e pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), utilizando o *software* R (R Development Core Team, 2013). As camadas foram analisadas separadamente, de forma a evitar equívocos na interpretação dos resultados, pois entende-se que o efeito de um sistema de manejo sobre o solo na camada superficial é mais dinâmico do que em subsuperfície.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 encontram-se apresentados os valores médios de densidade do solo (ρ_s), densidade máxima (ρ_{MAX}), densidade relativa (ρ_R), grau de compactação (GC) e condutividade hidráulica saturada (K_θ). Observa-se que não houve diferença significativa entre os sistemas avaliados, contudo, constatou-se um aumento na densidade do solo em profundidade, com destaque para o iLP,

onde o incremento foi de $0,08 g cm^{-3}$ entre as camadas de 0-10 e 10-20 cm. Nos sistemas iPF1 e iPF3, também houve incremento de densidade em subsuperfície, contudo em menor intensidade. Os indicadores ρ_{MAX} e ρ_R mantiveram tendência estável nas camadas de solo avaliadas, com variação de $1,79$ a $1,84 g cm^{-3}$ para ρ_{MAX} e $0,72$ a $0,74$ para a ρ_R .

Enfatiza-se que a ρ_s ficou abaixo do limite crítico em todos os sistemas avaliados, que segundo Reynolds *et al.* (2007) é de $1,40$ a $1,60 g cm^{-3}$ para solos de textura média. A ρ_{MAX} do solo não diferiu entre os sistemas, contudo no iPF2 obteve-se média de $1,84 g cm^{-3}$ na camada 10-20 cm, sendo, portanto, a mais restritiva. Para Braida *et al.* (2006), valores não significativos de ρ_{MAX} podem estar relacionados ao baixo teor de matéria orgânica do solo e argila. O resultado da ρ_{MAX} refletiu no grau de compactação do solo, contudo, sem diferença significativa entre os sistemas avaliados (Tabela 1).

A K_θ variou de moderada a lenta entre os sistemas, conforme classificação apresentada pelo SoilSurvey (1993). Maior amplitude foi verificada no tratamento iPF1 (Tabela 1), com $12,01 cm h^{-1}$ de diferença entre a camada de 10-20 cm, sendo maior que a K_θ da pastagem. Apesar de não diferir dos demais, o resultado do iPF1 demonstra tendência de melhoria da K_θ , provavelmente influenciada pelo aumento da macroporosidade. Resultado semelhante foi verificado por Salles *et al.* (2018),



avaliando atributos físicos do solo sob sistemas integrados de produção agropecuária. Para os autores, a redução da K_{θ} em subsuperfície está relacionada ao aumento de densidade do solo e redução da macro e bioporosidade do solo.

Tabela 1. Densidade do solo (ρ_s), máxima (ρ_{MAX}), grau de compactação (GC) e condutividade hidráulica saturada (K_{θ}) em Planossolo sob sistemas integrados de produção agropecuária e pastagem semiárido brasileiro.

Table 1. Bulk density (ρ_s), maximum (ρ_{MAX}), degree of compaction (DC) and saturated hydraulic conductivity (K_{θ}) in Albaqualfs under Integrated Crop-Livestock systems and pasture in the Brazilian semi-arid.

Sistema	ρ_s	ρ_{MAX}	GC	K_{θ}
	g cm ⁻³		%	cm h ⁻¹
0-10 cm				
iPF1	1,37 a	1,81 a	75,9 a	14,61 a
iPF2	1,37 a	1,84 a	74,4 a	5,31 a
iPF3	1,35 a	1,83 a	73,9 a	8,44 a
Pastagem	1,31 a	1,81 a	72,4 a	5,86 a
iLP	1,33 a	1,82 a	73,0 a	8,44 a
CV %	3,1	1,2	3,1	124,9
10-20 cm				
iPF1	1,41 a	1,79 a	78,8 a	6,32 a
iPF2	1,38 a	1,84 a	75,0 a	3,96 a
iPF3	1,41 a	1,82 a	77,4 a	3,15 a
Pastagem	1,36 a	1,82 a	75,0 a	4,42 a
iLP	1,40 a	1,82 a	77,0 a	4,39 a
CV %	3,3	1,1	3,9	79,9

iPF1 = Urochloa decumbens + Ipê, iPF2 = Urochloa decumbens + Gliricídia, iPF3 = Urochloa decumbens + Sabiá, Pastagem = Urochloa decumbens, iLP = Urochloa decumbens + milho, CV = Coeficiente de variação. Médias seguidas de letras iguais nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

