

**Qualidade física de um Latossolo Amarelo sob gramíneas e mata nativa no Brejo da
Paraíba**

Physical quality of an Oxisol under grasses and natural forest in Brejo of Paraíba

Calidad física de un Ferralsol bajo hierbas y bosque natural en Brejo de Paraíba

Recebido: 12/08/2020 | Revisado: 23/08/2020 | Aceito: 27/08/2020 | Publicado: 30/08/2020

José Otávio de Moraes Borba

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3620-4868>

Universidade Federal da Paraíba, Brasil

E-mail: otavio.borba@outlook.com

Flávio Pereira de Oliveira

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

Universidade Federal da Paraíba, Brasil

E-mail: pereira@cca.ufpb.br

Pedro Luan Ferreira da Silva

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

Universidade Estadual de Maringá, Brasil

E-mail: pg403039@uem.br

Adriana Ferreira Martins

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

Universidade Federal da Paraíba, Brasil

E-mail: biol.adriana@gmail.com

Danillo Dutra Tavares

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

Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil

E-mail: danilodutrat@hotmail.com

Milton César Costa Campos

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8183-7069>

Universidade Federal do Amazonas, Brasil

E-mail: mcesarsolos@gmail.com

Resumo

O objetivo deste trabalho foi avaliar os atributos físicos de um Latossolo sob gramíneas em experimento de longa duração no Brejo Paraibano. O experimento foi instalado em área experimental do Centro de Ciências Agrárias, na cidade de Areia-PB. O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com cinco tratamentos mais um adicional, e com quatro repetições: T1-*Brachiaria decumbens* (BD), T2-*Brachiaria brizantha* (BB), T3-*Brachiaria humidicola* (BH), T4-*Brachiaria brizantha* MG5 cv Vitória (BBMG5), T5-*Brachiaria ruziziensis* (BR) e Mata nativa (MT), como referência de condição natural do solo. Foram coletadas no centro de cada parcela amostras de solo indeformadas das camadas de 0-10, 10-20 e 20-30 cm para a determinação dos seguintes atributos: porosidade total (PT), Microporosidade (Mi), macroporosidade (Ma), capacidade de aeração do solo (CAS), densidade do solo (Ds), grau de compactação (GC), capacidade de campo (θ_{CC}), ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), água disponível (θ_{AD}), além da resistência do solo à penetração em campo (RP). Conclui-se que após catorze anos da implantação houve diferença significativa na camada superficial entre os tratamentos para os atributos de porosidade total, microporosidade, capacidade de campo, água disponível e capacidade de aeração do solo. O tratamento Mata nativa apresentou os maiores valores de porosidade total e microporosidade na camada de 0-10 cm. Entre as gramíneas observou-se pequena variação nos atributos físicos do solo. Com relação a água disponível, observou-se valores significativos no tratamento *Brachiaria brizantha* na camada de 0-10 cm.

Palavras-chave: *Brachiaria*; Recuperação de solo; Porosidade; Compactação.

Abstract

The aim of this work was to evaluate the physical attributes of an Oxisol under grasses in a long-term experiment in Brejo Paraibano. The experiment was installed in an experimental area of the Center for Agricultural Sciences, in the city of Areia-PB. The experimental design was in randomized blocks, with five treatments plus an additional one, and with four replications: T1-*Brachiaria decumbens* (BD), T2-*Brachiaria brizantha* (BB), T3-*Brachiaria humidicola* (BH), T4-*Brachiaria brizantha* MG5 cv Vitória (BBMG5), T5-*Brachiaria ruziziensis* (BR) and Native forest (MT), as a reference of the soil's natural condition. Undisturbed soil samples from the 0-10, 10-20 and 20-30 cm layers were collected in the center of each plot to determine the following attributes: total porosity (PT), Microporosity (Mi), macroporosity (Ma), soil aeration capacity (SAC), bulk density (Bd), degree of compaction (DC), field capacity (θ_{FC}), permanent wilt point (θ_{PW}), available water (θ_{AW}), in

addition to soil resistance to penetration in field (PR). It is concluded that fourteen years after implantation there was a significant difference in the surface layer between treatments for the attributes of total porosity, microporosity, field capacity, available water and soil aeration capacity. The native forest treatment showed the highest values of total porosity and microporosity in the 0-10 cm layer. Among the grasses, a small variation in the physical attributes of the soil was observed. Regarding available water, significant values were observed in the *Brachiaria brizantha* treatment in the 0-10 cm layer.

Keywords: *Brachiaria*; Soil recovery; Porosity; Compaction.

Resumen

El objetivo de este trabajo fue evaluar los atributos físicos de un Oxisol bajo pastos en un experimento a largo plazo en Brejo Paraibano. El experimento se instaló en un área experimental del Centro de Ciencias Agrícolas, en la ciudad de Areia-PB. El diseño experimental fue en bloques al azar, con cinco tratamientos más uno adicional, y con cuatro repeticiones: T1-*Brachiaria decumbens* (BD), T2-*Brachiaria brizantha* (BB), T3-*Brachiaria humidicola* (BH), T4-*Brachiaria brizantha* MG5 cv Vitória (BBMG5), T5-*Brachiaria ruziziensis* (BR) y Bosque nativo (MT), como referencia de la condición natural del suelo. Se recolectaron muestras de suelo inalterado de las capas de 0-10, 10-20 y 20-30 cm en el centro de cada parcela para determinar los siguientes atributos: porosidad total (PT), microporosidad (Mi), macroporosidad (Ma), capacidad aireación del suelo (CAS), densidad del suelo (Ds), grado de compactación (GC), capacidad de campo (θ_{CC}), punto de marchitez permanente (θ_{PMP}), agua disponible (θ_{AD}), además de la resistencia del suelo a la penetración en campo (RP) Se concluye que a los catorce años de la implantación hubo diferencia significativa en la capa superficial entre tratamientos para los atributos de porosidad total, microporosidad, capacidad de campo, agua disponible y capacidad de aireación del suelo. El tratamiento de bosque nativo mostró los valores más altos de porosidad total y microporosidad en la capa de 0-10 cm. Entre las gramíneas, se observó una pequeña variación en los atributos físicos del suelo. En cuanto al agua disponible, se observaron valores significativos en el tratamiento de *Brachiaria brizantha* en la capa 0-10 cm.

Palabras-clave: *Brachiaria*; Recuperación de suelos; Porosidad; Compactación.

