

**Saúde do solo de um Planossolo sob sistema de integração lavoura-pecuária-floresta
através de análise multivariada**

**Soil health of an Albaquults under integrated crop-livestock-forest system through
multivariate analysis**

**Sanidad del suelo de un Albaquults bajo sistema de integración cultivo-ganadería-
bosque mediante análisis multivariado**

Recebido: 02/10/2020 | Revisado: 07/11/2020 | Aceito: 10/11/2020 | Publicado: 14/11/2020

Pedro Luan Ferreira da Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5520-7920>

Universidade Estadual de Maringá, Brasil

E-mail: pg403039@uem.br

Flávio Pereira de Oliveira

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7968-6145>

Universidade Federal da Paraíba, Brasil

E-mail: pereira@cca.ufpb.br

Adriana Ferreira Martins

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8960-3101>

Universidade Federal da Paraíba, Brasil

E-mail: biol.adriana@gmail.com

Walter Esfrain Pereira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1085-0191>

Universidade Federal da Paraíba, Brasil

E-mail: walterufpb@yahoo.com.br

Danillo Dutra Tavares

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7763-6793>

Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil

E-mail: danilodutrat@hotmail.com

André Julio do Amaral

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7246-2974>

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Brasil

E-mail: andre.amaral@embrapa.br

Alison José da Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5237-3069>

Universidade Federal Rural de Pernambuco

E-mail: alisonjose1997@gmail.com

Resumo

O objetivo deste trabalho foi avaliar a saúde de um solo sob sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta através da análise multivariada dos atributos físicos, químicos e físico-hídricos do solo. O experimento foi implantado em um Planossolo Háptico de textura franco-arenosa no município de Alagoinha/PB, sob os seguintes consórcios em delineamento experimental de blocos casualizados: i) *Br. decumbens* + *Gliricidia sepium* (BG); ii) *Br. decumbens* + *Mimosa caesalpinifolia* (BS); iii) *Br. decumbens* + *Tabebuia alba* (BI); iv) *Br. decumbens* + *Zea mays* (LA); v) *Brachiaria decumbens* (BD). Amostras (indeformadas e deformadas) de solo foram coletadas para avaliar propriedades físicas, físico-hídricas e químicas do solo nas camadas de 0,0-0,1; 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m. As médias foram analisadas através da análise de componentes principais e correlação de Pearson ($p < 0,05$). Os resultados indicaram que o Lavoura anual conseguiu agrupar o maior número de propriedades relacionadas à qualidade estrutural do solo. A densidade do solo apresentou correlações positivas e negativas com a maioria das propriedades físicas analisadas. Em relação as propriedades químicas, detectou-se maior agrupamento nos sistemas LA e BG na camada de 0-0,1 cm. Conclui-se que a análise multivariada é uma opção viável para avaliação da saúde do solo, por agrupar o maior número de propriedades possíveis dentro do sistema de manejo mais predominante.

Palavras-chave: ACP; Propriedades físicas; Qualidade do solo; Correlação.

Abstract

The objective of this work was to evaluate the health of a soil under an integrated crop-livestock-forest system through multivariate analysis of the physical, chemical and physical-hydric attributes of the soil. The experiment was carried out in a Alaquults with a sandy texture in the municipality of Alagoinha, PB, under the following consortia in a randomized block design: i) *Br. Decumbens* + *Gliricidia sepium* (BG); ii) *Br. decumbens* + *Mimosa caesalpinifolia* (BS); iii) *Br. decumbens* + *Tabebuia alba* (BI); iv) *Br. decumbens* + *Zea mays* (LA); v) *Brachiaria decumbens* (BD). Samples (deformed and undeformed) of soil were collected to evaluate physical, physical-hydric and chemical properties of the soil in the layers

of 0.0-0.1, 0.1-0.2 and 0.2-0.3 m. The averages were analysed using principal component analysis and Pearson's correlation ($P < 0.05$). The results indicated that LA managed to group the largest number of properties related to the structural quality of the soil. The soil density showed positive and negative correlations with most of the analysed physical variables. Regarding the chemical properties, a greater clustering was detected in the LA and BG systems in the 0-0.1 cm layer. We conclude that multivariate analysis is a viable option for assessing soil health, since its groups as many properties as possible within the most prevalent management system.

Keywords: ACP; Physical properties; Soil quality; Correlation.

Resumen

El objetivo de este trabajo fue evaluar la salud de un suelo bajo un sistema de integración cultivo-ganadería-bosque mediante el análisis multivariado de los atributos físicos, químicos y físico-hídricos del suelo. El experimento se realizó en un Alaquults de textura arenosa en el municipio de Alagoinha, PB, bajo los siguientes consorcios en un diseño de bloques al azar: i) *Br. Decumbens* + *Gliricidia sepium* (BG); ii) *Br. decumbens* + *Mimosa caesalpinifolia* (BS); iii) *Br. decumbens* + *Tabebuia alba* (BI); iv) *Br. decumbens* + *Zea mays* (LA); v) *Brachiaria decumbens* (BD). Se recolectaron muestras (deformadas y deformadas) de suelo para evaluar las propiedades físicas, físico-hídricas y químicas del suelo en las capas de 0.0-0.1, 0.1-0.2 y 0.2-0.3 m. Los promedios se analizaron mediante análisis de componentes principales y correlación de Pearson ($p < 0.05$). Los resultados indicaron que LA logró agrupar la mayor cantidad de propiedades relacionadas con la calidad estructural del suelo. La densidad del suelo mostró correlaciones positivas y negativas con la mayoría de las variables físicas analizadas. En cuanto a las propiedades químicas, se detectó un mayor agrupamiento en los sistemas LA y BG en la capa de 0-0,1 cm. Concluimos que el análisis multivariado es una opción viable para evaluar la salud del suelo, ya que agrupa tantas propiedades como sea posible dentro del sistema de manejo más prevalente.

Palabras clave: ACP; Propiedades físicas; Calidad del suelo; Correlación.

1. Introdução

O interesse global pela saúde do solo aumentou exponencialmente durante a última década, com muitos grupos governamentais, não governamentais e do setor privado empenhados em desenvolver protocolos de avaliação (Karlen *et al.*, 2019). Com o crescente

processo de degradação do solo observado nos últimos anos, 33% segundo dados da *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO, 2015), o conceito de saúde do solo tem se tornado cada vez mais relevante. Um conjunto de propriedades físicas, químicas e biológicas do solo como conteúdo de matéria orgânica, textura, capacidade de retenção de água no solo e concentração de nutrientes essenciais facilmente extraíveis pelas plantas, tem sido utilizado para avaliar a saúde do solo (Silveira & Kohmann, 2020). Contudo durante a escolha desses atributos, algumas informações devem ser levadas em consideração como: i) facilidade de medição; ii) avaliar mudanças nas funções do solo; iii) abranger propriedades químicas, físicas e biológicas; iv) ser acessível a muitos usuários e aplicável as condições de campo e v) ser sensível as variações climáticas (Silveira & Kohmann, 2020).

Dentre os atributos utilizados para avaliar as mudanças de uso do solo se destacam a curva de retenção de água no solo (van Genuchten, 1980), capacidade de campo, ponto de murcha permanente, capacidade de água disponível e condutividade hidráulica (Andrade *et al.*, 2013; Carducci *et al.*, 2013), textura, estrutura, mineralogia e conteúdo de matéria orgânica do solo (Beutler *et al.*, 2002), índice *S* (Dexter, 2004), potencial matricial e umidade do solo no ponto de inflexão (Dexter & Bird, 2001), distribuição de poros por diâmetro (Bouma, 1991), intervalo hídrico ótimo (Tormena *et al.*, 1998), densidade do solo (Blake & Hartge, 1986), capacidade de aeração do solo e capacidade de campo relativa (Reynolds *et al.*, 2007), estabilidade de agregados e porosidade do solo (Doran & Parkin, 1994).

Com o surgimento dos novos conceitos de agricultura, a necessidade de avaliação da qualidade solo tornou-se ainda mais importante, principalmente no Brasil, por ocasião da adoção dos sistemas de integração Lavoura-Pecuária (iLP) e integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF). São sistemas de produção que favorecem a recuperação de solos degradados, melhoram o aporte de matéria orgânica, aumentam a ciclagem de nutrientes, infiltração e retenção de água (Loss *et al.*, 2014), contribuem para a formação e estabilidade de agregados do solo (Souza *et al.*, 2019), possibilitam aumentos de produtividade e reduzem os custos com irrigação, fertilizantes, condicionadores de solo e outros insumos agrícolas (Conceição *et al.*, 2014).

No nordeste do Brasil, a adoção dos sistemas integrados de produção agropecuária é recente e tem demonstrado bons resultados (Silva *et al.*, 2019). Contudo, pouco se conhece sobre o impacto dos sistemas de integração na qualidade do solo sob clima semiárido no médio e longo prazo, e esse fato pode ser avaliado através de técnicas estatísticas que levam em consideração a avaliação integrada de um conjunto variáveis sensíveis as mudanças de uso do solo. A análise multivariada dos dados pode ser uma alternativa viável na avaliação da

saúde do solo, pois analisa, simultaneamente, múltiplas medidas de cada indivíduo ou objeto sob investigação, transformando um conjunto de variáveis inicialmente correlacionadas entre si, num conjunto substancialmente menor de variáveis não correlacionadas, com menor perda possível de informação (Hongyu *et al.*, 2015).

Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a saúde de um Planossolo sob sistema de integração lavoura-pecuária-floresta através da análise multivariada dos atributos físicos, químicos e físico-hídricos do solo.

2. Metodologia

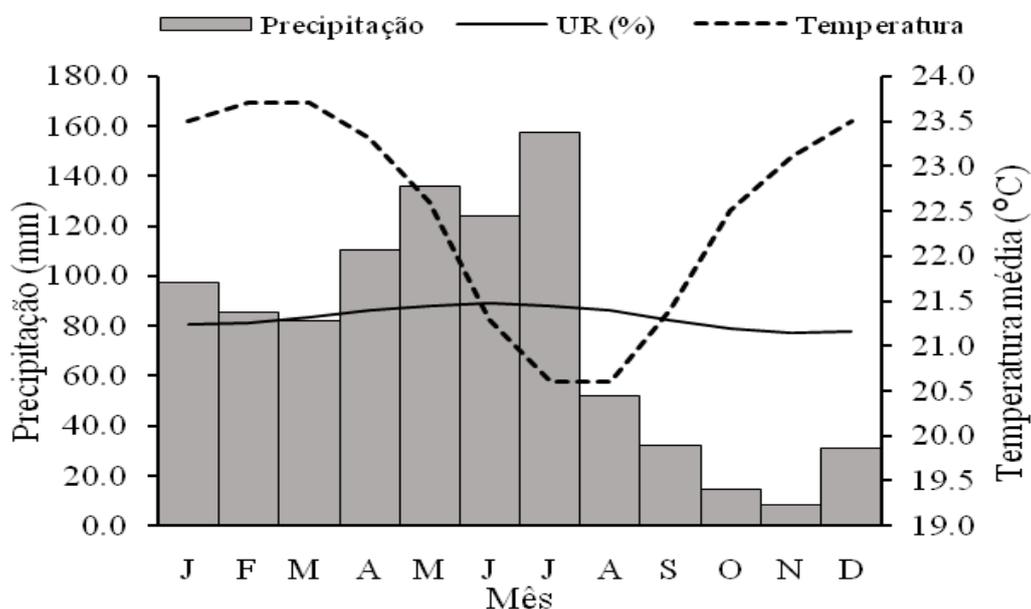
2.1 Caracterização do local de estudo

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; altitude de 317 metros). Segundo a classificação de Köppen-Geiger o clima da região é do tipo As'- tropical quente e úmido, com chuvas de outono-inverno e período chuvoso entre os meses de abril e julho (Peel *et al.*, 2007).

A precipitação média anual acumulada dos últimos 10 anos foi de 931,3 mm, com temperatura variando de 20,6 a 23,7 °C e umidade relativa do ar de 83,3% (Figura 1) (Agência Executiva de Gestão de Águas da Paraíba - AESA, 2020). Segundo Francisco *et al.* (2018) a taxa de evapotranspiração real anual do município de Alagoinha é de 79,0. O solo da área experimental foi classificado como Albaquults (Soil Taxonomy) equivalente a Planossolo Háptico Eutrófico méxico solódico com horizonte A moderado e de textura 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 0,20 m, e o resultado foi o seguinte: 684, 159, 157 e 45 g kg⁻¹ de areia, silte, argila e argila dispersa em água, respectivamente. Grau de flocculação = 67,4%; 1,55 e 2,61 g cm⁻³ de densidade do solo e partículas; porosidade total = 0,40 m³ m⁻³. O pH (H₂O 1:2,5) = 5,44; 4,53 e 135,84 mg dm⁻³ de P e K⁺; 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 (COT).

Figura 1 - Precipitação acumulada, temperatura média e umidade relativa do ar (UR%) em Alagoinha, PB. Fonte: (AESAPB & INMET, 2020).



Fonte: Elaborada pelos autores (2020).

Em setembro de 2015 uma área com 1590 hectares, originalmente ocupada com pastagem foi preparada para receber o sistema de integração. Foram dimensionadas 20 parcelas experimentais com dimensão de 38x20 m (720 m²) cada, onde foram transplantadas mudas das seguintes espécies florestais em fileiras triplas com espaçamento de 3 x 2 m: *Gliricidia sepium*, *Mimosa caesalpiniaefolia* e *Handroanthus impetiginosus*. Após um ano da implantação, em 2016 o componente animal foi inserido na área experimental, na ordem de 0,02 UA, por um período de 30 dias. O componente lavoura – LA foi mantido sob sistema de consórcio desde a implantação do experimento, conforme descrito na Tabela 1.

Tabela 1 - Descrição do componente lavoura-anual implantado na área experimental.

Safra	Componente lavoura anual
2015/2016	Milho/ <i>Brachiaria decumbens</i>
2016/2017	Soja/ sorgo
2017/2018	Algodão/ feijão caupi
2018/2019	Gergelim/ soja/ sorgo/ amendoim

Milho (*Zea mays*), soja (*Glycine max*), sorgo (*Sorghum bicolor*), algodão (*Gossypium hirsutum*), feijão caupi (*Vigna unguiculata*), gergelim (*Sesamum indicum*), amendoim (*Arachis hypogaea*).

Fonte: Elaborada pelos autores (2020).

2.2 Delineamento experimental

O delineamento experimental adotado foi de blocos casualizados (DBC), com cinco tratamentos e quatro repetições (5 x 4), sendo a parcela representando a unidade experimental. Os tratamentos avaliados foram compostos pelos seguintes consórcios: i) *Brachiaria decumbens* Stapf. + Gliricídia (*Gliricidia sepium*) (BG); ii) *Brachiaria decumbens* Stapf. + Sabiá (*Mimosa caesalpiniiifolia* Benth.) (BS); iii) *Brachiaria decumbens* Stapf. + Ipê (*Tabebuia alba* (Chamisso) Sandwith) (BI); iv) Lavoura Anual = *Brachiaria decumbens* Stapf. + milho (*Zea mays*) (LA); v) *Brachiaria decumbens* Stapf. (BD).

2.3 Atributos analisados

Amostras de solo com estrutura preservada, um total de 240 amostras, foram coletadas em anéis volumétricos tipo Uhland com volume de 102,9 cm³ nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m em pontos amostrais equidistantes nas parcelas experimentais e sob o renque das árvores, no caso das arbóreas. Essas amostras foram encaminhadas ao Laboratório de Análises Físicas de Solo, do Centro de Ciências Agrárias (CCA) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) para determinar as seguintes variáveis: densidade do solo (ρ ; g cm⁻³) por meio através da relação entre a massa do solo seco (± 105 °C) e o volume da amostra (Blake & Hartge, 1976) e densidade de partículas (ρ_s ; g cm⁻³) por meio do método do balão volumétrico (Teixeira *et al.*, 2017).

A densidade máxima do solo (ρ_{max} ; g cm⁻³) e a densidade relativa (ρ_R) foram determinadas de acordo com metodologia proposta por Marcolin & Klein (2011), utilizando uma função de pedotransferência (FTP), conforme as equações 1 e 2:

$$\rho_{max} = 2.03133855 - 0.00320878 \text{ MOS} - 0.00076508 \text{ Argila} \quad (1)$$

$$\rho_R = \rho / \rho_{max} \quad (2)$$

Em que: MOS é o conteúdo de matéria orgânica do solo (g kg⁻¹).

A partir dos dados de ρ_{max} e ρ_R , foi possível estimar o grau de compactação do solo (GCe; %) equação 3:

$$\text{GCe} = (\rho / \rho_{max}) * 100 \quad (3)$$

A porosidade total do solo (α ; $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) foi calculada da seguinte forma: $(1 - (\rho/\rho_s))$. A microporosidade do solo (M_i ; $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) foi calculada por meio da umidade volumétrica do solo entre as tensões de $\theta_{6\text{kPa}} - \theta_s$; por diferença ($\alpha - \theta_{6\text{kPa}}$) obteve-se a macroporosidade do solo (M_a ; $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$). A capacidade de aeração do solo (CAS; $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), a porosidade livre de ar (θ_{ar} ; $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e a capacidade de campo relativa (CCr) foram estimadas de acordo com metodologia proposta por Reynolds *et al.* (2007), conforme apresentado nas seguintes equações 4, 5 e 6:

$$\text{CAS} = \theta_s - \theta_{33\text{kPa}} \quad (4)$$

$$\theta_{ar} = [(1 - (\rho/\rho_s)) - 0,1] \quad (5)$$

$$(\text{CCr}) = (\theta_{CC} / \theta_s) = [1 - (\text{CAS} / \theta_s)] \quad (6)$$

Em que: θ_s corresponde a umidade de saturação (θ_0), $\theta_{33\text{kPa}}$ corresponde a umidade do solo na capacidade de campo, ρ e ρ_s correspondem as densidades do solo e de partículas, respectivamente.