As CRA referentes as camadas de 0-10 e 10-20 cm são apresentadas na Figura 1 (A e B) e os parâmetros de ajuste na Tabela 2. As CRA correspondentes aos sistemas iPF1, PF3 e iLP na camada de 0-10 cm apresentaram o mesmo comportamento

entre -100 e -1500 kPa, com valores de θ_s variando de entre 0,440 a 0,449 m³ m⁻³ (Figura 1A).

O mesmo comportamento foi verificado por Portela *et al.* (2001), avaliando a retenção de água no solo no

ecossistema dos tabuleiros costeiros do Nordeste Brasileiro. Segundo os autores, esse comportamento está relacionado ao predomínio de microporos nesse solo, que reflete na maior capacidade de retenção de água. Silva *et al.* (2019), avaliando a qualidade física do solo da mesma área de estudo confirmaram o predomínio de

microporos nos diferentes sistemas avaliados, que segundo ele, deve-se a baixa qualidade estrutural apresentada pelo Planossolo em questão.

A acentuada inclinação das curvas (Figura 1A e B), indica um decréscimo abrupto no

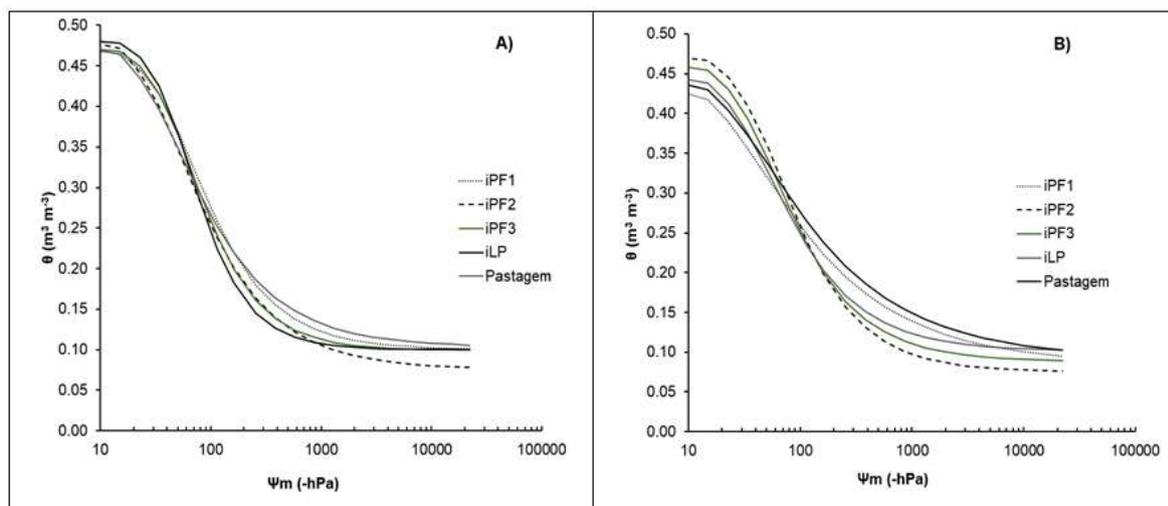
Tabela 2. Parâmetros de ajustes das CRA de um Planossolo sob sistemas integrados de produção agropecuária e pastagem semiárido brasileiro.

Table 2. Adjustment coefficients of the SWRC of an Albaqualfs under Integrated Crop-Livestock systems and pasture in the Brazilian semiarid.