1. Introdução

A degradação física do solo tem sido apontada como um dos principais obstáculos para a produção agrícola no Brasil (Barros et al., 2018), pois compromete a habilidade do mesmo em manter os serviços ecossistêmicos essenciais para o desenvolvimento dos vegetais (Stefanoski et al., 2013). Das atividades que contribuem para o processo de degradação física do solo, destacam-se o preparo convencional contínuo, o pisoteio animal, o tráfego intenso de máquinas e implementos agrícolas e a ausência de manejo das pastagens (Santos et al., 2011).

Essas atividades comprometem substancialmente a produtividade das culturas, já que a compactação promovida pelo processo de degradação do solo reduz significativamente a disponibilidade de água, nutrientes e oxigênio às plantas (Balbinot Junior et al., 2009). A utilização de gramíneas em condições adequadas de manejo pode contribuir na amenização do processo de degradação física do solo, em função do desenvolvimento do sistema radicular, que é bem agressivo e explora um grande volume de solo, além do significativo aporte de biomassa radicular e também em superfície, e da facilidade de adaptação às variadas condições edafoclimáticas (Silva et al., 2005).

Nos sistemas de manejo que utilizam plantas de cobertura, as gramíneas perenes apresentam ação agregante mais prolongada do que as leguminosas (Albuquerque et al., 2005). Por ter um extenso sistema radicular concentrado na superfície, quando considerado longo efeito de tempo, as gramíneas resultam em valores altos de estabilidade dos agregados, principalmente para espécies perenes, pois as ligações dos pontos de contato entre partículas minerais e agregados são bem pronunciadas (Londe et al. 2011).

Além dos benefícios a qualidade física do solo, a manutenção de palhada em superfície promove melhorias na retenção de água no solo e redução na amplitude térmica, redução no deslocamento do solo ocasionado pelo escoamento superficial (Silva et al., 2018) e melhorias nos índices de produtividade e disponibilidade de água (Braga et al., 2017).

Podendo assim a estabilidade de agregados e a porosidade do solo serem alteradas pela implantação de pastagens, como demonstrado por Kondo et al. (2012) a partir da análise micromorfológica do solo sob pastagem implantada há dois anos. Nessas pastagens recém implantadas, há um incremento de agentes ligantes e aumento na macroporosidade em função do crescimento radicular e atividade de minhocas, que formam vasta rede de bioporos, orientados verticalmente (Kondo et al., 2012).

Contudo, verifica-se que trabalhos sobre o efeito das gramíneas sobre a qualidade física do solo em experimentos de longa duração utilizando diferentes tipos de gramíneas

como cobertura são um tanto incipientes na literatura, principalmente, para as condições edafoclimáticas do brejo da Paraíba. Assim, a utilização de atributos físicos sensíveis ao processo de degradação do solo como densidade, porosidade e resistência do solo à penetração (Hillel, 1998), podem ser utilizados como bons indicadores na avaliação do efeito dessas gramíneas na qualidade física do solo o longo do tempo.

Objetivou-se com este trabalho, avaliar a qualidade física de um Latossolo Amarelo no Brejo da Paraíba sob experimento com gramíneas com longo tempo de duração e sob solo de mata nativa, como condição natural do solo.

2. Material e Métodos

Caracterização do local de estudo

O experimento foi conduzido na área experimental da fazenda “Chã de Jardim”, pertencente ao Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Paraíba, em Areia-PB (Figura 1). O Município está inserido na microrregião do Brejo e mesorregião do Agreste da Paraíba ($6^{\circ}58'12''S$; $35^{\circ}41'15''W$ e altitude de 620 m). Conforme a classificação de Köppen, o clima que predomina é do tipo As' , tropical, quente e úmido, com chuvas no período de outono e inverno e precipitação média anual de 1400 mm (Almeida et al., 2014).

Figura 1. Localização da área experimental Chã de Jardim, em Areia- PB.



Fonte: Os autores.

A temperatura média anual é de $24,5^{\circ}C$ e a umidade relativa do ar varia em média de 80%; quanto ao período chuvoso, 62% da precipitação anual distribuiu-se entre os meses de

abril e julho (Lila et al., 2014). O solo foi classificado como Latossolo Amarelo Distrófico de textura média (Santos et al., 2018). A caracterização física e de química e fertilidade do solo encontram-se apresentadas nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1. Caracterização física do solo da área experimental com gramíneas e no solo sob mata nativa.

Prof. (cm)	Areia					Sil.	Arg.	DP	ADA	GF	Classificação textural
	AMG	AG	AME	AF	AMF						
	g kg ⁻¹							g cm ⁻³	%		
Área com gramíneas											
0-10	43	199	196	112	24	69	357	2,58	14	96	Argila arenosa
10-20	77	258	184	85	17	44	335	2,55	13	96	Franco argilo arenoso
20-30	57	226	168	85	17	28	419	2,61	13	97	Argila arenosa
Área de Mata Nativa (Floresta Estacional Semidecidual (IBGE, 2012))											
0-10	38	228	238	107	15	14	360	2,51	26	93	Argila arenosa
10-20	51	187	169	96	18	56	422	2,50	26	94	Argila arenosa
20-30	40	217	198	104	20	41	380	2,66	13	97	Argila arenosa

Prof. = Profundidade; AMG = Areia muito grossa; G = Grossa; AME = Areia média; F = Fina; AMF = Areia muito fina; Sil= Silte; Arg.= Argila. Dp = Densidade de partículas; ADA = Argila dispersa em água; GF = Grau de flocculação; Fonte: Fonte Própria.

Tabela 2. Caracterização de química e fertilidade do solo da área experimental com gramíneas e no solo sob mata nativa.

Prof.	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al ³⁺	SB	CTC	Na ⁺	MOS	P	K ⁺
(cm)	H ₂ O (1:2,5)	----- mmol _c kg ⁻¹ -----							g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mmol _c kg ⁻¹
Área com gramíneas											
0-10	6,0	38	17	2	64	58	122	1	50	2	1,2
10-20	6,0	37	18	1	60	57	117	1	48	2	0,9
20-30	6,0	35	16	1	55	53	108	1	38	2	0,7
Área de Mata Nativa (Floresta Estacional Semidecidual (IBGE, 2012))											
0-10	4,8	12	7	28	140	48	188	1	62	2	1,3
10-20	4,6	2	2	33	113	38	151	1	51	1	0,7
20-30	4,4	2	2	35	102	40	142	1	40	1	0,5

Prof. = Profundidade; Ca = Cálcio Acetato de Amônio; Mg = Magnésio Acetato de Amônio; Al = Alumínio KCl 1 mol.L⁻¹; H+Al = Hidrogênio + Alumínio Acetato de Cálcio; SB = Soma de bases; CTC = Capacidade de troca catiônica; Na = Sódio Acetato de Amônio; M.O. = Matéria Orgânica do Solo Titulação; P = Fósforo Mehlich 1; K = Potássio Acetato de Amônio; Fonte: Fonte Própria.