As amostras de solo com estrutura indeformada foram saturadas em água por 48 horas e em seguida submetidas aos potenciais matriciais de -6kPa em mesa de tensão e -10, -33, -100, -300, -500, -1000 e -1500 kPa em câmara de Richards com placas porosas (Klute, 1986). Os dados de umidade foram modelados no *software* SWRC (Dourado Neto *et al.*, 2000) para obtenção dos parâmetros de ajustes e montagem da curva de retenção de água no solo (CRA), utilizando a equação de Van Genuchten (1980) com restrição $m = 1 - (1/n)$ (Mualem, 1976) (equação 7):

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) / [(1 + (\alpha\Psi)^n)^m] \quad (7)$$

Em que: θ é o conteúdo volumétrico de água no solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) correspondente ao potencial matricial aplicado (Ψ_m ; kPa); θ_r representa a umidade residual do solo; θ_s é a umidade correspondente ao volume de saturação; Ψ é o valor absoluto do potencial matricial (kPa); n , m e α são parâmetros empíricos da curva de retenção, com α expresso em (kPa^{-1}); n e m são adimensionais.

O índice S foi determinado através do ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo, conforme descrito por Dexter (2004) usando a restrição de Mualem (1976) (equação 8):

$$|S| = -n (\theta_s - \theta_r) [1 + 1/m]^{-(1+m)} \quad (8)$$

Em que: $|S|$ é o valor de inclinação da curva de retenção de água no solo (CRA) no seu ponto de inflexão; conforme proposto por Dexter (2004), os valores são apresentados em módulo de forma a facilitar a discussão e compreensão dos resultados (adimensional); θ_s é o teor de umidade do solo saturado $\Psi_m = 0$ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); θ_r é a umidade residual do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); m é a restrição proposta por Mualem (1976).

O conteúdo de água na tensão de 33 kPa foi utilizado como capacidade de campo (θ_{CC} ; $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), 1500 kPa como ponto de murcha permanente (θ_{PMP} ; $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e ($\theta_{1500 \text{ kPa}} - \theta_{33 \text{ kPa}}$) como água disponível (θ_{AD}). A capacidade de água disponível às plantas (CAD) foi calculada levando-se em consideração a espessura da camada de solo avaliada e o valor de densidade do solo correspondente, conforme apresentado na equação 9:

$$\text{CAD} = \theta_{AD} * \rho * Z \quad (9)$$

Em que: CAD é a capacidade de água disponível em (mm); ρ é a densidade do solo da camada avaliada (g cm^{-3}) e Z é a espessura da camada de solo (mm).

A condutividade hidráulica saturada do solo (K_θ) foi determinada conforme metodologia descrita no Manual de métodos e análises de solo da Embrapa (Teixeira *et al.*, 2017), onde utilizou-se amostras de solo com estrutura indeformada de $102,09 \text{ cm}^3$, previamente saturadas em água destilada por um intervalo de no mínimo 48 horas. Após a saturação, as amostras foram introduzidas no permeâmetro de carga constante até atingir o equilíbrio na taxa de percolação da água. O cálculo da condutividade foi realizado utilizando a equação 10:

$$(K_\theta) = Q \times L / A \times H \times T \quad (10)$$

Em que: K_θ é a condutividade hidráulica saturada (cm h^{-1}); Q é o conteúdo de água percolado e coletado em proveta (mL^{-1}); A é a área do cilindro (cm^2); H é a altura do bloco de solo + lâmina de água (cm); T é o tempo de coleta do percolado (horas).

Associado, foram coletados um total de 240 amostras com auxílio de pá de corte nas profundidades de 0,00-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, em pontos amostrais equidistantes nas parcelas experimentais e sob o renque das árvores, no caso das arbóreas. Em seguida as amostras de solo foram secas ao ar, subdivididas em dois grupos de subamostras e

encaminhadas ao Laboratório de Química e Fertilidade do Solo do Centro de Ciências Agrárias (CCA) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) para realização de análises.

As subamostras do grupo I foram utilizadas para determinar o diâmetro médio ponderado e o índice de estabilidade de agregados do solo através de metodologia proposta por Kemper & Chepil (1965), com alterações propostas por Carpenedo & Mielniczuk (1997) e por Silva & Mielniczuk (1997). No grupo II as amostras foram peneiradas em peneiras com malha de 2 mm, e posteriormente utilizadas para a determinação dos atributos de química e de fertilidade do solo, conforme descrito no manual de métodos e análises de solo da Embrapa (Teixeira *et al.*, 2017).

O potencial hidrogeniônico (pH em H₂O; 1:2,5), o fósforo disponível (P), os cátions trocáveis (Ca²⁺, Al³⁺ e Mg²⁺), os elementos K⁺ e Na⁺ e a acidez potencial (H⁺+Al³⁺), foram determinadas conforme metodologia descrita no manual de métodos de análise de solos da Embrapa (Teixeira *et al.*, 2017). Através da determinação dos elementos acima citados foi possível calcular as variáveis do complexo sortivo do solo, com destaque para a capacidade de troca de cátions (CTC), soma de bases (SB) e saturação por bases (V). O teor de carbono orgânico do solo (COT) foi determinado em solo via úmida pela oxidação do dicromato de potássio (K₂Cr₂O₇) a 0,0667 mol L⁻¹. O estoque de carbono (ESTC; Mg ha⁻¹) foi calculado conforme metodologia proposta por Veldkamp (1994), utilizando a equação 11:

$$ESTC = [(COT \times \rho \times e) / 10] \quad (11)$$

Em que: ESTC é o estoque de carbono do solo, COT é o teor de carbono orgânico total da amostra (g kg⁻¹), ρ é a densidade do solo (g cm⁻³), e corresponde a espessura da camada de solo avaliada (cm).

A taxa de recuperação de carbono (TRCS) foi determinada conforme metodologia descrita por Tivet *et al.* (2013) utilizando a equação $TRCS = [(ESTC_{menajo} / ESTC_{vnat}) \times 100]$, em que: TRCS é a taxa de recuperação de carbono do solo (%); STC_{menajo} é o estoque de carbono das áreas manejadas (Mg ha⁻¹) e $ESTC_{vnat}$ é o estoque de carbono do solo sob mata preservada (Mg ha⁻¹). Para esta determinação, coletou amostra sob mata em estágio secundário de regeneração (capoeira). O índice de estabilidade estrutural (IEE; %) foi determinado conforme metodologia proposta por Pieri (1992), utilizando os valores de COT, silte e argila das amostras de solo, conforme apresentado na equação 12:

$$IEE = [(COT * 1,7240) / (\text{silte} + \text{argila})] \times 100 \quad (12)$$

Em que: IEE é o índice de estabilidade estrutural; COT é o conteúdo de carbono orgânico do solo (g kg^{-1}) e $1,7240$ = fator de conversão para matéria orgânica do solo. O IEE apresenta algumas faixas de limites que são utilizadas para avaliar a qualidade estrutural do solo, sendo: $> 9\%$ - estrutura estável; $7\% < \text{IEE} \leq 9\%$ - indica baixo risco de degradação estrutural; $5\% < \text{IEE} \leq 7\%$ - alto índice de degradação; $\text{IEE} \leq 5\%$ - solo estruturalmente degradado.

2.4 Análise estatística

As médias foram analisadas através da análise de componentes principais (ACP) e correlação de Pearson ($p < 0,01$ e $0,05$), utilizando o software estatístico R (R Core Team, 2013). Os valores de correlação foram interpretados utilizando os critérios propostos por (Oliveira *et al.*, 2018), sendo: $0,7 \leq r \leq 1,0$, para correlação forte; $0,4 \leq r < 0,6$, para correlação moderada; $0,1 \leq r < 0,3$ para correlação fraca e de $0,0 \leq r < 0,1$ para correlação nula.

3. Resultados e Discussão

3.1 Análise de componentes principais

Os autovalores dos atributos físicos de solo encontram-se apresentados na Tabela 2. Verifica-se que 43,49% da análise de variância foi explicada pelo componente principal (CP1) e 15,78% pelo componente principal (CP2), totalizando uma variância acumulada de 59,27%. Correlação positiva mais significativa (0,328) foi verificada para a variável αEst no CP1. Enquanto as variáveis $\rho = -0,296$, $\text{GCe} = -0,229$ e $\rho_R = -0,298$, se destacaram com valores de correlação negativa. No CP2 a $\text{Ma} = 0,396$, o $\text{DMPAs} = 0,309$ e a $\text{MacroU} = 0,322$, foram as mais significativas. No diagrama de autovetores (Figura 2), verificou-se a formação de três grupos principais organizados em função do grau similaridade G1: (BD e LA 0,00-0,10 m), G2: (BS, BG e LA nas camadas de 0,00-10 e 0,10-0,20 m) e G3 (BI, BS, BG, BD e LA 0,10-0,20 e 0,20 a 0,30 m).