Sistema	θ_s ----- m ³ m ⁻³ -----	θ_r ----- m ³ m ⁻³ -----	α hPa ⁻¹	m	n	R ²
0-10 cm						
iPF1	0,483 a	0,100 a	0,0206 a	0,482 a	1,933 a	0,96
iPF2	0,505 a	0,076 a	0,0274 a	0,447 a	1,809 a	0,97
iPF3	0,483 a	0,099 a	0,0199 a	0,526 a	2,113 a	0,96
Pastagem	0,490 a	0,100 a	0,0193 a	0,572 a	2,341 a	0,97
iLP	0,498 a	0,103 a	0,0292 a	0,435 a	1,770 a	0,98
CV %	5,6	17,1	21,9	28,1	43,1	1,6
10-20 cm						
iPF1	0,467 a	0,084 a	0,0420 a	0,342 a	1,5201 a	0,98
iPF2	0,486 a	0,075 a	0,0210 a	0,487 a	1,9529 a	0,96
iPF3	0,479 a	0,088 a	0,0241 a	0,472 a	1,8955 a	0,97
Pastagem	0,467 a	0,101 a	0,0274 a	0,457 a	1,8427 a	0,98
iLP	0,471 a	0,091 a	0,0366 a	0,342 a	1,5207 a	0,97
CV %	5,4	17,2	51,0	24,4	37,5	1,6

iPF1 = Urochloa decumbens + Ipê, iPF2 = Urochloa decumbens + Gliricídia, iPF3 = Urochloa decumbens + Sabiá, Pastagem = Urochloa decumbens, iLP = Urochloa decumbens + milho, CV = Coeficiente de variação, θ_s Umidade de saturação, θ_r Umidade residual. Médias seguidas de letras iguais nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).





iPF1 = *Brachiaria decumbens* + Ipê, iPF2 = *Brachiaria decumbens* + Glicídia, iPF3 = *Brachiaria decumbens* + Sabiá, Pastagem = *Brachiaria decumbens*, iLP = *Br. decumbens* + milho.

Figura 1. Curva de retenção de água no solo (CRA) de um Planossolo sob sistemas integrados de produção agropecuária e pastagem semiárido brasileiro. (A) 0-10 cm e (B) 10-20 cm.

Figure 1. Soil water retention curve (SWRC) of an Albaqualfs under Integrated Crop-Livestock systems and pasture in the Brazilian semi-arid. (A) 0-10 cm and (B) 10-20 cm.

conteúdo de água no solo para os sistemas iPF1, iPF2, iPF3 e iLP. Esse decréscimo geralmente ocorre em solos que apresentam duas classes de poros bem definidas, macroporos que perdem água facilmente em baixas tensões e microporos, que retém água em altas tensões (Carducciet al., 2013; Silva et al., 2017).

Na camada de 10-20 cm, observa-se que as curvas apresentaram comportamento distinto em relação as curvas da camada de 10-20 cm, principalmente para os tratamentos iPF1, pastagem e iLP, entre os potenciais -100 e -1000 hPa. Nos sistemas iPF2 e iPF3 verifica-se uma queda acentuada na umidade do solo com redução do potencial matricial (Figura 1B). Esse comportamento decorre das características do solo que influenciam a CRA, como

estrutura e textura (Mota et al., 2017). Nesse sentido, verifica-se que os sistemas de integração ainda não modificaram a estrutura do solo, de forma a elevar o teor de água disponível às plantas.

Os parâmetros de ajuste das CRA não diferiram entre os sistemas avaliados (Tabela 2), e o θ_r ficou abaixo de $0,100 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Esse resultado atenta para a reduzida capacidade de retenção de água no Planossolo independente do sistema de integração avaliado. Para Fidalski et al. (2013), valores baixos de θ_r estão relacionados a granulometria do solo, principalmente se neste houver predomínio de areia grossa. A maioria dos valores de n foram $>1,30$, destacando-se o sistema iPF2 com 2,93 na camada de 010 cm e 2,60 para o iPF2 e iPF3 na camada de 10-20 cm.