As gramíneas foram plantadas no ano de 2006 em parcelas experimentais com 50 m² de área total (10 x 5 m). As parcelas distanciavam um metro entre si e dois metros entre blocos. Antes da implantação do experimento realizou-se a correção do solo com calcário dolomítico, visando elevação do pH do solo a 6,5, e posterior adubação utilizando 553 kg ha⁻¹ de NPK (60-80-45), nas formas de: sulfato de amônio, superfosfato triplo e cloreto de potássio. Do ano de 2007 até 2019, ano de coleta das amostras para as análises de física e química e fertilidade do solo, o experimento foi conduzido sem adubação de manutenção, realizando-se apenas capinas manuais, retirando plantas invasoras, na frequência de duas vezes ao ano. A mata nativa utilizada como tratamento controle encontrava-se nas proximidades da área experimental com as gramíneas (Figura 1), sobre a mesma classe de solo. Trata-se de um fragmento de mata atlântica do tipo ombrófila aberta em excelente estado de conservação.

Delineamento experimental

O delineamento experimental adotado foi em blocos casualizados (DBC), com seis tratamentos e quatro repetições (5 x 4 + 1), cinco gramíneas com quatro repetições mais o

tratamento mata nativa como descrito a seguir: T₁- *Brachiaria decumbens* (Stapf.); T₂- *Brachiaria brizantha*; T₃- *Brachiaria humidicola* (Rendle) Schweick vr.; T₄- *Brachiaria brizantha* cv. MG5 - Vitória, T₅- *Brachiaria ruziziensis* e T₆- Mata nativa.

O plantio das gramíneas foi realizado através de estolões, no espaçamento de 0,5 x 0,5m, com exceção da *Brachiaria brizantha* cultivar MG5, cujo plantio foi efetuado através de sementes, em covas, também no espaçamento 0,5 x 0,5m.

Atributos avaliados

Os atributos avaliados foram: Porosidade total (PT), microporosidade (Mi), macroporosidade (Ma), capacidade de aeração do solo (CAS), densidade do solo (Ds), grau de compactação (GC), capacidade de campo (θ_{CC}), ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), água disponível (θ_{AD}) e resistência do solo à penetração (RP).

A microporosidade (Mi; $m^3 m^{-3}$) foi determinada através do volume de água contido nas amostras indeformadas, correspondente ao potencial matricial de -6 kPa (θ_6). Subtraindo-se os valores de microporosidade da porosidade total (PT – Mi), obteve-se a macroporosidade do solo (Ma; $m^3 m^{-3}$) (Teixeira et al., 2017). A porosidade total foi determinada através da umidade correspondente ao volume de saturação, conforme descrito no manual de métodos de análises de solo (Teixeira et al., 2017). A capacidade de aeração do solo (CAS) foi determinada conforme metodologia descrita por (Reynolds et al., 2007) utilizando a seguinte equação:

$$CAS (m^3 m^{-3}) = \theta_s - \theta_{CC} \quad (1)$$

Onde: CAS = capacidade de aeração do solo ($m^3 m^{-3}$); θ_s = umidade do solo saturado ($m^3 m^{-3}$); θ_{CC} = capacidade de campo determinada em câmara de Richards com placa porosa na tensão de -10 kPa ($m^3 m^{-3}$). Por ser um importante parâmetro de avaliação de qualidade do solo, geralmente a CAS adequada para que haja um equilíbrio entre o volume de água e a difusão de gases no solo deve ser $\geq 0,10 m^3 m^{-3}$ ou 10%.

Coletaram-se amostras de solo com estrutura indeformada com auxílio de cilindros metálicos tipo Uhlund com $98,7 cm^3$, para determinar a densidade do solo (Ds, $g cm^{-3}$) através massa do solo seco pelo volume da amostra (Blake & Hartge, 1978). Com os dados de densidade do solo foi possível estimar o grau de compactação (GCe), atributo este que define o percentual de compactação do solo em relação ao seu máximo, conforme metodologia apresentada por Suzuki et al. (2007).

$$GCe (\%) = (Ds/ Ds_{max}) * 100 \quad (2)$$

Onde: GCe = grau de compactação estimado (%); Ds = densidade do solo ($g\ cm^{-3}$) e Ds_{max} = densidade máxima do solo ($g\ cm^{-3}$). Levou-se em consideração o valor de densidade relativa (Dr) = 0,75, como limite restritivo para solos de textura arenosa (Marcolin & Klein, 2011).

As amostras de solo foram saturadas e submetidas aos potenciais matriciais -10 (θ_{10}) e -1500 (θ_{1500}) kPa em câmara de Richards com placas porosas para a determinação da capacidade de campo (θ_{CC} ; $m^3\ m^{-3}$) e o ponto de murcha permanente (θ_{PMP} ; $m^3\ m^{-3}$) (Klute, 1986). A água disponível (θ_{AD} ; $m^3\ m^{-3}$) foi determinada usando a seguinte fórmula:

$$\theta_{AD} = \theta_{10} - \theta_{1500} \quad (3)$$

Onde: θ_{AD} —corresponde a água disponível, θ_{10} o conteúdo de água correspondente a capacidade de campo e θ_{1500} o conteúdo de água correspondente ao ponto de murcha permanente. Determinou-se a resistência do solo à penetração (RP) na camada de 0-60 cm, adotando-se os procedimentos descritos por Stolf et al. (1983), utilizando um penetrômetro de impacto, modelo comercial: IAA-PLANALSUCAR-Stolf. O penetrômetro de cone, também denominado de penetrômetro dinâmico, é um equipamento largamente utilizado em aplicações agrícolas para detectar camadas compactadas de solo (Silveira et al., 2010). A transformação de penetração na unidade de $cm\ impacto^{-1}$ para MPa, ou seja, resistência à penetração foi procedida de acordo com Stolf (1991), utilizando a equação 1:

$$RMPS = \left[\frac{Mg + mg + \left(\frac{M}{M+m} \times \frac{Mg \times h}{X} \right)}{A} \right] \times 0,098 \quad (4)$$

Em que: RMPS - resistência mecânica do solo à penetração; M - massa do êmbolo, 4,03 kg; g - aceleração da gravidade; m - massa do aparelho excetuando o êmbolo, 3,24 kg; h - altura percorrida pelo êmbolo, 0,56 m; x - penetração do cone no solo, cm/impacto; A = Área basal do cone (m^2). Abriu-se trincheiras nas parcelas experimentais para a coleta de amostras de solo com estrutura indeformada até a camada de 60 cm para determinação da umidade gravimétrica sob condições de campo, utilizando a equação 2:

$$U_g = (M_{su} - M_{ss} / M_{ss}) \quad (5)$$

Onde: M_{su} é a massa do solo úmido (kg^{-1}) e M_{ss} é a massa do solo seco (kg^{-1}) determinada em estufa com temperatura ± 105 °C.

