

Atributos físicos como indicadores de qualidade do solo sob diferentes condições de uso e profundidade no Semiárido Brasileiro

Taíza Nogueira Barros¹, José Ângelo Sebastião Araújo dos Anjos¹, Eduardo Soares de Souza² e Erison Martins Amaral²

¹Universidade Federal da Bahia. Programa de Pós-Graduação em Geologia. Rua Barão de Jeremoabo, S/Nº. Ondina. Salvador-BA, Brasil (CEP 66075-110). E-mail: taizanogueira@hotmail.com.

²Universidade Federal Rural de Pernambuco. *Campus* Serra Talhada. Avenida Gregório Ferraz Nogueira, S/Nº. Serra Talhada-PE, Brasil (CEP 56909-535).

Resumo. O estudo dos solos no nordeste brasileiro tem assumido indiscutível importância principalmente em função da vegetação da Caatinga se encontrar em acentuado processo de degradação, ocasionado, principalmente, pelo desmatamento desenfreado e o uso inadequado dos recursos naturais, implicando diretamente na qualidade do solo. Portanto, objetivou-se com o presente estudo analisar comparativamente, por meio da estatística descritiva e do intervalo de confiança, os atributos físicos do solo como indicadores de qualidade, sob diferentes condições de uso (Caatinga, Sistema Agroflorestal e Pastagem) e profundidades, visando a avaliar a sustentabilidade do solo de três áreas no Semiárido Brasileiro. O experimento foi conduzido em solo de textura franco arenosa a franco argilo arenosa, classificado como Neossolo Litólico. Foram coletadas amostras deformadas e indeformadas nas áreas de Caatinga, Sistema Agroflorestal e Pastagem, nas profundidades de 0-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm, com três repetições, para avaliar os seguintes atributos físicos: densidade do solo, densidade da partícula, porosidade do solo, umidade do solo e textura do solo, enquanto a resistência mecânica do solo à penetração foi realizada diretamente nas áreas de pesquisa. Para avaliar a qualidade física do solo foram utilizados dois indicadores, com suas respectivas faixas ótimas ou limite crítico: a densidade do solo (D_s) e a resistência do solo à penetração (RP). Os resultados foram submetidos ao Excel para obtenção da estatística descritiva e ao RStudio para uma análise *Bootstrap*. Em seguida, foi aplicado o teste t para identificar os intervalos de confiança e geração dos gráficos. A Caatinga apresentou o funcionamento dos atributos físicos estudados como referência natural de conservação, o Sistema Agroflorestal demonstrou constituir uma estratégia promissora para a melhoria e a manutenção da qualidade física do solo no semiárido, enquanto a Pastagem apresentou condições de compactação do solo, havendo a

Recebido
06/07/2025

Aceito
19/08/2025

Publicado
31/08/2025



Acesso aberto



ORCID

- 0000-0002-6773-5816
Taíza Nogueira Barros
- 0000-0002-9343-1605
José Ângelo Sebastião
Araújo dos Anjos
- 0000-0002-5488-5284
Eduardo Soares Souza
- 0000-0002-5627-695X
Erison Martins Amaral

necessidade de práticas de manejo conservacionistas para mitigar os processos de degradação e promover a sustentabilidade do solo.

Palavras-chave: Qualidade do solo; Atributos físicos do solo; Intervalo de confiança; Caatinga; Sistema Agroflorestal; Pastagem.