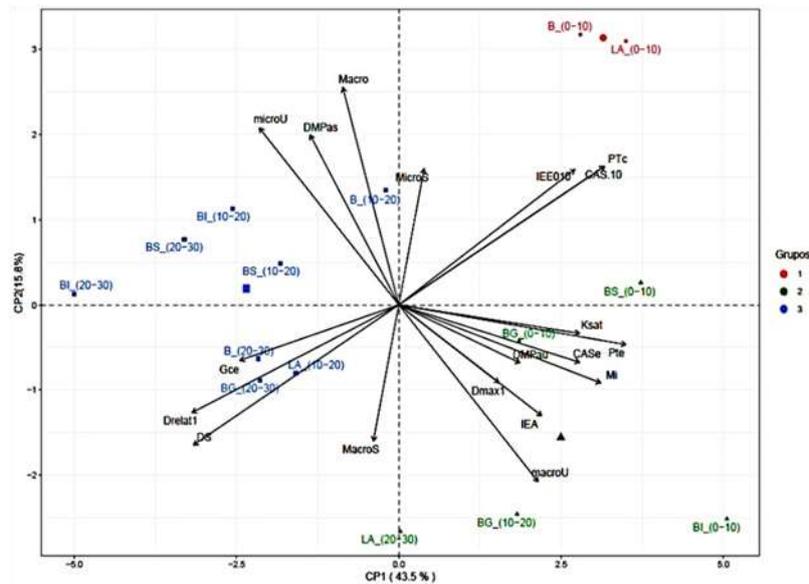
Tabela 2 - Análise de componentes principais (ACP) para atributos físicos de um Planossolo Háplico sob sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Agreste da Paraíba.

Autovalores	CP 1	CP 2
Variância	8.264	3.000
Variância %	43.492	15.787
Variância acumulada %	43.49	59.27
Variáveis	Valores de correlação	
ρ	-0,296	-0,255
α_{Est}	0,328	-0,072
α	0,297	0,252
Mi	0,291	-0,142
Ma	-0,080	0,396
CAS	0,261	-0,104
θ_{CAR}	0,297	0,252
ρ_{max}	0,144	-0,142
ρ_R	-0,298	-0,196
K_θ	0,261	-0,051
G _{Ce}	-0,229	-0,101
MacroS	-0,036	-0,248
MicroS	0,036	0,248
MacroU	0,201	-0,322
MicroU	-0,201	0,322
DMPAs	-0,127	0,309
DMPAu	0,174	-0,105
IEA	0,206	-0,202
IEE	0,254	0,246

Ds = Densidade do solo, Pte = Porosidade total estimada, Mi = Microporosidade, Macro = Macroporosidade, CASe = Capacidade de aeração do solo, CAS10 = Capacidade de aeração relativa, Dmax = Densidade máxima do solo, Drelat = Densidade relativa do solo, K_{sat} = Condutividade hidráulica saturada, G_{Ce} = Grau de compactação estimado, MacroS = Macroagregados secos, MicroS = Microagregados secos, MacroU e MicroU = Macro e microagregados úmidos, DMPAs e DMPAu = Diâmetro médio ponderado de agregados úmidos e secos, IEA = Índice de estabilidade de agregados, IEE = Índice de estabilidade estrutural, BI = *Brachiaria decumbens* + Ipê, BG = *Brachiaria decumbens* + Gliricídia, BS = *Brachiaria decumbens* + Sabiá, B = *Brachiaria decumbens*, LA = Lavoua anual.

Fonte: Elaborada pelos autores (2020).

Figura 2 - Diagrama de autovetores para atributos físicos de um Planossolo Háplico sob sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Agreste da Paraíba.



Fonte: Elaborada pelos autores (2020).

Verifica-se na Figura 2, que os tratamentos BD, LA e BS na profundidade de 0,00-0,10 m, apresentaram similaridade para os atributos MicoS, IEE, PT e CAS, discriminando-os dos demais tratamentos avaliados. Os tratamentos BG e BI (0,00-0,10 m) formaram outro grupo de ordenação, por apresentar similaridade entre os atributos: Ksat, CAS, Mi, Dmax, IEA e MacroU. A formação desses grupos demonstra quais variáveis são mais sensíveis ao sistema de manejo aplicado. Fato esse que corrobora com Gomes *et al.* (2019), ao afirmar que a ACP é de grande eficiência, pois através dela é possível distinguir os atributos físicos do solo relacionados a cada tratamento. No caso do tratamento LA verifica-se na Figura 2, que ele apresenta uma estreita relação com a porosidade total do solo, e nesse caso benéfica, já que a faixa de valores verificada para essa variável foi de 0,49 a 0,50 m³ m⁻³. Esse resultado está relacionado à redução na taxa de mobilização do solo, associada à integração com diferentes espécies de gramíneas, que por intermédio do desenvolvimento radicular, contribuem para o aumento de vazios no solo.

Os tratamentos LA (0,10-0,20 m), BD e BG (0,20-0,30) apresentaram os maiores valores de densidade do solo, grau de compactação e densidade relativa do solo, provavelmente ocasionadas pelo pisoteio animal ou excesso do uso de implementos agrícolas em superfície. Assis *et al.* (2019) avaliando atributos físicos de solo através da análise de componentes principais, observaram que na pastagem degradada a densidade do solo foi superior aos valores verificados nos sistemas integrados de produção agropecuária. Para os

autores, esse resultado estava relacionado à compactação ocasionada pelo pisoteio animal e a ausência de mobilização do solo. Essa afirmativa vai de acordo com Arcoverde *et al.* (2019), ao verificarem que o aumento das pressões mecânicas aliadas ao não revolvimento do solo, tendem a alterar a densidade do solo a níveis restritivos.

Para Borcard *et al.* (2011), quanto maior o comprimento de um vetor na análise de componentes principais, mais influente ele é na explicação dos resultados. No presente estudo, os vetores de maior influência na variabilidade dos resultados foram a porosidade total estimada (PTE) e IEE no (G1); percentual de macroagregados úmidos, IEA, Mi e porosidade total estimada para o (G2); densidade relativa, densidade do solo, Ma e percentagem de microagregados úmidos para o (G3). Esses atributos mostram-se como os mais sensíveis às mudanças de uso do solo, portanto, podem ser utilizados para avaliar a saúde do solo em função de sua contribuição para o resultado final da variabilidade. Apesar de fracas, correlações negativas foram verificadas no (CP2) em detrimento ao (CP1), com MacroS = -0,248 e MacroU = -0,322, contribuindo para a formação de três grupos por grau de similaridade. Silva *et al.* (2015) avaliando a variabilidade de atributos físicos e químicos do solo e sua influência na produção de feijão através da análise multivariada, verificaram que os atributos que explicaram 38,0% da variância sobre a variabilidade da cultura do feijão foram a densidade do solo, porosidade total e umidade volumétrica, provavelmente por serem os mais sensíveis as mudanças de manejo do solo e por apresentarem estreita relação com a estrutura do solo.

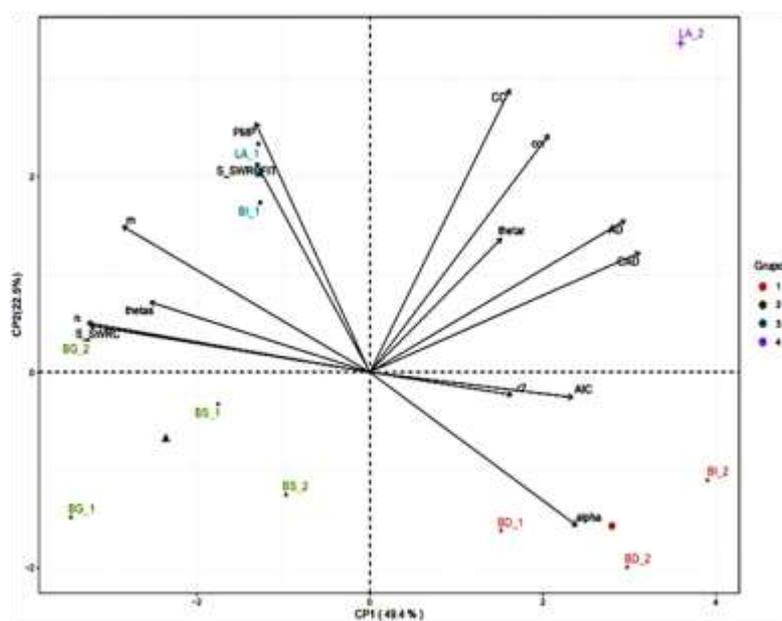
Em relação aos atributos físico-hídricos do solo (Tabela 3) 71,85% do coeficiente de variação foi explicado pelos (CP1 e CP2), sendo CP1 = 49,35% e CP2 = 22,49%. Os valores de correlação negativa mais significativos para o (CP1) foram: $n = -0,317$, $m = -0,363$, $S = -0,360$ e o positivo foi: CAD = 0,347. Com relação ao CP2, verifica-se o predomínio de valores de correlação positivos, destacando-se as variáveis $\theta_{CC} = 0,475$, $\theta_{PMP} = 0,419$ e CCr = 0,399. Esses valores favoreceram a formação de quatro grupos: 1- (BD 0,00-0,10 m; BI 0,20-0,30 m), 2- (BG 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m; BS 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m), 3- (LA e BI 0,00-0,10 m) e 4 – (LA 0,10-0,20 m).

Tabela 3 - Análise de componentes principais (ACP) para parâmetros físico-hídricos e curva de retenção de água no solo para um Planossolo Háplico sob sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Agreste da Paraíba.