Procedimentos estatísticos

Realizou-se a análise de variância e o teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade utilizando o *software* livre R (R Core Team, 2013).

3. Resultados e Discussão

Na Tabela 3 encontram-se apresentados os valores médios para os atributos porosidade total (PT), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), capacidade de aeração do solo (CAS), densidade do solo (Ds) e grau de compactação (GC). Verifica-se que houve diferença estatística para PT, Mi e CAS na camada de 0-10 cm, e para a CAS na camada de 10-20 cm.

Tabela 3. Atributos físicos de Latossolo sob gramíneas em experimento de longa duração do brejo paraibano. Areia- PB.

Tratamento	PT	Ma	Mi	CAS	DS	GC
	----- m^3m^{-3} -----				g cm^{-3}	-- % --
0-10 cm						
BD	0,48 b	0,15 a	0,32 b	0,21 ab	1,19 a	64,1 a
BB	0,48 b	0,14 a	0,34 b	0,19 b	1,16 a	62,5 a
BH	0,49 b	0,14 a	0,34 b	0,19 ab	1,14 a	61,6 a
BB MG5	0,48 b	0,14 a	0,34 b	0,21 ab	1,17 a	63,4 a
BR	0,46 b	0,13 a	0,32 b	0,22 ab	1,16 a	62,9 a
MT	0,60 a	0,18 a	0,42 a	0,28 a	1,04 a	56,0 a
CV (%)	3,7	11,0	4,0	13,6	4,2	4,2
10-20 cm						
BD	0,51 a	0,14 a	0,37 a	0,18 ab	1,25 a	67,6 a
BB	0,52 a	0,13 a	0,39 a	0,18 ab	1,24 a	66,8 a
BH	0,54 a	0,16 a	0,37 a	0,17 ab	1,19 a	64,5 a
BB MG5	0,51 a	0,15 a	0,35 a	0,15 b	1,25 a	67,7 a
BR	0,53 a	0,14 a	0,39 a	0,21 ab	1,20 a	64,6 a

MT	0,57 a	0,20 a	0,37 a	0,26 a	1,09 a	58,8 a
CV (%)	5,2	20,7	6,6	15,9	6,1	6,1
20-30 cm						
BD	0,50 a	0,15 a	0,37 a	0,15 a	1,25 a	67,3 a
BB	0,52 a	0,15 a	0,37 a	0,13 a	1,22 a	65,7 a
BH	0,52 a	0,15 a	0,36 a	0,14 a	1,23 a	66,2 a
BB MG5	0,53 a	0,15 a	0,38 a	0,16 a	1,20 a	64,6 a
BR	0,53 a	0,17 a	0,36 a	0,17 a	1,20 a	65,0 a
MT	0,52 a	0,16 a	0,39 a	0,23 a	1,13 a	60,9 a
CV (%)	3,2	5,5	4,4	29,8	3,6	3,6

PT= Porosidade total; MA= Macroporosidade; MI= Microporosidade; CAS= Capacidade de aeração do solo; DS= Densidade do solo; GC= Grau de compactação; K θ = Condutividade hidráulica saturada. BD= *Brachiaria decumbens*; BB= *Brachiaria brizantha*; BH= *Brachiaria humidicola*; BBMG5= *Brachiaria brizantha* MG5 cv Vitória; BR= *Brachiaria ruziziensis*; MT= Mata nativa. Médias seguidas por letras iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Fonte: Os autores.

A porosidade total (PT) variou de 0,46 a 0,60 m³ m⁻³ na camada de 0-10 cm entre os tratamentos avaliados, sendo superior na MT. O atributo apresentou uma tendência de redução com o aumento de profundidade do solo, variando de 0,51 a 0,57 m³ m⁻³ na camada de 10-20 cm e de 0,50 a 0,53 m³ m⁻³ na camada de 20-30 cm. Nota-se através desses dados que a porosidade total do solo ficou acima do limite crítico em todos os tratamentos e camadas avaliadas. Segundo Silva et al. (2012), o volume ideal de poros para manutenção da qualidade física do solo é de 0,50 m³ m⁻³.

Os solos argilosos e franco-argilosos geralmente apresentam elevada porosidade total, pois as partículas que compõem o solo não se arranjam de maneira compactada, favorecendo assim a formação de agregados, que elevam, mesmo de forma microscópica, o aumento de porosidade do solo (Silva et al., 2012). A elevação no volume de poros do solo interfere diretamente em outros atributos como a permeabilidade, infiltração, retenção e disponibilidade de água, além de favorecer o desenvolvimento do sistema radicular dos vegetais (Carmo et al., 2018).

A elevada porosidade total no solo de mata 0,60 m³ m⁻³ (Tabela 3) para a camada de 0-10 cm pode estar relacionada à ausência de intervenção antrópica e ao aporte de resíduos vegetais no local de coleta das amostras. Em ambientes florestais, acumulam-se grandes quantidades de resíduos orgânicos e raízes nas camadas superficiais, que favorecem o rompimento de camadas de solo adensadas e compactadas que, juntamente a atividade dos

microrganismos reduz a densidade e eleva a quantidade de poros no solo (Prevedello et al., 2013).

Observa-se na Tabela 3 que o atributo macroporosidade (MA) não diferiu entre os tratamentos e camadas de solos avaliadas, variando de 0,13 a 0,18 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ na camada de 0-10 cm, 0,13 a 0,20 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ na camada de 10-20 cm e de 0,15 a 0,17 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ na camada de 20-30 cm. A macroporosidade ficou acima do limite crítico em todos os tratamentos e camadas de solo avaliadas, que segundo Reichert et al. (2007) é de 0,10 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ (Tabela 3). O tratamento SC apresentou uma MA de 0,17 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ na camada de 20-30 cm.