Os valores de potencial matricial e umidade no ponto de inflexão encontram-se na Tabela 3. O Ψ_i não foi influenciado pelos diferentes sistemas de integração e a pastagem. Esse resultado indica que a energia relacionada à capacidade de retenção de água no solo sob esses sistemas é praticamente igual entre -60 e -1000 hPa. Valores encontrados nesse estudo corroboram com valores obtidos por Barbosa *et al.* (2014), avaliando a utilização de Zeólitas na atenuação do déficit hídrico em Latossolo do bioma Cerrado. Para os

autores, valores elevados de Ψ_i condicionam perdas muito menores de água drenável pelo solo. De maneira geral a média do Ψ_i na camada de 10-20 cm (-82,63 hPa) foi superior que o Ψ_i da camada 0-10 cm (-79,61 hPa), bem abaixo da capacidade de campo. Isso significa que a retenção de água na camada de 10-20 cm deve estar sendo influenciada pelo acentuado acréscimo no teor de argila e pelo predomínio de microporos nessa camada (Silva *et al.*, 2019)

Tabela 3. Potencial matricial no ponto de inflexão (Ψ_i), umidade no ponto de inflexão (θ_{INFL}), água prontamente disponível (θ_{APD}) e índice S de um Planossolo sob sistemas integrados de produção agropecuária e pastagem semiárido brasileiro.

Table 3. Matrix potential at the inflection point (Ψ_i), humidity at the inflectionpoint (θ_{INFL}), water readily available (θ_{WRA}) and S index of an Albaqualfs under Integrated Crop-Livestock systems and pasture in the Brazilian semiarid.

Sistemas	Ψ_i -hPa	θ_{INFL} -----	θ_{APD} m ³ m ⁻³ -----	S -----
0-10 cm				
iPF1	81,96 a	0,303 a	0,233 a	0,199 a
iPF2	80,45 a	0,282 a	0,230 a	0,122 a
iPF3	79,11 a	0,298 a	0,229 a	0,215 a
Pastagem	83,62 a	0,290 a	0,199 a	0,107 a
iLP	72,92 a	0,290 a	0,226 a	0,221 a
CV %	3,7	3,4	16,2	65,2
10-20 cm				
iPF1	87,31 a	0,274 a	0,179 a	0,078 a
iPF2	86,68 a	0,274 a	0,245 a	0,091 a
iPF3	81,86 a	0,283 a	0,225 a	0,188 a
Pastagem	79,57 a	0,288 a	0,185 a	0,107 a
iLP	77,75 a	0,275 a	0,192 a	0,178 a
CV %	3,7	3,4	16,2	53,3

iPF1 = Urochloa decumbens + Ipê, iPF2 = Urochloa decumbens + Gliricídia, iPF3 =Urochloa decumbens + Sabiá, Pastagem = Urochloa decumbens, iLP = Urochloa decumbens + milho, CV = Coeficiente de variação. Médias seguidas de letras iguaisnas colunas, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).



Para a θ_{INFL} , verifica-se que os valores médios foram superiores a $0,200 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, nos sistemas avaliados, em ambas profundidades (Tabela 3). Esse resultado demonstra haver um equilíbrio no teor de água entre os poros estruturais (drenáveis em baixa tensão) e os texturais (drenáveis em altas tensões). Para Carducci *et al.* (2015), a θ_{INFL} e o Ψ_i representam o limite de separação entre os macroporos e os poros de demais tamanho.

A θ_{APD} não diferiu entre os sistemas ($p < 0,05$), variando de $0,199$ a $0,233 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ na camada de 0-10 cm e de $0,185$ a $0,245 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ na camada de 10-20 cm (Tabela 3). Enfatiza-se, então, que a θ_{APD} na camada de 0-10 cm pode ser mais facilmente aproveitada pelas plantas que a θ_{APD} da camada de 10-20 cm.

Em relação ao índice S, verifica-se que não houve diferença significativa entre os sistemas, contudo houve uma melhor expressividade no iLP ($S = 0,221$). A associação entre duas poáceas (milho e *Urochloa decumbens*) no iLP podem estar contribuindo para a melhoria da qualidade estrutural do solo em função do aporte de carbono. As gramíneas apresentam relação C:N maior que as leguminosas e se decompõem mais lentamente e podem auxiliar na melhoria da qualidade estrutural do solo (Tabela 3). Todos os valores de S ficaram acima do limite crítico $S > 0,020$ (Dexter, 2004). Os valores médios variaram de $0,107$ a $0,215$ na profundidade 0-10 cm e

de $0,078$ a $0,188$ na profundidade de 10-20 cm. Valores semelhantes foram encontrados por Nascimento *et al.* (2019), em Latossolo e Cambissolo sob sistemas integrados de produção agropecuária.