Abstract. *Physical attributes as indicators of soil quality under different conditions of use and depth in the Brazilian Semi-arid.* The study of soils in Northeast Brazil has taken on undeniable importance, mainly because the vegetation of the Caatinga is undergoing a pronounced degradation process, primarily caused by rampant deforestation and the improper use of natural resources, directly impacting soil quality. Therefore, the objective of this work was to comparatively analyze, through descriptive statistics and confidence intervals, the physical attributes of the soil as indicators of quality under different usage conditions (Caatinga, Agroforestry System, and Pasture) and depths, aiming to assess the sustainability of the soil in three areas of the Brazilian Semi-Arid Region. The experiment was conducted in soil with a sandy loam to clayey sandy texture classified as Litholic Neosol. Deformed and undisturbed samples were collected in areas of Caatinga, Agroforestry System, and Pasture at depths of 0-10 cm, 10-20 cm, and 20-30 cm with three repetitions to evaluate the following physical attributes: soil density, particle density, soil porosity, soil moisture, and soil texture, while the mechanical resistance of the soil to penetration was assessed directly in the research areas. To evaluate the physical quality of the soil, 2 indicators with their respective optimal ranges or critical limits were used: soil density (D_s), and soil penetration resistance (PR). The results were submitted to Excel for obtaining descriptive statistics and to RStudio for a Bootstrap analysis. Then, a t-test was applied to identify the confidence intervals and generate the graphs. The Caatinga presented the functioning of the physical attributes studied as a natural reference for conservation, the Agroforestry System proved to be a promising strategy for improving and maintaining the physical quality of the soil in the Semi-arid Region, while the Pasture presented conditions of soil compaction, requiring conservationist management practices to mitigate degradation processes and promote soil sustainability.

Keywords: Soil quality; Soil physical attributes; Confidence interval; Caatinga; Agroforestry System; Pasture.

Introdução

A Região Semiárida do Brasil compreende uma área de 969.589 km², representando 11,8% do território brasileiro, e 62% da Região Nordeste (Couqueiro, 2012), e os principais fatores climáticos, pedológicos e hidrológicos são a intensa radiação

solar, temperaturas altas, distribuição irregular da precipitação no tempo, altas taxas de evaporação, solos rasos e recursos hídricos escassos, que restringem o desenvolvimento da agricultura na região, além de apresentarem grande diversidade de ambientes e, conseqüentemente, de solos (Santos et al., 2012; Marques et al., 2014; Santos et al., 2019).

O bioma Caatinga, característico do Semiárido Brasileiro (Costa et al., 2010), possui maior abrangência na Região Nordeste e uma pequena parte da Região Sudeste (Guerra et al., 2014). Sua vegetação caracteriza-se por ser uma floresta seca e decídua, composta por grande quantidade de espécies que apresentam espinhos e folhas pequenas como forma de adaptação aos longos períodos de seca comuns na região (Medeiros et al., 2009). Apesar de sua importância, a Caatinga ainda é o bioma menos favorecido de proteção no Brasil (Paz et al., 2020) e vem sendo fortemente impactado por interferências antrópicas, principalmente pela remoção indiscriminada da vegetação, que ocasiona a redução do estoque de biomassa vegetal e, conseqüentemente, da cobertura dos solos (Virgens et al., 2017).

Segundo Ribeiro et al. (2009), algumas classes de solo tem maior ou menor susceptibilidade ao processo de erosão, resultando muitas vezes em perda do solo, que por sua vez, contribui favorecendo os processos de desertificação. De acordo com o Sistema de Classificação de Solos do Brasil, das 13 classes de solos que ocorrem no Território Nacional (Santos et al., 2025), 10 classes são encontradas na Região Semiárida. Com exceção, portanto, das classes Espodossolos, Organossolos e Nitossolos.

Algumas classes estão distribuídas mais concentradas que outras em determinados locais, sendo os Vertissolos localizados mais ao norte e ao sul e sudeste da região e os Planossolos mais ao centro-leste, diferentemente das classes de Latossolos, Neossolos e Argissolos com distribuição mais homogênea (Gama e Jesus, 2020). Estudos realizados por Vieira et al. (2015) indicaram que 94% do território do Nordeste brasileiro está sob moderada ou alta suscetibilidade à desertificação, com um aumento de 83,4 km² entre os anos de 2000 e 2010.