A microporosidade foi significativa na camada de 0-10 cm (Tabela 3), sendo superior no tratamento mata nativa, com 0,42 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$. Na camada de 10-20 a MI variou de 0,35 a 0,39 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ e de 0,36 a 0,39 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ na camada de 20-30. Com exceção do tratamento MT, houve aumento da MI para os demais tratamentos avaliados, com aumento médio de 0,05 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ entre a camada superficial e subsuperficial. Esse fato pode estar relacionado ao aumento do teor de argila em subsuperfície (Tabela 1) e elevação da Ds com o aumento de profundidade (Tabela 3). Os valores de microporosidade desse estudo foram superiores aos encontrados por Carvalho et al. (2016), trabalhando com evolução de atributos físicos, químicos e biológicos de solo hidromórfico sob sistema de integração lavoura-pecuária no Pampa gaúcho. Eles observaram valores de MI abaixo de 35%, possivelmente ocasionado pelo processo de revolvimento do solo antes da coleta de amostras para determinação dos atributos.

Conforme apresentado na Tabela 4, o atributo capacidade de aeração do solo (CAS) foi significativo ao nível de ($p < 0,05$) nas camadas de 0-10 e 10-20 cm e não significativo na camada de 20-30 cm. Os valores médios variaram de 0,19 a 0,28 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ na camada de 0-10 cm, de 0,15 a 0,26 na camada de 10-20 cm e de 0,13 a 0,23 na camada de 20-30 cm. O tratamento MT foi superior aos demais tratamentos nas três camadas de solo avaliadas. Verificou-se que todos os valores ficaram acima do limite crítico de 0,10 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ (Reynolds et al., 2007). Registra-se também que houve redução da CAS com o aumento de profundidade, com redução de 31% entre a camada de 0-10 e 20-30 cm para o tratamento BB.

A CAS, quando acima do limite crítico pode comprometer o desenvolvimento das culturas em função de problemas relacionados à baixa capacidade de retenção de água no solo (Silva et al., 2018) e elevada difusão de gases e, quando abaixo de 10%, favorece o aparecimento de um ambiente oxídico com a ausência de gases essenciais para o desenvolvimento do sistema radicular das plantas, principalmente o O_2 . Além do aumento de densidade do solo em profundidade, fatores como aumento do grau de compactação e maiores concentrações de areia fina, silte e argila em relação as camadas superficiais do solo reduz a

CAS, sendo, portanto, um atributo sensível tanto às práticas de manejo, quando a variabilidade espacial da textura do solo.

A densidade do solo (Ds) não diferiu entre os tratamentos e camadas avaliadas ($p < 0,05$). Os valores médios variaram de 1,04 a 1,19 g cm^{-3} na camada de 0-10 cm, de 1,09 a 1,25 na camada de 10-20 cm e de 1,13 a 1,25 g cm^{-3} na camada de 20-30 cm (Tabela 3). Contudo, todos os valores médios de Ds ficaram dentro da faixa de limite considerada como adequada para solos de textura média a argilosa, que segundo Reinert et al. (2008) varia de 1,30 a 1,40 g cm^{-3} . No tratamento BR verificou-se valores de Ds menores que no tratamento BD, possivelmente pelodesenvolvimento mais agressivo do sistema radicular da *Brachiaria ruziziensis*, que serve como um arado biológico, descompactando as camadas de solo e reduzindo a densidade. . Outro fato observado foi o aumento de Ds com elevação na profundidade de solo da camada avaliada, tendência seguida por todos os tratamentos.

O solo na MT manteve um menor valor de densidade do solo em relação aos demais tratamentos nos três níveis de profundidade, reduzindo de 10 a 13 % o valor desse atributo. Anjos et al. (1994) reportaram que o ambiente de floresta preserva a condição estrutural original do solo em relação a sistemas de produção intensamente manejados. Em alguns casos o aumento de densidade do solo pode ser um processo natural, como frequentemente encontrados nos Latossolo dos tabuleiros costeiros, que dificultam dentre outros fatores, a diminuição do volume de solo explorado pelas raízes (Resende, 2000).

Não houve diferença significativa entre os tratamentos avaliadas ($p < 0,05$) para o atributo grau de compactação (GC). Os valores variaram de 56,0 a 64,1% na camada de 0-10 cm, de 58,8 a 67,7% na camada de 10-20 cm e de 60,9 a 67,3% na camada de 20-30 cm (Tabela 3). Os menores valores do GC foram verificados no tratamento MT em todas as profundidades avaliadas, enquanto os maiores foram observados no tratamento BD, isso resultou em um aumento do GC de 8,1, 8,8 e 6,4% nas camadas 0-10, 10-20 e 20-30 cm, respectivamente. O grau de compactação apresenta correlação positiva com a densidade do solo, por isso aumenta com elevação na profundidade da camada de solo avaliada.

Um ponto positivo observado nesse estudo é que tanto os valores de densidade do solo quanto do grau de compactação ficaram abaixo do limite restritivo. Segundo Suzuki et al. (2007), o valor médio restritivo para a maioria das culturas em solo com 30-70% de argila é de 75%. Verifica-se nesse estudo que todos os valores ficaram abaixo desse limite. Esse valores médios foram menores que os observados por Cortez et al. (2018), trabalhando com a avaliação de atributos físicos de solo em Latossolo Vermelho eutroférico com 55% de Argila. Para eles, a elevação no grau de compactação do solo com o aumento de profundidade

está relacionado ao uso de implementos agrícolas no manejo e preparo do solo durante o ciclo de produção. A ausência de intervenção antrópica na área experimental ao longo do tempo refletiu em valores baixos de grau de compactação.

Os fatores que elevam o grau de compactação do solo são a intensa mobilização da camada superficial em sistemas de produção anual, e nas pastagens está relacionada ao pisoteio animal contínuo (Dias Filho et al., 2014). Verifica-se que o grau de compactação do solo pode ser utilizado como indicador de qualidade por se correlacionar com outros atributos físicos como porosidade, densidade e a condutividade hidráulica. Suzuki et al. (2007) avaliando o grau de compactação do solo e rendimentos de cultura em Latossolo e Argissolo, observaram que a produtividade da soja só foi afetada quando o GC ficou acima dos 85%, valor este superior aos apresentados na Tabela 4. Nesse caso, verifica-se que a utilização de gramíneas com sistema radicular agressivo é fundamental na redução do grau de compactação do solo por revolver naturalmente as camadas adensadas.

Na Tabela 4 encontram-se apresentados os valores médios dos atributos capacidade de campo (θ_{CC}), ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) e água disponível (θ_{AD}). Observa-se que houve diferença estatística entre tratamentos para os atributos capacidade de campo e água disponível na camada de 0-10 cm. O tratamento com a melhor média para a capacidade de campo foi o MT com $0,275 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, já a menor média foi encontrada no tratamento BD com $0,208 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

Tabela 4. Capacidade de campo (θ_{CC}), ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) e água disponível (θ_{AD}) em Latossolo sob gramíneas em experimento de longa duração do brejo paraibano. Areia- PB.