Autovalores	CP 1	CP 2
Variância	6,910	3,149
Variância %	49,356	22,494
Variância acumulada %	49,356	71,850
Variáveis	Valores de correlação	
θ_R	0,169	0,224
θ_S	-0,282	0,117
m	-0,317	0,245
n	-0,363	0,083
α	0,266	-0,257
S	-0,360	0,078
R^2	0,182	-0,037
θ_{CC}	0,180	0,475
θ_{PMP}	-0,146	0,419
θ_{AD}	0,328	0,255
CAD	0,347	0,201
CCr	0,230	0,399

BI = *Brachiaria decumbens* + Ipê, BG = *Brachiaria decumbens* + Gliricídia, BS = *Brachiaria decumbens* + Sabiá, BD = *Brachiaria decumbens*, LA = Lavoura anual, CV = Coeficiente de variação, θ_{CC} = Capacidade de campo, θ_{PMP} = Ponto de murcha permanente, θ_{AD} = Água disponível, CAD = Capacidade de água disponível, CCr = Capacidade de campo relativa, S = Índice "S". θ_S = Umidade de saturação, θ_r = Umidade residual, α , m e n = Parâmetros empíricos de ajuste da curva de retenção, R^2 = Coeficiente de determinação.
 Fonte: Elaborada pelos autores (2020).

Figura 3 - Diagrama de autovetores para atributos físico-hídricos de um Planossolo Háplico sob sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Agreste da Paraíba.



Fonte: Elaborada pelos autores (2020).

Verifica-se na Figura 3, que o tratamento LA (G4) agrupou o maior número de variáveis relacionadas à retenção e armazenamento de água no solo, destacando-se: θ_{CC} e CCr , θ_r , θ_{AD} e CAD . O grupo 1- (BD 0,00-0,10 m; BI 0,10-0,20 m), foi discriminado pela variável α , que está relacionada ao potencial de entrada de ar na matriz porosa do solo, apresentando correlação positiva com o (CP1) e negativa com o (CP2). Em relação aos vetores, as variáveis θ_{CC} , θ_{PMP} , θ_{AD} , θ_{CAD} , n e α , foram as mais representativas dentro do conjunto de variáveis analisadas.

Observa-se na Tabela 3, que apesar de não ter sido verificada diferença estatística significativa entre os tratamentos, o LA foi superior na camada de 0,10-0,20 m para os atributos CAD , θ_r , θ_{CC} , θ_{PMP} , θ_{AD} , CAD e CCr . Esse resultado demonstra elevada variabilidade espacial apresentada para esses atributos sob influência do tratamento LA, favorecidos em grande parte pelo cultivo consorciado entre milho e a *Brachiaria*. Carducci *et al.* (2015) avaliando a retenção de água no solo em sistemas conservacionistas de produção, verificaram melhorias físicas significativas após 3 anos de instalação do sistema, evidenciando a sensibilidade desses atributos (α e n) às mudanças de manejo do solo; n é um parâmetro de forma da CRA e seu comportamento está relacionado a forma como as classes de poros estão distribuídas no solo. Geralmente, valores elevados de n tendem a caracterizar uma distribuição heterogênea de poros no solo, com predomínio das classes de menor diâmetro, com destaque para os mesoporos médios e finos.

O resultado da análise de componentes principais para os atributos químicos do solo encontra-se apresentado na Tabela 4. Observa-se que o (CP1) explicou 52,00% da variância acumulada, enquanto o (CP2) correspondeu a 12,14% da variância, totalizando 69,14%. Quanto ao diagrama de autovetores (Figura 4), observa-se a formação de três grupos de similaridade, dois deles predominando na parte superior do gráfico, com o maior número de variáveis correlacionadas. Os grupos formados foram: G1- (LA, BD, BS e BI 0,00-0,10 m), G2- (BG 0,00-0,10 m) e G3- (BI, BG, BD, LA e BS nas profundidades de 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m). O autovalor correspondente ao índice S foi de -0,360 no CP1 (Tabela 4), e está diretamente relacionado ao n e m (Figura 3). Esta relação é proveniente da dependência espaço-temporal dessas propriedades com a porosidade do solo e, havendo mudanças da PT, os valores de n , m e S tendem a crescer ou decrescer; contudo para o S redução de valores sinaliza efeito negativo do manejo sobre a qualidade física do solo.

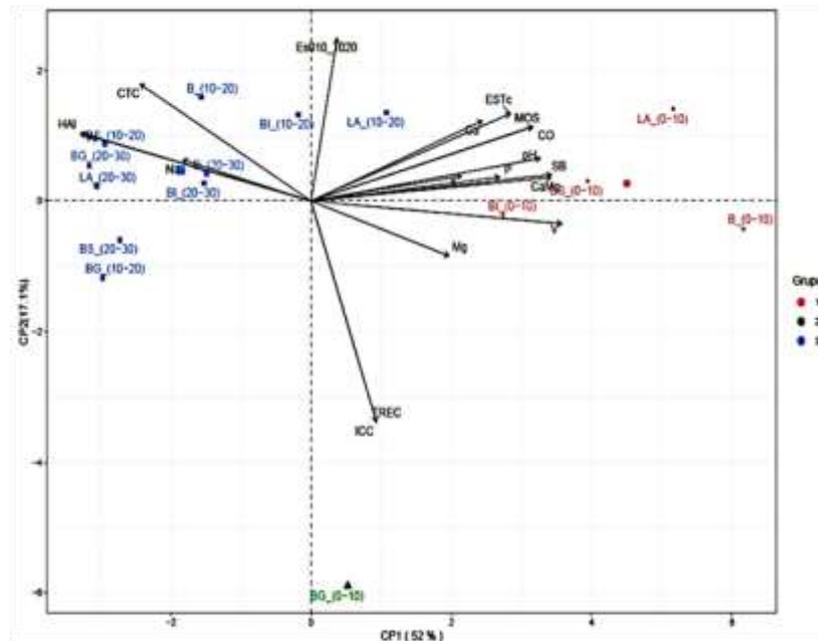
Tabela 4 - Análise de componentes principais (ACP) para atributos químicos de um Planossolo Háptico sob sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Agreste da Paraíba.

Autovalores	CP 1	CP 2
Variância	9.360	3.086
Variância %	52.001	17.145
Variância acumulada %	52.001	69.145
Variáveis	Valores de correlação	
ICC	0,081	-0,518
TREC	0,082	-0,518
ESTC	0,032	0,382
pH	0,250	0,205
P	0,287	0,100
K	0,236	0,056
Na	0,188	0,058
Ca+Mg	-0,160	0,096
Ca	0,300	0,054
Mg	0,214	0,188
Al	0,172	-0,128
H+Al	-0,289	0,158
COT	-0,289	0,158
MOS	0,278	0,174
SB	0,301	0,061
CTC	-0,214	0,274
V	0,314	-0,053

ICC = Índice de compartimentação de carbono, TREC = Taxa de recuperação de carbono, ESTC = Estoque de carbono, pH = Potencial hidrogeniônico, P = Fósforo, K = Potássio, Na = Sódio, Ca+Mg = Cálcio + Magnésio trocável, Ca = Cálcio, Mg = Magnésio, Al = Alumínio, H+Al = Hidrogênio + Alumínio, COT = Carbono orgânico total, MOS = Matéria orgânica do solo, SB = Soma de bases, CTC = Capacidade de troca catiônica e V = Índice de saturação por bases.

Fonte: Elaborada pelos autores (2020).

Figura 4. Diagrama de autovetores para atributos químicos de um Planossolo Háplico sob sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Agreste da Paraíba.



Fonte: Elaborada pelos autores (2020).

Os valores de correlação mais representativos foram 0,300 para o Ca, 0,301 para SB, 0,314 para V e -0,289 para (H+Al) no CP1. Para o CP2, verifica-se valores fortes de correlação para o ICC, e TRCS, -0,518, respectivamente para cada um. O ESTC apresentou correlação positiva 0,382 no CP1. Verifica-se no diagrama de autovetores (Figura 4) que o G1- (LA, BD, BS e BI 0,00-0,10 m) distinguiu dos demais grupos formados pelo número de variáveis acumuladas, destacando-se: Estratificação de carbono (ΔEE 0,10:0,20 m), ESTC, Ca, MOS, COT, pH, SB, K, P, Ca + Mg²⁺, V e Mg. Esse resultado demonstra que a camada superficial do solo se mostra bastante sensível as práticas de manejo do solo e, que o conteúdo de carbono acumulado ao longo dos quatro anos favoreceu mudanças nos demais atributos químicos do solo como Ca, pH, SB, K⁺, P, Ca + Mg²⁺, V e Mg. Resultado semelhante foi verificado por Nascimento *et al.* (2019) em diferentes ambientes fisiográficos no sul do Amazonas e por Santos *et al.* (2018) em trabalho que avaliava a comunidade de FMA e glomalina em ambiente de Mata Seca no Brasil.