A remoção da Caatinga aliada a longos períodos de estiagem resultam uma acentuada degradação física, química e biológica, deixando o solo sem cobertura vegetal, ficando assim exposto por mais tempo às ações da temperatura e dos ventos, diminuindo, conseqüentemente, seu potencial produtivo, causando danos muitas vezes irreversíveis (Parente e Parente, 2010). Segundo Correia (2010), atualmente, a vegetação da Caatinga encontra-se em acentuado processo de degradação, ocasionado, principalmente, pelo desmatamento desenfreado e o uso inadequado dos recursos naturais.

De acordo com Pereira et al. (2022), a degradação do solo em ambiente semiárido tende a modificar a comunidade microbiana reduzindo as funções relacionadas a dinâmica de carbono no solo, acentua a perda de solo por ocasião da sazonalidade climática (Silva et al., 2021) e conversão da Caatinga em pastagens e campos agrícolas (Santos et al., 2021).

Os sistemas agroflorestais é uma alternativa de produção agropecuária que diminui o efeito da intervenção humana. Possibilita imitar o ambiente natural através da consorciação de várias espécies dentro da mesma área, aumentando a diversidade do ecossistema e são aproveitadas as interações benéficas entre as plantas de diferentes ciclos, portes e funções (Sanchez, 1995). A utilização de práticas não sustentáveis resultantes da instalação de sistemas agrícolas, tem acarretado alterações nos atributos de qualidade do solo e, conseqüentemente, redução na capacidade dinâmica e vital deste recurso, diminuindo a sua qualidade e, na maioria das vezes, dificultando a sua recuperação (Souza et al., 2006).

Estudos realizados por Gama e Jesus (2020), em relação à granulometria dos solos na região de clima semiárido do Brasil, principalmente no Nordeste, prevalecem as classes com textura arenosa a franco-arenosa e, na maior parte das classes, são de pouco profundas a profundas e com relativa capacidade de armazenamento de água. Todavia, em

extensão, predominam maiores áreas com solos profundos a muito profundos, a exemplo dos Latossolos e alguns Neossolos.

Segundo Oliveira et al. (2013), à medida em que o solo sofre intervenções no uso, as mudanças ocorrem em seus atributos físicos, como aumento da densidade aparente, diminuição da porosidade total, distribuição de diâmetro, alteração na agregação e teor de matéria orgânica. Portanto, o manejo inadequado leva a alterações nas propriedades do solo, que, se mantidas, leva à degradação irreversível do solo, tornando inutilizadas as práticas agrícolas (Gomes et al., 2019).

Segundo Paula et al. (2015), a qualidade do solo não pode ser medida diretamente, portanto, ela é compreendida através de uma avaliação integrada de indicadores físicos, químicos e biológicos que atuam nas alterações do solo. Nesse sentido, a qualidade física implica diretamente na qualidade do solo e de acordo com Pereira et al. (2011), pode ser avaliada através de atributos que descrevam o seu comportamento. Dentre os indicadores físicos recomendados estão densidade do solo, porosidade, resistência à penetração, teor de matéria orgânica (Carvalho et al., 2004).

Sendo assim, os estudos dos atributos físicos do solo têm sido utilizados para indicar restrições ao desenvolvimento da planta (Spera et al., 2004), qualidade do solo (Secco, 2005) e estudo de compactação do solo (Flores et al., 2007). A maioria dessas pesquisas avaliaram essas alterações nas primeiras camadas do solo (Mora e Lázaro, 2014; Althoff et al., 2018) e, em menor proporção, em profundidades superiores a 40 cm (Menezes et al., 2021; Neves et al., 2021).

Considerando os aspectos apresentados, objetivou-se com o presente artigo analisar comparativamente por meio da estatística descritiva e do intervalo de confiança os atributos físicos do solo como indicadores de qualidade do solo sob diferentes condições de uso (Caatinga, Sistema Agroflorestal/SAF e Pastagem) e profundidades (0-10, 10-20 e 20-30 cm), visando a avaliar a sustentabilidade do solo das três áreas no Semiárido brasileiro.