Tratamento	θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{AD}
	-----m ³ m ⁻³ -----		
<u>0-10 cm</u>			
BD	0,208 ab	0,143 a	0,065 b
BB	0,245 a	0,162 a	0,083 a
BH	0,208 ab	0,142 a	0,066 b
BB MG5	0,213 ab	0,142 a	0,071 b
BR	0,210 ab	0,149 a	0,061 b
MT	0,175 b	0,139 a	0,036 b
CV (%)	6,8	9,3	12,8
<u>10-20 cm</u>			
BD	0,233 a	0,155 a	0,078ab
BB	0,240 a	0,152 a	0,088ab
BH	0,225 a	0,152 a	0,073ab
BB MG5	0,245 a	0,155 a	0,090 ab
BR	0,235 a	0,140 a	0,095 a
MT	0,192 a	0,158 a	0,034 b
CV (%)	12,1	15,9	27,0
<u>20-30 cm</u>			
BD	0,268 a	0,175 a	0,093 a
BB	0,287 a	0,172 a	0,115 a
BH	0,270 a	0,168 a	0,102 a
BB MG5	0,292 a	0,172 a	0,120 a
BR	0,255 a	0,165 a	0,090 a
MT	0,207 a	0,165 a	0,042 a
CV (%)	14,9	11,3	37,1

BD= *Brachiaria decumbens*; BB= *Brachiaria brizantha*; BH= *Brachiaria humidicola*; BBMG5= *Brachiaria brizantha* MG5 cv Vitória; BR= *Brachiaria ruzizizneis*; MT= Mata nativa. Médias seguidas por letras iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Fonte: Os autores.

Com relação ao atributo água disponível, a melhor média foi verificada no tratamento BB $0,081 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Para a camada de 10-20 cm verificou-se maior média no tratamento SC com $0,091 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, sendo superior aos demais tratamentos, inclusive ao tratamento MT. Para a camada de 20-30 cm verificou-se que não houve diferença significativa entre os tratamentos avaliados, com médias variando de 0,207 a $0,292 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para a θ_{CC} , e de 0,165 a $0,175 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para o θ_{PMP} e de 0,042 a $0,122 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, $0,122$ a $0,042 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para a água disponível.

A θ_{CC} foi superior no tratamento MT $0,175 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, provavelmente pelo volume significativo de macro e microporos em superfície, favorecendo assim uma maior taxa de infiltração e armazenamento de água no solo. Para Brito et al. (2011), a capacidade de campo pode ser influenciada por diversos fatores, como as características físico-hídricas do solo, a distribuição de poros, o tamanho das partículas e a quantidade de matéria orgânica nos horizontes pedológicos. A água disponível foi maior em função do grande volume de água armazenado na θ_{CC} em relação ao θ_{PMP} . Como o solo da área experimental apresentou elevada macroporosidade e porosidade total, talvez tenha contribuído para uma maior taxa de evaporação de água, reduzindo assim o intervalo de água disponível. E, como os Latossolos possuem perfis profundos, talvez o maior armazenamento de água ocorra nas camadas mais profundas do solo.

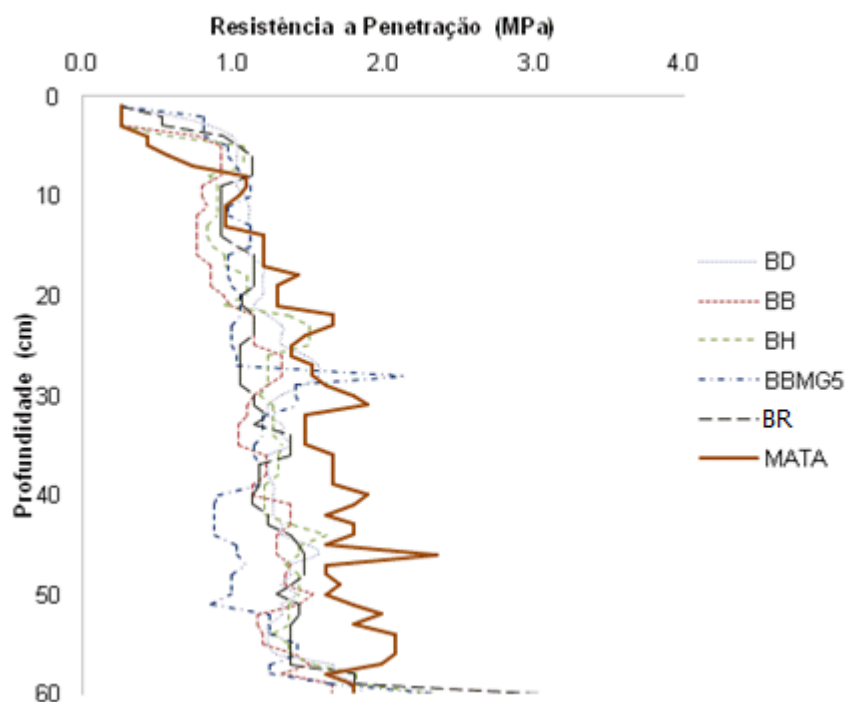
Na profundidade de 10-20 cm, a θ_{AD} foi expressivamente menor no tratamento MT em relação aos demais tratamentos, inclusive no tratamento BR. Provavelmente, o aporte de matéria orgânica em subsuperfície pelas raízes da *Brachiaria ruziziensis* deve ter favorecido o maior acúmulo de água, ou mesmo pelo maior grau de compactação e elevação na densidade com o aumento de profundidade do solo. Beutler et al. (2002), trabalhando com retenção de água em dois tipos de Latossolos sob diferentes usos, verificaram uma participação efetiva da matéria orgânica do solo na retenção de água. Para eles a interface de contato entre a matéria orgânica do solo e as frações granulométricas, como a argila, atuam diretamente direta na retenção de água no solo, inclusive quando os teores de matéria orgânica variaram entre 8 a 68 g kg^{-1} .

Silva et al. (2017) verificaram baixos valores de água disponível no solo de floresta, o que está relacionado ao elevado conteúdo de água no θ_{PMP} . Como já salientado anteriormente, a água encontra-se fortemente retida, permanecendo indisponível para as plantas. Beutler et al. (2002) avaliando a CAD em Latossolos sob diferentes manejos, verificaram que a mata apresentou o maior teor de matéria orgânica, a menor densidade do solo e menor CAD. Para explicar seus resultados, os autores inferiram que a matéria orgânica melhora a estrutura do solo, mas não a retenção de água, quando ocorrem variações na densidade do solo. Assim

sendo, a densidade do solo nos solos cultivados tem efeito positivo e superior ao da matéria orgânica no volume de água disponível no solo.