Souza *et al.* (2018), avaliando atributos químicos de solo em sistema agroflorestal encontrou forte correlação para os atributos Ca, Ca+Mg²⁺, SB, CTC, pH, Mg e MOS. Esse resultado evidencia o efeito positivo do sistema de manejo e da deposição constante de MOS sobre a melhoria dos atributos químicos do solo. Suzuki *et al.* (2007) salientam que a matéria

orgânica do solo possui papel fundamental na manutenção do pH do solo e na liberação de nutrientes para as plantas.

As alterações provocadas na comunidade de microrganismos do solo através da introdução dos sistemas integrados de produção agropecuária e da condução de culturas em consórcio, interferem na decomposição da matéria orgânica e ciclagem de nutrientes, favorecendo a liberação de nutrientes no solo (Assis *et al.*, 2019). Diante dos dados apresentados na Tabela 4 e na Figura 4, pode-se afirmar que os sistemas integrados de produção, mais precisamente o tratamento LA (milho + brachiaria) estão promovendo melhorias no solo, fato comprovado pelo grande número de variáveis correlacionadas a este sistema.

3.2 Coeficiente de correlação de Pearson (r)

Valores de correlação negativa forte foram verificadas entre as variáveis capacidade de aeração do solo e densidade do solo $\theta_{ar} \times \rho$ ($r = -1,00$), porosidade total e densidade do solo ($r = -1,00$) e macroporosidade x microporosidade ($r = -0,76$) (Tabela 5). Correlação positiva forte foi observada entre os atributos capacidade de campo x ponto de murcha permanente ($r = 0,73$), capacidade de campo x água disponível ($r = 0,79$), capacidade de campo x capacidade de água disponível ($r = 0,79$), capacidade de campo x capacidade de campo relativa ($r = 0,97$), ponto de murcha permanente x capacidade de campo relativa ($r = 0,70$), água disponível x capacidade de água disponível ($r = 0,98$), água disponível x capacidade de campo relativa ($r = 0,79$) e capacidade de água disponível x capacidade de campo relativa ($r = 0,89$).

Ressalta-se que as correlações fortes negativas entre verificadas entre capacidade de aeração do solo e porosidade total com a densidade do solo, mostram o efeito negativo que a (ρ) promove sobre a estrutura do solo. Mesmo comportamento foi verificado por Stone e Silveira (2001) e Sampietro *et al.* (2015), para eles o efeito negativo da densidade sobre os demais atributos físicos do solo, está relacionado em grande parte ao processo de compactação do solo. Valores de correlação moderada foram encontrados entre as variáveis: densidade do solo x condutividade hidráulica saturada ($r = 0,42$), ρ x CAS ($r = -0,50$) e ρ x MA ($r = -0,44$). Verifica-se ainda na Tabela 5, que o índice S não apresentou correlação (positiva ou negativa) com a densidade do solo. Fato um tanto quanto curioso, já que por ser um índice estrutural, o S tende reduzir com o aumento de densidade do solo (Shekoftch & Masoudi, 2019). A provável explicação para esse comportamento deve estar relacionada a

valores não significativos de correlação entre esses atributos para a classe de solo e o sistema de manejo avaliados.

Tabela 5 - Correlação de Pearson para atributos físicos de Planossolo Háptico sob sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Agreste da Paraíba, na camada 0,00-0,10 m.

	IEA	IEE	ESTC	ρ	Mi	K_{θ}	CAS	θ_{ar}	α	MA	GGe	ρ_{max}	ρ_R	S	θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{AD}	CAD	CCr		
IEA	1			-0.33				0.31		0.28											
IEE		1	0,40																		
ESTC			1	-0.26	0.47	0.45						-0.47					0.45	0.45			
ρ				1		-0.42	-0.50	-1.00	-1.00	-0.44											
Mi					1	0.46	0.46		-0.76	-0.38			-0.38								
K_{θ}						1	0.52	0.42	0.42												
CAS							1	0.51	0.51												
θ_{ar}								1	1.00	0.44											
α									1	0.44											
MA										1	0.35				0.35						
GGe											1				1.00	-0.51	0.39	0.33	0.26	0.35	0.48
ρ_{max}												1					0,29	-0.24	-0.26		
ρ_R													1		-0.51	0.39	0.33		0.34	0.48	
S														1	-0.57	-0.47	-0.41	-0.50	-0.67		
θ_{CC}															1	0.73	0.79	0.79	0.79	0.97	
θ_{PMP}																1				0.70	
θ_{AD}																	1	0.98	0.79		
CAD																			1	0.89	
CCr																					1

EA = Índice de estabilidade de agregados, IEE = Índice de estabilidade estrutural, EST = Estoque de carbono, ρ = Densidade do solo, Mi = Microporosidade, K_{θ} = Condutividade hidráulica saturada, CAS = Capacidade de aeração do solo, θ_{CAR} = Capacidade de aeração relativa, α = Porosidade total calculada, Ma = Macroporosidade, CGe = Grau de compactação estimado, ρ_{max} = Densidade máxima do solo, ρ_R = Densidade relativa do solo, S = índice S, θ_{CC} = Capacidade de campo, θ_{PMP} = Ponto de murcha permanente, θ_{AD} = Água disponível, CAD = Capacidade de água disponível, CCr = Capacidade de campo relativa. Obs: Apresentaram-se apenas os valores de correlação significativos ($p < 0,05$).

Fonte: Elaborada pelos autores (2020).

Contudo na Tabela 6, verifica-se que houve correlação negativa moderada ($r = -0,58$) entre a densidade do solo e o índice S ; resultado esse proveniente do aumento de densidade do solo e redução da macroporosidade em subsuperfície. Correlação negativa entre densidade do solo e S foi verificada por Cunha *et al.* (2011), Souza *et al.* (2015), Xu *et al.* (2017) e Assis *et al.* (2019). Valores moderados também foram verificados entre CCr, Pt e CAS ($r = 0,51$); são atributos importantes para o funcionamento do solo e estão diretamente relacionados às mudanças estruturais, na difusão de gases próximo as raízes, no movimento de água, na ação dos microrganismos e no acúmulo de carbono no solo (Kravchenko *et al.*, 2019).

Para a profundidade de 0,10-0,20 m (Tabela 6), verificou-se correlação negativa moderada entre os seguintes atributos IEE x CAS ($r = -0,57$); IEE x ponto de murcha permanente ($r = -0,51$), estoque de carbono x densidade máxima do solo ($r = -0,64$); estoque de carbono x S ($r = -0,59$); grau de compactação x densidade máxima do solo ($r = -0,66$); densidade do solo x microporosidade ($r = -0,55$) e densidade x condutividade hidráulica saturada ($r = -0,68$). Valores de correlação negativa forte foram verificados entre os seguintes atributos físicos: densidade do solo x capacidade de aeração relativa ($r = -0,99$); densidade do solo x porosidade total ($r = -0,99$) e microporosidade x macroporosidade ($r = -0,83$), todos significativos a ($p < 0,05$).

Tabela 6 - Correlação de Pearson para atributos físicos de Planossolo Háptico sob sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Agreste da Paraíba, na camada 0,10 – 0,20 m.

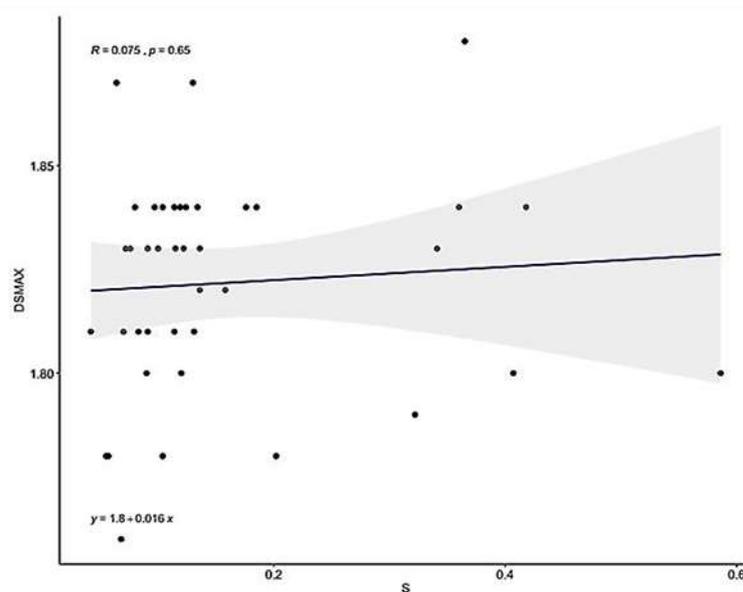
	IEA	IEE	ESTC	ρ	Mi	K_{θ}	CAS	θ_{CAR}	α	MA	GGe	ρ_{max}	ρ_R	S	θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{AD}	CAD	CCr	
IEA	1										-0.39									
IEE		1	0.53				-0.57										-0.51			
ESTC			1								0.63	-0.64	0.41							
ρ				1	-0.55	-0.68	-0.49	-0.99	-0.99				-0.37	-0.59						
Mi					1	0.39	0.52	0.56	0.56	-0.83	0.30		0.53							
K_{θ}						1		0.65	0.65		0.37	-0.28	0.33	-0.32						
CAS							1	0.46	0.46	-0.28										
θ_{CAR}								1	1.00				0.38							
α									1				0.38							
MA										1			0.34							
GGe											1	-0.66	0.82	-0.47	0.31		0.34	0.40	0.38	
ρ_{max}												1		-0.34	0.69					
ρ_R													1							
S														1	-0.22		-0.32	-0.36		
θ_{CC}															1	0.66	0.80	0.81	0.97	
θ_{PMP}																1				0.65
θ_{AD}																	1	0.98	0.76	
CAD																		1	0.82	
CCr																				1

Fonte: Os autores. IEA = Índice de estabilidade de agregados, IEE = Índice de estabilidade estrutural, EST = Estoque de carbono, ρ = Densidade do solo, Mi = Microporosidade, K_{θ} = Condutividade hidráulica saturada, CAS = Capacidade de aeração do solo, θ_{CAR} = Capacidade de aeração relativa, α = Porosidade total calculada, Ma = Macroporosidade, CGe = Grau de compactação estimado, ρ_{max} = Densidade máxima do solo, ρ_R = Densidade relativa do solo, S = índice S, θ_{CC} = Capacidade de campo, θ_{PMP} = Ponto de murcha permanente, θ_{AD} = Água disponível, CAD = Capacidade de água disponível, CCr = Capacidade de campo relativa. Obs: Apresentaram-se apenas os valores de correlação significativos ($p < 0,05$).