Houve redução nos valores de S em profundidade, fato este que está diretamente relacionado ao aumento de ρ_s e redução na macroporosidade do solo. Maia (2011) avaliando a qualidade do solo através do índice S encontrou valores médios variando de $0,167$ a $0,652$; segundo o autor, valores elevados de S estão relacionados a fatores como: a unidade utilizada para o cálculo de umidade do solo, ao nível de restrição utilizado no ajuste das curvas de retenção e aos valores de densidade do solo.

A θ_{CC} , o θ_{PMP} a θ_{AD} a θ_{ar} e a CCr não diferiram entre os sistemas avaliados ($p < 0,05$) (Tabela 3). A θ_{AD} está dentro da faixa considerada como limitante, que corresponde a $0,100 < \theta_{AD} \leq 0,150 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Reynolds *et al.*, 2007). Valores baixos de θ_{AD} podem ocasionar retardo no desenvolvimento das plantas por não as satisfazer com o suprimento adequado de água. A θ_{ar} variou de $0,360$ a $0,400 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, contudo sem diferença entre os sistemas avaliados. A θ_{ar} foi superior a θ_{cc} em todos os sistemas, indicando que nesse solo não há espaços porosos suficientes para prover a oxigenação e uma melhor difusão de gases.

A CCr não diferiu entre os tratamentos avaliados (Tabela 4) e todos os



valores médios ficaram abaixo de 0,6. Nesse sentido, presume-se que o solo está sob estresse hídrico/falta de água por ocasião do volume de poros ocupados por ar. Para Olness *et al.* (1998), a CCr é considerada adequada quando os valores estão dentro da faixa $0,6 < CCr \leq 0,7$. Independente do tratamento e camada de solo avaliada, no

presente estudo observou-se que o Planossolo apresenta limitações físicas relacionadas à água no solo. Problemas esses que podem ser confirmados através do comportamento apresentado pelas curvas de retenção de água no solo e pela baixa disponibilidade de água às plantas.

Tabela 4. Capacidade de campo (θ_{CC}), ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), água disponível (θ_{AD}), porosidade livre de ar (θ_{ar}) e capacidade de campo relativa (CCr) de um Planossolo sob sistemas integrados de produção agropecuária e pastagem semiárido brasileiro

Table 4. Field capacity (θ_{FC}), permanent wilt point (θ_{PWP}), available water (θ_{AW}), field air porosity (θ_{ar}) and relative field capacity (R_{FC}) of an Albaqualfs under Integrated Crop-Livestock systems and pasture in the Brazilian semiarid.

Sistemas	θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{AD}	θ_{ar}	CCr
	m ³ m ⁻³				
0-10 cm					
iPF1	0,234 a	0,102 a	0,132 a	0,380 a	0,487 a
iPF2	0,209 a	0,078 a	0,130 a	0,400 a	0,438 a
iPF3	0,208 a	0,100 a	0,108 a	0,380 a	0,420 a
Pastagem	0,239 a	0,107 a	0,132 a	0,390 a	0,474 a
iLP	0,214 a	0,099 a	0,114 a	0,380 a	0,447 a
CV %	11,2	15,8	12,9	4,0	12,7
10-20 cm					
iPF1	0,234 a	0,097 a	0,137 a	0,360 a	0,507 a
iPF2	0,215 a	0,076 a	0,138 a	0,380 a	0,452 a
iPF3	0,214 a	0,102 a	0,112 a	0,370 a	0,458 a
Pastagem	0,259 a	0,105 a	0,153 a	0,360 a	0,541 a
iLP	0,209 a	0,090 a	0,119 a	0,360 a	0,448 a
CV %	9,5	16,2	13,3	4,0	11,6

iPF1 = Urochloa decumbens + Ipê, iPF2 = Urochloa decumbens + Gliricídia, iPF3 = Urochloa decumbens + Sabiá, Pastagem = Urochloa decumbens, iLP = Urochloa decumbens + milho, CV = Coeficiente de variação. Médias seguidas de letras iguais nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).