Na Figura 2 encontra-se apresentado o comportamento da resistência à penetração do solo sob os diferentes tratamentos com gramíneas e no solo sob mata nativa. Verifica-se que houve aumento na RP com elevação na profundidade da camada de solo avaliada, atingindo valores maiores que 2,0 MPa a partir da camada de 40 cm.

Figura 2. Resistência à penetração em Latossolo sob gramíneas em experimento de longa duração do brejo paraibano. Areia- PB.



Fonte: Os autores.

A resistência à penetração nas camadas de 0-10, 10-20 e 30-40 cm ficou abaixo de 2 MPa em todos os tratamentos. Na camada de 20-30 cm constata-se o aumento da resistência a penetração no tratamento BBMG5 com 2,2 MPa de resistência. Já na camada de 40-50 cm verifica-se o aumento da resistência à penetração no tratamento MT, obtendo 2,4 MPa de resistência. Por fim, na camada de 50-60 cm ocorreu o aumento da resistência à penetração nos tratamentos MT, BBMG5 e BR, que obtiveram 2,1, 2,4 e 3,1 MPa, respectivamente. De acordo com Vepraskas (1994), valores de RP acima de 2,0 MPa são considerados limitantes para o crescimento do sistema radicular da maioria das plantas cultivadas.

A resistência à penetração, além da dependência de fatores intrínsecos do solo (textura, estrutura e mineralogia), é altamente dependente da umidade do solo (Silva et al., 2002). Como pode ser observado na Tabela 5, houve um aumento na umidade do solo em profundidade, porém houve aumento da resistência do mesmo à penetração em tais camadas (Figura 2), indo em contrapartida aos dados obtidos por Cunha et al. (2002), que, em condição de baixa umidade, ocorre maior resistência à deformação ou à penetração de raízes, e com o aumento do teor de água, decresce a atuação das forças de coesão entre as partículas do solo e o atrito interno, incorrendo em redução da RP.

Tabela 5. Umidade atual do solo para ensaio de resistência a penetração em Latossolo sob diferentes sistemas de uso em experimento de longa duração do brejo paraibano. Areia- PB.

Profundidade	Umidade do solo
- cm -	-- % --
<u>Área com gramíneas</u>	
0-10	14,5
10-20	15,8
20-30	20,1
30-40	26,3
40-50	25,5
50-60	23,8
<u>Área de Mata Nativa (Floresta Estacional Semidecidual (IBGE, 2012))</u>	
0-10	21,8
10-20	21,6
20-30	20,8
30-40	22,6
40-50	23,1
50-60	24,1

Fonte: Os autores.

Silva e Carvalho (2007) trabalhando com a coesão e resistência ao cisalhamento de um Latossolo Amarelo em tabuleiro costeiro obtiveram resultado semelhante, onde o aumento das proporções de argila em profundidade, aumentou a coesão entre as partículas e concomitantemente a maior resistência do solo à penetração.

O processo de compactação é um dos principais responsáveis pela degradação dos solos agrícolas, conseqüentemente, prejudica a obtenção de maiores índices de produtividade (Assis et al., 2014). Blainski et al. (2008) quantificaram a influência de diferentes sistemas de uso na curva de resistência à penetração, e tiveram como resultado que a utilização de pastagens poderia constituir uma alternativa tecnicamente viável para o restabelecimento parcial da qualidade física do solo. Segundo Lucas et al. (2012), a maioria das culturas apresentam 70% de suas raízes entre as profundidades de 20 a 40 cm. Nos dados obtidos, apenas o BBMG5 ultrapassou o limite de 2 MPa para a camada descrita, demonstrando que pode haver uma limitação a respeito de seu desenvolvimento.

4. Conclusões

Conclui-se que após catorze anos da implantação houve maior variação significativa na camada superficial entre os tratamentos para os atributos de porosidade total, microporosidade, capacidade de campo, água disponível, capacidade de aeração do solo.

O tratamento Mata nativa apresentou os maiores valores de porosidade total e microporosidade entre os tratamentos na camada de 0-10 cm, enquanto os demais não ocorreram variações.

Entre as gramíneas observou-se pequena variação nos atributos físicos, porém destacando a maior quantidade de água disponível no tratamento *Brachiaria brizantha* na camada superficial.

Referências

Albuquerque, J. A., Argenton, J., Bayer, C., Wildner, L. P., & Kuntze, M. A. G. (2005) Relação de atributos do solo com a agregação de um Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de verão para cobertura do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 29, 415-424.

Almeida, D. J., Silva, I. F., Silveira, F. P. M., Santiago, R. D., & Costa, J. R. C. (2014). Poaceae cespitosa e decumbente adubadas com NPK: Efeitos na agregação do solo. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 44(1), 50-55. <http://dx.doi.org/10.1590/S1983-40632014000100002>

Anjos, J. T., Uberti, A. A. A., Vizzotto, V. J., Leite, G. B., & Krieger, M. (1994). Propriedades físicas em solos sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 18(1), 139-145.

Assis, E. B., Nunes, M. C. M., Barelli, M. A. A., Seabra Júnior, S., & Serafim, M. E. (2014). Resistência à penetração em Argissolo Vermelho-amarelo sob pousio e diferentes culturas de cobertura. *Enciclopédia biosfera*, 10(19), 1668-1677.

Balbinot Júnior, A. A., Moraes, A., Veiga, M., Pelissari, A., & Dieckow, J. (2009). Integração lavoura-pecuária: intensificação de uso de áreas agrícolas. *Ciência Rural*, 39(6), 1925-1933. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782009005000107>

Barros, L. R., Ribon, A. A., Fernandes, K. L., Souza, J. L. O., Carreche L, V., Backes, C., Santos, A. J. M., & Alves, A. R. (2018). Integrated managements systems for the improvement of the physical quality of a Cerrado Oxisol. *Australian Journal of Crop Science*, 12(5), 711-716. <https://dx.doi.org/10.21475/ajcs.18.12.05.PNE793>

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

Blake, G. R., & Hartge, K. K. (1986). Bulk density. In Klute, A (Ed.), *Methods of soil analysis*. 1-30. Madison: Soil Science Society of America.

Blainski, E., Tormena, C. A., Fidalski, J., & Guimarães, R. M. L. (2008). Quantificação da degradação física do solo por meio da curva de resistência do solo à penetração. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32(4), 975-983. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000300007>

Braga, M. B., Marouelli, W. A., Resende, G. M., Moura, M. S. B., Costa, N. D., Calgaro, M., & Correia, J. S. (2017). Coberturas do solo e uso de manta agrotêxtil (TNT) no cultivo do meloeiro. *Horticultura Brasileira*, 35(1), 147-153.