Fonte: Elaborada pelos autores (2020).

Comportamento semelhante foi verificado para as correlações positivas, a destacando-se as classificadas como fortes: capacidade de aeração do solo x porosidade total ($r = 1,00$), densidade relativa x grau de compactação do solo ($r = 0,82$), capacidade de campo x água disponível ($r = 0,80$), θ_{cc} x CAD ($r = 0,81$), θ_{cc} x CCr ($r = 0,97$), capacidade de campo relativa x água disponível ($r = 0,76$) e capacidade de água disponível x capacidade de campo relativa ($r = 0,82$). Quanto a densidade máxima do solo e o índice S , verifica-se na Figura 5, que os valores não foram significativos entre essas duas variáveis. Contudo a densidade máxima do solo representa o limite crítico superior de densidade de um solo, acima do qual as plantas terão dificuldades para se desenvolver, em função da redução expressiva da massa de raízes na camada superficial do solo.

Figura 5 - Correlação entre índice S e densidade máxima do solo para duas camadas de solo avaliadas (0,00-0,10; 0,10-0,20 m).



Fonte: Elaborada pelos autores (2020).

Correlação perfeitamente negativa foi verificada entre θ_{ar} e densidade do solo ($r = -1,00$; $p < 0,05$) e entre a porosidade total e densidade do solo ($r = -1,00$; $p < 0,05$), na camada de 0,00-0,10 m (Tabela 7). Na camada de 0,10-0,20 m, a correlação seguiu tendência igual a verificada na camada superficial, com ($r = -0,99$; $p < 0,05$) para θ_{ar} , α e densidade do solo, respectivamente. Gu *et al.* (2019) avaliando a influência da restauração florestal sobre as propriedades físicas do solo no Platô de Loss, China, observaram que a densidade do solo apresentou correlação significativa com a maioria dos atributos avaliados, inclusive com a macroporosidade e condutividade hidráulica saturada.

O aumento de densidade, reflete em aumento no grau de compactação do solo, redução na macroporosidade, redução no desenvolvimento do sistema radicular, ocasiona mudanças na difusão de gases, na disponibilidade de nutrientes e nas propriedades hidráulicas do solo (Laclau & Laclau, 2009). Efeitos negativos da densidade sobre a estrutura do solo devem ser mitigados através da deposição constante de matéria orgânica do solo. Já que o carbono orgânico do solo, proveniente da MOS atua fortemente na porosidade e estrutura dos poros, elevando a capacidade de armazenamento e a dinâmica de gases (Song *et al.*, 2019). Singh *et al.* (2019) avaliando o crescimento e produtividade de algodoeiro em um solo de textura argilo-arenosa na Índia, observaram que a redução de densidade do solo elevou a produtividade do algodão por três safras consecutivas.

Para Fernández *et al.* (2019) a densidade do solo é uma propriedade que está diretamente correlacionada com a densidade de raízes finas do solo, que em superfície tendem a aumentar com a permeabilidade do solo, ocupando os macroporos para realizar as trocas gasosas. Gaerting *et al.* (2002) encontraram evidências de que a densidade radicular diminui significativamente com a diminuição de permeabilidade de gás no solo. E como os solos arenosos leves são mais propensos ao aumento de densidade (Fernández *et al.*, 2019), cuidados devem ser redobrados, a fim de que se evite a degradação estrutural do solo por sistemas de manejo inadequados.

4. Considerações Finais

Através da análise de componentes principais conseguiu-se verificar quais variáveis são mais sensíveis as mudanças de uso do solo. Os grupos de similaridade tenderam a relacionar o maior número de variáveis ao sistema Lavoura Anual (*Milho + Brachiaria decumbens*).

O agrupamento de variáveis relacionadas à estrutura do solo junto ao tratamento Lavoura Anual na camada de 0,00-0,10 m, evidencia a acurácia da análise de componentes principais diante das técnicas de análise estatísticas tradicionais na avaliação de qualidade do solo. Através da análise de correlação, foi possível observar que a densidade do solo foi a variável que apresentou o maior número de interações positivas e negativas com os demais atributos físicos do solo.

Os parâmetros químicos foram sensíveis as mudanças de uso do solo, principalmente na camada de 0-0,1 m, com destaque para os sistemas Lavoura anual e *Brachiaria decumbens*.

A análise multivariada, mostra-se, portanto, uma opção viável para avaliação da saúde do solo, por agrupar o maior número de variáveis possíveis dentro do sistema de manejo mais predominante.

Referências

Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba. (2020). AESA. *Meteorologia do estado da Paraíba: chuvas*. Recuperado de <http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/meteorologia-chuvas>.

Andrade, R. S., Stone, L. F., & Godoy, S. G. (2013). Estimativa da resistência do solo à penetração baseada no índice S e no estresse efetivo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 17(9), 932-937. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000900004>

Arcoverde, S. N. S., Souza, C. M. A., Santos, W. R., Nagahama, H. J., Suárez, A. H. T., & Maciak, P. A. G. (2019). Atributos físicos de Latossolo Vermelho distroférrico cultivado com cana-de-açúcar em função do preparo e local de amostragem. *Cultura Agrônômica*, 28(4), 478-492.

Assis, P. C. R., Stone, L. F., Oliveira, J. M., Wruck, F. J., Madari, B. E., & Heinemann, A. B. (2019). Atributos físicos, químicos e biológicos do solo em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta. *Agrarian*, 12(43), 57-70. <https://doi.org/10.30612/agrarian.v12i43.8520>

Beutler, N. A., Centurion, J. F., Souza, Z. M., Andriolli, I., & Roque, C. G. (2002). Retenção de água em dois tipos de Latossolos sob diferentes usos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 26(3), 829-834. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832002000300029>

Blake, G. R., & Hartge, K. H. (1986). Bulk density. In A. Klute (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 1- Physical and Mineralogical Methods* (pp. 87-95). Madison: American Society of Agronomy.

Borcard, D., Gillet, F., & Legendre, P. (2011). *Numerical Ecological with R*. New York, United States of America: Springer.

Bouma, J. (1991). Influence of soil macroporosity on environmental quality. *Advances in Agronomy*, 46(1), 1-37. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60577-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60577-5)

Carducci, C. E., Oliveira, G. C., Zeviani, W. M., Lima, V. M. P., & Serafim, M. E. (2013). Bimodal pore distribution on soils under conservation management system for coffee crop. *Engenharia Agrícola*, 33(2), 291-302. Doi:10.1590/S0100-69162013000200008

Carducci, C. E., Oliveira, G. C., Oliveira, L. M., Barbosa, S. M., & Silva, E. A. (2015). Retenção de água do solo sob sistema conservacionista de manejo com diferentes doses de gesso. *Revista de Ciências Agrárias*, 58(30), 284-291. Doi: <https://doi.org/10.4322/rca.2014>

Carpenedo, V., & Mielniczuk, J. (1990). Estado de agregação e qualidade de agregados de Latossolos Roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 14(1), 99-105. Available at: <https://www.scielo.br/pdf/cr/v28n4/a06v28n4.pdf>

Conceição, P. C., Bayer, C., Dieckow, J. & Santos, D. C. (2014). Fracionamento físico da matéria orgânica e índice de manejo do carbono de um Argissolo submetido à sistemas conservacionistas de manejo. *Ciência Rural*, 4(5), 794-800. Doi: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782014005000004>

Cunha, E. Q., Stone, L. F., Moreira, J. A., Ferreira, E.P. B., Didonet, A. D., & Leandro, W. M. (2011). Sistemas de preparo do solo e culturas de cobertura na produção orgânica de feijão e milho e atributos físicos do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35(4), 589-602.

Dexter, A. R. (2004). Soil physical quality part I, theory, effects, density and organic matter and effects on root growth. *Geoderma*, 120(3-4), 201-214. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.09.004>

Dexter, A. R., & Bird, N. R. A. (2001). Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. *Soil and Tillage Research*, 57(3-4), 203-212. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.still.2007.07.003>

Doran, J. W., & Parkin, T. B. (1994). Defining and assessing soil quality. In Doran, J. W. et al. (Eds.), *Defining soil quality for a sustainable environment*. Madison: Soil Science Society of America.