Os valores observados nesses estudos foram inferiores aos obtidos por Nascimento *et al.* (2019), em Latossolo de textura franco-arenosa. Segundo os autores, valores baixos de CCr podem estar relacionados ao baixo conteúdo de matéria orgânica do solo. Mesmo estando sob sistemas conservacionistas de produção agropecuária, o presente estudo evidencia restrições físicas intrínsecas dos Planossolos (Souza *et al.*, 2013).

CONCLUSÕES

A integração Lavoura-Pecuária-Floresta, após o período de quatro anos, ainda não promoveu melhoria física significativa dos atributos do Planossolo em estudo, porém, atributo como o índice S, apresentou valores dentro de uma faixa satisfatória.

Em relação a condição antecedente a implantação dos sistemas, verifica-se uma alteração positiva na estrutura, refletindo na redução da densidade do solo e aumento da porosidade total.

A umidade do solo na qual a porosidade é 10% e capacidade de campo relativa demonstram que o solo apresenta algumas limitações físicas como baixa capacidade de aeração, armazenamento e disponibilidade de água para as plantas.

REFERÊNCIAS

Andrade, RS; LF Stone & SG Godoy. 2013. Estimativa da resistência do solo à penetração baseada no

índice S e no estresse efetivo. R. Bras. de Eng. Agr. e Ambiental, 17:932-937.

Atangana A., D Khasa, S Chang & Degrande A. 2014. Major Agroforestry Systems of the Semiarid Tropics. In: Tropical Agroforestry. Springer, Dordrecht.

Balbino, LC *et al.* 2011. Evolução tecnológica em arranjos produtivos de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no Brasil. Pesq. Agr. Brasileira, 46:1-12.

Barbosa, SM; GC Oliveira; CE Carducci & BM Silva. 2014. Potencialidade de usos de Zeólitas na atenuação do déficit hídrico em Latossolo do Cerrado. Semina. Ci. Agrárias, 35:2357-2368.

Blake, GR & KH Hartge. 1896. Bulk density. In: A Klute (ed.). Methods of Soil Analysis, Part 1- Physical and Mineralogical Methods. Vol. 1. 1ra ed pp. 363-382. American Society of Agronomy.

Bonetti, JA; HB Paulino; ED Souza; MAC Carneiro & JO Carneiro. 2018. Soil physical and biological properties in an integrated crop-livestock system in the Brazilian Cerrado. Pesq. Agropec. Bras., 53:1239-1247.

Braida, JA; JM Reichert; M Veiga & DJ Reinert. 2006. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio de Proctor. R. Bras. de Ci. Solo, 30: 605-614.

Carducci, CE; GC Oliveira; LM Oliveira; SM Barbosa & ÉA Silva. 2015. Retenção de água do solo sob sistema conservacionista de manejo com diferentes doses de gesso. R. Bras. Ci. Agrárias, 58:284-291.

Carducci, CE; GC Oliveira; WM Zeviani; VMP Lima & ME Serafim. 2013. Bimodal pore distribution on soils under conservation management system for coffee crop. R. Eng. Agri. Ambiental, 33:291-302.

Cogo, FD; CFA Júnior; YL Zinn; MDS Júnior; EN Alcântara & PTG Guimarães. 2013. Estoques de carbono orgânico do solo em cafezais sob diferentes sistemas de controle de plantas invasoras. Semina. Ci. Agr., 34:1089-1098.