Brito, A. S., Libardi, P. L., Mota, J. C. A., & Moraes, S. O. (2011). Estimativa da capacidade de campo pela curva de retenção e pela densidade de fluxo da água. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35(6), 1939-1948. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832011000600010>

Carmo, F. F., Figueirêdo, C. C., Ramos, M. L. G., Vivaldi, A., & Araújo, L. G. (2012). Frações granulométricas da matéria orgânica em Latossolo sob plantio direto com gramíneas. *Bioscience Journal*, 28(3), 420-431.

Cortez, J. W., Silva, R. P., Furlani, C. E. A., Arcoverde, S. N. S., & Olszewski, N. (2018). Atributos físicos do solo em sistemas de adubação e de manejo de resíduos culturais em plantio direto. *Agrarian*, 11(42), 343-351. <https://doi.org/10.30612/agrarian.v11i42.7466>

Dias-Filho, M. B. (2014). *Diagnóstico das pastagens no Brasil*. Belém: Embrapa Amazônia Oriental. Recuperado de <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/>

Hillel, D. (1998). *Environmental soil physics*. New York: Academic Press.

Klute, A. (1986). Water retention: laboratory methods. In Black, CA. (Ed.) *Methods of Soil Analysis: I. Physical and Mineralogical Methods*, 87-92. Madison: American Society of Soil Science. <https://doi.org/1002/gea.3340050110>

Kondo, M. K., Albuquerque, C. J. B., Wendling, B. Silva, P. B., & Cardoso, M. M. (2012). Efeito de coberturas vegetais sobre os atributos físicos do solo e características agronômicas do sorgo granífero. *Bioscience Journal*, 28(1), 33-40.

Lima, C. L. R., Vellar, R. M. L., Pauletto, E. A., Pinto, L. F. S., Tuchtenhagen, I. K., & Panziera, W. (2018). Mechanical parameters of a constructed soil under different machinery traffic intensities in South of Brazil. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, 13(2), e5535. <https://doi.org/10.5039/agraria.v13i2a5535>

Londe, P. R., & Bitar, N. A. B. (2011). Importância do uso de vegetação para contenção e combate à erosão em taludes do lixão desativado no município de Patos de Minas (MG). *Perquirere, Patos de Minas: UNIPAM*, 8(2), 224-249.

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.

Lucas, A. A. T., Frizzone, J. A., & Coelho Filho, M. A. (2002). Características de distribuição radicular de maracujazeiro sob fertirrigação. *Irriga*, 17(2), 245-801.

Prevedello, J., Kaiser, D. R., Reinert, D. J., Vogelmann, E. S., Fontanela, E., & Reichert, J. M. (2013). Manejo do solo e crescimento inicial de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden em Argissolo. *Ciência Florestal*, 23(1), 129-138. <https://doi.org/10.5902/198050988447>

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

Reichert, J. M., Suzuki, L. E. A. S., & Reinert, D. J. (2007). Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: Identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In Ceretta, C. A., Silva, L. S. & Reichert, J. M. (Eds.), *Tópicos em ciência do solo*, 49-134. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.

Reinert, D. J., Albuquerque, J. A., Reichert, M. J., Aita, C., & Andrada, M. M. C. (2008). Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32(5), 1805-1816. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000500002>

Resende, M., Curi, N., Rezende, S. B., & Corrêa, G. F. (2002). *Pedologia: Base para distinção de ambientes*. Lavras: Editora UFLA.

Reynolds, W. O., 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. *Soil & Tillage Research*, 150(10), 316-330. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2007.07.003>

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

Santos, G. G., Marchão, R. L., Silva, E. M., Silveira, P. M., & Becquer, T. (2011). Qualidade física do dolo sob sistemas de integração lavoura-pecuária. *Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 46(10), 1339-1348. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011001000030>

Silva, R. R., Silva, M. L. N., & Ferreira, M. M. (2005). Atributos físicos indicadores de qualidade do solo sob sistema de manejo na bacia do alto do Rio Grande – MG. *Ciência e Agrotecnologia*, 29(4), 719-730. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542005000400003>

Silva, A. J. N., & Carvalho, F. G. (2007). Coesão e resistência ao cisalhamento relacionadas a atributos físicos e químicos de um Latossolo Amarelo de tabuleiro costeiro. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31(5), 835-862. doi.org/10.1590/S0100-06832007000500003

Silva, C. A. T., Cezar, T. C. M., & Nóbrega, L. H. P. (2012). Porosidade de Latossolos e práticas de manejo agrícola para a conservação do solo: Revisão. *Revista Varia Scientia Agraria*, 2(2), 153-164.

Silva, É. A., Benevenuto, P. A. N., & Melo, L. B. B. (2017). Qualidade física de um Latossolo estimada por estudos de curvas de retenção de água, indicadores de fácil determinação e “índice S”. *Tecnologia & Ciência Agropecuária*, 11(4), 49-54.

Silva, P. L. F., Oliveira, F. P., Borba, J. O. M., Tavares, D. D., Amaral, A. J., & Martins, A. F. (2018). Solos arenosos para Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta em Arez, Rio Grande do Norte. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, 13(5), 581-589. <https://doi.org/10.18378/rvads.v13i5.6246>

Silva, V. R., Reinert, D. J., & Reichert, J. M. (2002). Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico arênico e de um Latossolo Vermelho distrófico típico. II – Grau de saturação em água. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 26(1), 9-15. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832002000100002>

Stefanoski, D. C., Santos, G. G., Marchão, R. L., Petter, F. A., & Pacheco, L. P. (2013). Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 17(12), 1301-1309. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013001200008>

Stolf, R. (1991). Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação de dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 15(2), 229-235.

Stolf, R., Fernandes, J., & Urlani Neto, V. L. (1983). *Recomendação para o uso do penetrômetro de impacto - modelo IAA/Planalsucar - Stolf*. São Paulo: MIC/IAA.

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. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2007000800013>

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

Vepraskas, M. J. (1994). Plant response mechanisms to soil compaction. In Wilkinson, R. (Ed.), *Plant Environment Interactions*, 263-287. New York: M. Dekker.

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

José Otávio de Moraes Borba – 25%

Flávio Pereira de Oliveira – 25%

Pedro Luan Ferreira da Silva – 15%

Adriana Ferreira Martins – 15%

Danillo Dutra Tavares – 10%

Milton César Costa Campos – 10%