Material e método

Local do experimento

A pesquisa foi conduzida em três áreas localizadas no Sítio Souto, Município de Triunfo-PE, que tem uma área territorial equivalente a 191,516 km² e o seu ponto mais alto tem altitude de 1.010 m, porém o local de estudo, está localizado na parte considerada mais baixa do território. De acordo com Jacomine et al. (1973), a classificação do solo das três áreas é Neossolo Litólico.

O ensaio de granulometria do solo foi obtido seguindo o manual da EMPRAPA (Teixeira et al., 2017), no qual os dados e a classificação textural encontram-se na Tabela 1. Os solos das áreas de Caatinga e Pastagem na profundidade 0-10 cm pertencem à classe textural franco arenosa e nas profundidades de 10-20 cm e 20-30 cm na classe franco argilo arenosa, na área de Sistema Agroflorestal (SAF), nas profundidades 0-10 cm e 10-20 cm, a classificação textural pertence a classe franco arenosa, e na profundidade 20-30 cm a classe franco argilo arenoso. De modo geral os solos de textura franca, conhecidos também como solos de textura média, são solos com proporções semelhantes de partículas de areia, silte e argila, que torna-os com boa drenagem e capacidade de retenção de água e índice médio de erodibilidade (Centeno et al., 2017).

Tabela 1. Composição granulométrica do solo das áreas de Caatinga, SAF e Pastagem.

Área	Camadas (cm)	Granulometria (%)			Classe textural
		Areia	Siltre	Argila	
Caatinga	0-10	57	26	17	Franco arenosa
	10-20	55	24	21	Franco argilo arenosa
	20-20	56	23	21	Franco argilo arenosa
SAF	0-10	64	24	12	Franco arenosa
	10-20	56	25	19	Franco arenosa
	20-20	55	24	21	Franco argilo arenosa
Pastagem	0-10	64	21	15	Franco arenosa
	10-20	57	20	23	Franco argilo arenosa
	20-20	56	23	21	Franco argilo arenosa

Segundo a classificação de Köppen (Alvares et al., 2013), a região possui clima do tipo BSw'h', caracterizado como tropical seco, com a evaporação excedendo a precipitação, sendo assim um clima quente e seco, com duas estações definidas: seca e chuvosa (Souza et al., 2014). A precipitação anual média varia entre 300 mm.ano⁻¹ e 800 mm.ano⁻¹. As temperaturas são relativamente elevadas, com média anual em torno de 28 °C, apresentando máxima de até 40 °C ano⁻¹ (Ramalho, 2013).

Caracterização das três áreas de estudos

A área de Caatinga preservada possui 5 ha e 100 anos de cultivo, sem apresentar nenhum histórico de desmatamento ou queimada nesse período.

A área de SAF apresenta 0,1 ha, com 11 anos de uso, sendo realizado na última década o cultivo agrícola. Entre 2000 e 2010, a área era vegetação de Caatinga em recuperação, sendo removida gradativamente e substituída pelo sistema agroflorestal.

A área de Pastagem possui aproximadamente 1 ha e 20 anos de cultivo,. O pastejo é sempre realizado no final do período chuvoso e no início do período de seca, ou seja, o pastejo é da matéria seca, não havendo pastejo no período de chuvas. Normalmente, a pressão de pastejo é baixa, menos de 10 cabeças de bovinos (raça mestiça).

Amostragem e análises do solo

Foram coletadas amostras deformadas em sacolas plásticas e três amostras indeformadas com trado Uhland em anéis volumétricos nas três áreas de estudo, nas profundidades 0-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm, com três repetições, para avaliar os seguintes atributos físicos: densidade do solo, densidade da partícula, umidade e porosidade do solo. O teste da resistência mecânica do solo à penetração foi realizado diretamente nas áreas de pesquisa.