Conceição, PC; C Bayer; J Dieckow & DC Santos. 2014. Fracionamento físico da matéria orgânica e índice de manejo do carbono de um Argissolo



- submetido à sistemas conservacionistas de manejo. *Ci. Rural*, 4:794-800.
- Dexter, AR & NRA Bird. 2001. Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. *SoilTill. Res.*,57:203-212.
- Dexter, AR. 2004. Soil physical quality part I, theory, effects, density and organic matter and effects on root growth. *Geoderma*, 120:201-214.
- Dourado Neto, D; DR Nielsen; JW Hopmans; K Reichardt & OOS Bacchi. 2000. Software to model soil water retention curve SWRC version 2.00. *Sci. Agricola*,57:191-192.
- Faust, D.R.; S kumar; DW Archer; JR Hendrickson; SL Kronberg & MA Liebig. 2017. Integrated crop-livestock systems and water quality in the northern great plains: Review of current practices and future research needs. *Env. Soil Quality*. 16:1-15.
- Fidalski, J; CA Tormena; SJ Alvez & PAM Auler. 2013. Influência das frações de Areia na retenção e disponibilidade de água em solos das formações Caiuá e Paranavaí. *R. Bras. de Ci. Solo*, 37:613-621.
- Kichel, AN; JAA Costa; RG Almeida & VT Paulino. 2014. Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta: Experiências no Brasil. *Bol. Ind. Animal*, 71:94-105.
- Klein, VA. 2006. Densidade relativa: um indicador de qualidade física de um Latossolo Vermelho. *R. Ci. Agrovet.*, 5:26-32.
- LOSS, A; MG Pereira; A Perin; SJ Beutler & LHC Anjos. 2012. Carbon, nitrogen and natural abundance of $\delta^{13}C$ e $\delta^{15}N$ of light-fraction organic matter under no-tillage and crop-livestock integration systems. *Acta Sci. Agr.*,34:465- 472.
- Magalhães, WA; OS Freddi; FJ Wruck; FA Petter & RFR Tavanti. 2018. Soil water retention curve and S-index as soil physical quality indicators for integrated production systems. *Eng. Agr.* 38:64-73.
- Maia, CE. 2011. Índice S para avaliação da qualidade física de solo. *R. Bras. de Ci. Solo*.35:1959-1965.
- Marcolin, CD & VA Klein. 2011. Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima. *Acta Sci. Agr.*33:349-354.
- Moraes, A; PCF Carvalho; I Anghinoni; Lustosa SBC; SEVGA Costa & TR Kunrath. 2014. Integrated crop-livestock systems in the Brazilian subtropics. *Europ. J. Agronomy*, 57:4-9.
- Mota, JCA; PL Libardi; AS Brito; SO Moraes; IV Nascimento & TL Alencar. 2017. Variabilidade espacial dos parâmetros da equação de van Genuchten em um Latossolo Vermelho Amarelo. *Agro@ambiente on-line*.11:92-100.
- Mualem, I. 1976. Hydraulic conductivity of unsaturated soils: prediction and formulas. In: Klute, A. (Ed.). *Methods of soil analysis: I Physical and mineralogical methods*. American Society of Agronomy.
- Nascimento, DM; KMV Cavalieri-Polizeli; AH Silva; N Favaretto & LM Parron. 2019. Soil physical quality under long-term integrated agricultural production systems. *Soil Till. Res.*, 186: 292-299.
- Olness, A; CE Clapp; R Liu & AJ Palazzo. 1998. Biosolids and their effects on soil properties. In: A Wallace, (ed.). *Hand book of soil conditioners*. Vol. 1. 1ra ed. Pp. 141-165. Marcel Dekker.
- Peel, MC; BL Finlayson & TA McMahon. 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydr. Earth S. Sciences*, 11:1633-1644.
- Pezarico, CR; ACT Vitorino; FM Mercante & O Daniel. 2013. Indicadores de qualidade do solo em sistemas agroflorestais. *R. Ciênc. Agrár.* 56:40-47.
- Portela, JC; PL Libardi & QJ Van Lier. 2001. Retenção da água em solo sob diferentes usos no ecossistema tabuleiros costeiros. *R. Bras. Eng. Agr. Ambiental*, 5:49-54.
- R Development Core Team. 2013. *A language and environment for statistical computing*. Vienna: R Foundation for Statistical Computing.
- Rede iLPF. 2019. Integração lavoura-pecuária-floresta em números. Disponível em: <https://www.redeilpf.org.br/index.php/rede-ilpf/ilpf-em-numeros>.
- Reynolds, WW; CF Drury; XM Yang; CA Fox; CS Tan & TQ Zhang. 2007. Land management effects on the