Dourado Neto, D., Nielsen, D. R., Hopmans, J. W., Reichardt, K. & Bacchi, O. O. S. (2000). Software to model soil water retention curve (SWRC version 2.00). *Scientia Agricola*, 57(1),191-192. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162000000100031>

Fernández, J. L. F., Hartmann, L. R., Puhmann, H., & von Wilpert, K. (2019). Initial recovery of soil structure of a compacted forest soil can be enhanced by technical treatments and planting. *Forest Ecology and Management*, 431(1-2),54-62.

Doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.04.045>

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2015). *Status of the world's soil resources: Main report*. Rome, Italy: FAO.

Gaerting, T., Schack-Kirchner, H., Hildebrand, E. F., & Wilpert, K. (2002). The impact of soil aeration on oak decline in southwestern Germany. *Forest Ecology and Management*, 159(1-2), 15-25. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00706-X](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00706-X)

Gomes, R. P., et al. (2019). Changes in the physical properties an Amazonian Inceptisol induced bay tractor traffic. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 79(1),103-113.

GU, C., et al. (2019). Influence of vegetation restoration on soil physical properties in the Loess Plateau, China. *Journal of Soil and Sediments*, 19(1),716-728. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2083-3>

Hongyu, K., Sandanielo, V. L. M., & Oliveira Júnior, G. J. (2015). Análise de componentes principais: resumo teórico, aplicação e interpretação. *Engineering and Science*, 5(1), 1-8.

Karlen, D. L., Veum, K. S., Sudduth, K. A., Obrycki, J. F. & Nunes, M. R. (2019). Soil health assessment: Past accomplishments, current activities, and future opportunities. *Soil and Tillage Research*, 195(1), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104365>

Kemper, W. D., & Chepil, W. S. (1965). Size distribution of aggregates. In Black, C.A. (Ed.), *Methods of soil analysis* (pp. 425-442). Madison: American Society of Agronomy.

Laclau, B. P. & Laclau, J. P. (2009). Growth of the whole root system for a plant crop of sugarcane under rainfed and irrigated environments in Brazil. *Field Crops Research*, 114(3), 351-360. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.09.004>

Loss, A., Ribeiro, E. C., Pereira, M. G., & Costa, E. M. (2014). Atributos físicos e químicos do solo em sistemas de consórcio e sucessão de lavoura, pastagem e silvipastoril em Santa Teresa, ES. *Bioscience Journal*, 30(5), 1347-1357.

Marcolin, C. D., & Klein, V. A. (2011). Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 33(2), 349-354. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v33i2.6120>

Mualem, I. (1976). Hydraulic conductivity of unsaturated soils: prediction and formulas. In A, Klute (Ed.), *Methods of soil analysis: I Physical and mineralogical methods* (pp. 799-823). Madison: American Society of Agronomy.

Nascimento, W. B., et al. (2018). Physical and chemical properties of soils in different physiographic environments in the southern Amazonas region. *Bioscience Journal*, 35(4), 1099-1109. Doi: <https://doi.org/10.14393/BJ-v35n4a2019-42153>

Oliveira, D. G., Reis, E. F., Medeiros, J. C., Martins, M. P. O. & Umbelino, A. S. (2018). Correlação espacial de atributos físicos do solo e produtividade de tomate industrial. *Revista Agro@ambiente on-line*, (1)1-15. Doi: <https://doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v12i1.4211>

Peel, M. C., Finlayson, B. L. & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2007, 11(4), 1633-1644.

Pieri, J. C. M. G. (1992). *Fertility of soils: A future for farming in the west African Savannah*. Berlin: Springer-Verlog.

R Development Core Team 2013. *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna: R Foundation for Statistical Computing.

Reynolds, W. D., Drury, C. F., Yang, X. M., Fox, C. A., Tan, C. S., & Zhang, T. Q. (2007). Land management effects on the near-surface physical quality of a clay loam. *Soil and Tillage Research*, 96(1-2), 316-330. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.still.2007.07.003>

Sampietro, J. A., Lopes, E. S., & Reichert, J. M. (2015). Compactação causada pelo tráfego de Feller Bunvher e Skidder em um Neossolo Regolítico sob distintas umidades. *Ciência Florestal*, 25(1), 239-248. Doi: <https://doi.org/10.5902/1980509817482>.

Santos, H. G. et al. (2018). *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. Brasília: Embrapa.

Santos, V. L. S., Silva, C. F., Pereira, M. G., & Berbara, R. L. L. (2018). Comunidade de fungos micorrízicos arbusculares e glomalina em ecossistemas de mata-seca, Brasil. *Revista de La Facultad de Ciencias Agrarias*, 117(1), 13-21.

Shekoftch, H., & Masoudi, A. (2019). Determining the features influencing the-S soil quality index in a semiarid region of Iran using a hybrid GA-ANN algorithm. *Geoderma*, 355(1), 1-6. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113908>

Silva, E. N. S., Montanari, R., Panosso, A. R., Correia, A. R., Tomza, P. K., & Ferraudo, A. S. (2015). Variabilidade de atributos físicos e químicos do solo e produção de feijoeiro cultivado em sistema de cultivo mínimo com irrigação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 39(3), 598-607. <https://doi.org/10.1590/01000683rbcs20140429>

Silva, I. F., & Mielniczuk, J. (1997). Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 21(1), 113-117.

Silva, P. L. F., Oliveira, F. P., Tavares, D. D., Nóbrega, C. C., & Amaral, A. J. (2019). Water availability in a Planosol under integrated crop livestock-forestry system in the Agreste region of Paraíba, Brazil. *Revista Caatinga*, 32(2), 449-457. Doi: <https://doi.org/10.1590/1983-21252019v32n218rc>

Silveira, M. L., & Kohmann, M. M. (2020). Maintaining soil fertility and health for sustainable pastures. In Rouquette Junior, M., Olson-Corriher, V. & Aiken, G. E. (Eds.), *Management Strategies for Sustainable Cattle Production in Southern Pastures* (pp. 123-187). London: Academic Press. Doi: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-814474-9.00003-7>

Singh, K., Choudhary, O. P., Sing, H. P., & Mishra, S. K. (2019). Sub-soiling improves productivity and economic returns of cotton-wheat cropping system. *Soil and Tillage Research*. 189(1), 131-139. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.01.013>

Soil Survey Staff. (2017). *Soil Science Division Staff*. Washington: USDA.

Song, L., Martin, K., Carr, T. R., & Ghahfarokhi, P. K. 2019. Porosity and storage capacity of Middle Devonian shale: A function of thermal maturity, total organic carbon, and clay content. *Fuel*, 241(1),1036-1044. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.12.106>

Souza, E. D., et al. (2019). Soil quality indicators after conversion of “murundu” fields into no-tillage cropping in the Brazilian Cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 54(1), 1-9.

Souza, E. D., et al. (2018). Análise multivariada de atributos químicos e físicos do solo em sistema agroflorestal com teca. *Scientia Agraria*, 19(1), 87-93. Doi: <https://doi.org/10.5380/rsa.v19i1.53385>

Souza, J. M., Bonomo, R., Bonomo, D. Z., & Pires, F. R. (2015). Índice S em solo subsolado da região dos Tabuleiros Costeiros, Espírito Santo. *Magistra*, 27(1),14-22

Stone, L. F., & Silveira, P. M. (2001). Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 25(2),395-401.

Suzuki, L. E. A. S., Reichert, J. M., Reinert, D. J. & Lima, C. L. R. (2007). Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 42(8), 1159-1167. Doi: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2007000800013>

Teixeira, P. C., Donagemma, G. K., Fontana, A. & Teixeira, W. G. (2017). *Manual de métodos e análise de solos*. Brasília: Embrapa.

Tivet, F. et al. (2013). Aggregate C depletion by plowing and its restoration by diverse biomass- C inputs under no-till in sub-tropical and tropical regions of Brazil. *Soil and Tillage Research*, 126(1), 203-218. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.09.004>

Tormena, C. A., Silva, A. P. & Libardi, P. L. (1998). Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 22(3), 573-581. <https://doi.org/10.1590/S0100-06831998000400002>

Van Genuchten, M. T. (1980). A closed- form equation for predicting the hydraulic conductivity on unsaturated soil. *Soil Science Society of American Journal*, 44(3), 892-897.

Veldkamp, E. (1994). Organic carbon turnover in three tropical soils under pasture after deforestation. *Soil Science Society of America Journal*, 58(1), 175-180.

Xu, C., Xu, X., Liu, M., Yang, J., Zhang, Y. & Li, Z. (2017). Developing pretransfer to estimate the S-index for indicating soil quality. *Ecological Indicators*, 83(1), 338-345. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.08.011>

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Pedro Luan Ferreira da Silva – 30%

Flávio Pereira de Oliveira – 20%

Adriana Ferreira Martins – 10%

Walter Esfrain Pereira – 10%

Danillo Dutra Tavares – 10%

André Julio do Amaral – 10%

Alison José da Silva - 10%