A densidade do solo, a densidade das partículas e a umidade do solo foram determinadas conforme metodologias descritas no manual da EMPRAPA (Teixeira et al., 2017). A avaliação da resistência mecânica à penetração do solo foi realizada com a utilização do penetrômetro de impacto (PI), que tem como princípio a penetração de uma haste ao longo do perfil do solo, com aplicação de uma força que provém do impacto de um êmbolo que compõem o equipamento, que é lançado de uma altura constante. Os valores da resistência em razão da penetração por impacto foram calculados segundo Stolf (1991) e reapresentada em Stolf et al. (1998, 2005):

Unidade prática: Impactos/(1 dm = 10 cm)

$N \text{ (impactos/dm)} = 10 \times n^{\circ} \text{ de impactos/penetração(cm)}$

Unidade técnica: converter impactos/dm para resistência kgf/cm^2

$$R (\text{kgf/cm}^2) = 5,6 + 6,89 \times N (\text{impactos/dm})$$

Unidade técnica: converter resistência kgf/cm^2 em MPa ($\text{kgf/cm}^2 = 0,1\text{MPa}$).

$$R (\text{MPa}) = 0,1 R (\text{kgf/cm}^2).$$

A porosidade total (PT) foi estimada pela Equação:

$$Pt = 1 - \left(\frac{D_s}{D_p} \right)$$

Onde:

PT = Porosidade total do solo [cm^3/cm^3 ou %],

D_s = Densidade do solo [g/cm^3], e

D_p = Densidade da partícula [g/cm^3].

Para avaliar a qualidade física do solo foram utilizados dois indicadores escolhidos na literatura, com suas respectivas faixas ótimas ou limite crítico: a densidade do solo (D_s) e a resistência do solo à penetração (RP). As faixas com valores de referência dos indicadores de qualidade física do solo são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Indicadores de qualidade física do solo e suas respectivas faixas ótimas ou limites críticos.

Indicador da qualidade física do solo	Valores de referência
Densidade do solo, D_s (Mg m^{-3})*	Ideal: $0,9 \leq D_s \leq 1,2$ Intermediária: $0,85 \leq D_s < 0,9$ e $1,2 < D_s \leq 1,25$ Limite crítico superior: $D_s > 1,25$ Limite crítico inferior: $0,85 < D_s$
Resistência à Penetração do Solo, RP (MPa)**	Muito baixa: $\leq 1,0$ Baixa: $1,0 < RP \leq 2,5$ Moderada: $2,6 \leq RP \leq 5,0$ Alta: $5,1 \leq RP \leq 10,0$ Muito alta: $10,1 \leq RP \leq 15$ Extremamente alta: > 15

*Segundo Reynolds et al. (2007, 2009); **Segundo Canarache (1990).

Análise estatística

Os resultados dos atributos físicos avaliados foram submetidos ao Excel para obtenção da estatística descritiva e ao Rstudio, utilizando os pacotes: *rstudioapi*, *easynova*, *data.table*, *dplyr*, *boot*, *car*, *devtools*, *ggpubr*, *tidyverse*, *rstatix*, *multcomp*, *grid*, *gridExtra*, *cowplot*, *psych*, *ggplot2*, *stats*, *agricolae*, *ExpDes.pt*, *forecast* e *purrr*, para uma análise *Bootstrap*, que é uma técnica estatística não paramétrica computacionalmente intensiva de reamostragem, introduzida por Efron (1979, 1992), em seguida foi aplicado o teste t (5% de probabilidade) para identificar os intervalos de confiança e para gerar os gráficos. O intervalo de confiança estabelece os valores nos quais a média dos valores do conjunto de dados está localizada, sendo um método eficiente e seguro na interpretação de diferenças significativas (Payton et al., 2000), levando em consideração que, havendo sobreposição dos intervalos de confiança, indica ausência de diferenças significativas.

Resultados e discussão

Densidade do solo

Segundo Han et al. (2016), a Densidade do Solo é um indicador da compactação do solo expressa como a razão entre a massa de sólidos secos e o volume do solo. Ela afeta a infiltração, a profundidade de enraizamento, a capacidade de água disponível, a porosidade, a aeração do solo e a atividade de microrganismos do solo. Na Tabela 3 são apresentados os resultados da análise descritiva para a densidade do solo (g.cm^{-3}) nos diferentes usos (Caatinga, Pastagem e SAF) e profundidades do solo (0-10, 10-20 e 20-30 cm).