- near-surface physical quality of a clay loam. *Soil Till. Res.*, 96:316-330.
- Richards, LA. 1947. Pressure-membrane apparatus, conduction and use. *Agr. Engineering*, 28:451-454.
- Richards, LA. & LR Weaver. 1943. Fifteen-atmosphere percentage as related to the permanent wilting percentage. *SoilSci.*, 56:331-339.
- Salles, A; AR Silva; CAC Veloso; EJM Carvalho & BM Miranda. 2018. Carbono orgânico e atributos físicos do solo sob manejo agropecuário sustentável na Amazônia legal. *Coll. Agr.*, 14:1-15.
- Sánchez-Romero, R; P Balvanera; A Castillo; F Mora; LE García-Barrios & CE González-Esquivel. 2021. Management strategies silvopastoral practices and socioecological drivers in traditional livestock systems in tropical dry forest: An integrated analysis. *Forest Ecol. Manag.*, 479:1-10.
- Santos, HG; PKT Jacomine; LHC Anjos; VÁ Oliveira; JF Lumbreiras; MR Coelho; JA Almeida; JC Araújo Filho; JB Oliveira & TJF Cunha. 2018. Sistema brasileiro de classificação de solos SiBICS. Brasília: Embrapa.
- Silva, AP; BD Kay & E Perfect. 1994. Characterization of the least limiting water range. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:1775-1781.
- Silva, ÉA; PAN Benevenuto & LBB Melo. 2017. Qualidade física de um Latossolo estimada por estudos de curvas de retenção de água, indicadores de fácil determinação e índice S. *Tecn. Ci. Agr.*, 11:49-54.
- Silva, PLF; FP de Oliveira; DD Tavares; CC da Nóbrega & AJ do Amaral. 2019. Water availability in a Planosol under integrated crop-livestock-forest system in the A greste region of Paraíba, Brazil. *R. Caatinga*, 32:449-457.
- Simione, FJ; MLC Bartz; LP Wildner; E Spagnolo; M Veiga & D Baretta. 2016. Economic and soil quality indicators in soybean crops grown under integrated crop-livestock and winter-grain cultivation systems. *Ci. Rural*, 46:1165-1171.
- Soil Survey Staff. 1993. Keys to soil taxonomy. Washington: Natural Resources Conservation Service.
- Souza, AR; SF Albuquerque; GMB Lopes; AB Silva & J Nunes Filho. 2013. Caracterização e interpretação de um Planossolo Háplico eutrófico do Agreste pernambucano, Brasil. *Anais da Acad. Pe. Ci. Agr.*, 10:271-279.
- Souza, ED; CRM Silva; FA Pinto; MAC Carneiro; HB Paulino; LP Pacheco; FD Terra & JVS Laroca. 2019. Soil quality indicators after conversion of "murundu" fields into no-tillage cropping in the Brazilian Cerrado. *Pesq. Agr. Bras.*, 54:1-9.
- Suárez, RL; JCS Salazar; F Casanoves & MAN Bieng. 2021. Cacao agroforestry system improve soil fertility: Comparison of soil properties between forest, cacao agroforestry systems, and pasture in Colombian Amazon. *Agr. Eco. Environ.*, 314:1-15.
- Teixeira, PC; GK Donagemma; A Fontana & WG Teixeira. 2017. Manual de métodos e análise de solos. Embrapa.
- Valani, GP; AF Martini; LFS Silva; RC Bori & M Cooper. 2020. Soil quality assessment in integrated crop-livestock-forest: A review. *Soil Use Management*, 37:22-36.
- Van Genuchten, MT. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity on unsaturated soil. *SoilSci. Soc. Am. Journal*, 44:892-897.
- Zago LMS; WP Ramalho; CM Silva-Neto & SS Casamori. 2020. Biomechanical indicators drive soil quality in integrated crop-livestock-forestry system. *Agr. Systems*, 94:2249-2260.