Observa-se que os valores médios da densidade do solo nas três áreas e nas três profundidades foram superiores $1,40 \text{ g.cm}^{-3}$ e, segundo Arshad et al. (1996), Densidade do Solo acima desse valor restringe o crescimento radicular em solo de textura média a argilosa.

Os valores de mínimos e máximos de Densidade do Solo não se enquadram nas faixas de limites críticos estabelecidos na literatura segundo Reynolds et al. (2007, 2009), apresentando valores superiores ao limite crítico estabelecido ($1,25 \text{ g.cm}^{-3}$), mas para Reichert et al. (2003) consideram como Densidade do Solo crítica para o bom crescimento do sistema radicular em solos de textura média o valor de $1,55 \text{ g.cm}^{-3}$.

Tabela 3. Momentos estatísticos da Densidade do Solo para diferentes áreas e profundidades.

	Caatinga	Pastagem	SAF
Profundidade	00-10 cm		
Mínimo (g.cm^{-3})	1,38	1,54	1,43
Média (g.cm^{-3})	1,42	1,57	1,48
Máximo (g.cm^{-3})	1,47	1,61	1,54
DP	0,04	0,03	0,05
CV (%)	3,23	2,23	3,71
Profundidade	10-20 cm		
Mínimo (g.cm^{-3})	1,52	1,57	1,51
Média (g.cm^{-3})	1,55	1,58	1,59
Máximo (g.cm^{-3})	1,60	1,59	1,64
DP	0,05	0,01	0,07
CV (%)	2,99	0,63	4,3
Profundidade	20-30 cm		
Mínimo (g.cm^{-3})	1,46	1,50	1,43
Média (g.cm^{-3})	1,47	1,53	1,52
Máximo (g.cm^{-3})	1,49	1,56	1,56
DP	0,01	0,03	0,07
CV (%)	1,04	2,00	4,95

DP = Desvio Padrão; CV = Coeficiente de Variação.

Em termos absolutos, pode-se verificar, na Tabela 3, que o valor médio na área da Caatinga, na camada 0-10 cm, foi $1,42 \text{ g.cm}^{-3}$, com valor mínimo de $1,38 \text{ g.cm}^{-3}$ e máximo de $1,47 \text{ g.cm}^{-3}$, observando-se ainda que, na camada 10-20 cm, houve aumento na média, no mínimo e no máximo da Densidade do Solo, nos valores de $1,55 \text{ g.cm}^{-3}$, $1,52 \text{ g.cm}^{-3}$ e $1,60 \text{ g.cm}^{-3}$, respectivamente. Segundo Bicalho (2011), a Densidade do Solo tende a aumentar com a profundidade, podendo variar em função de vários fatores, como teor

reduzido de matéria orgânica, menor agregação, maior compactação, diminuição da porosidade do solo, dentre outros. Na camada 20-30 cm, ocorreu uma pequena redução na média, no mínimo e no máximo da Densidade do Solo, em relação à camada anterior, com valores de 1,47 g.cm⁻³, 1,46 g.cm⁻³ e 1,49 g.cm⁻³, respectivamente. Melo et al. (2008), estudando a susceptibilidade à compactação e a correlação entre as propriedades físicas de um Neossolo, sob vegetação de Caatinga, também observaram um aumento nas primeiras camadas na densidade do solo.

Na área da Pastagem, na camada 0-10 cm, o valor médio da Densidade do Solo foi de 1,57 g.cm⁻³, com valor mínimo de 1,54 g.cm⁻³ e máximo de 1,61 g.cm⁻³. Souza et al. (2005) encontraram valor da Densidade do Solo na Pastagem em Neossolos de 1,60 g.cm⁻³. Verifica-se ainda que, na camada 10-20 cm, houve aumento na média e no valor mínimo, com valores de 1,58 g.cm⁻³ e 1,57 g.cm⁻³, respectivamente, e uma diminuição no valor máximo de 1,59 g.cm⁻³. Na camada 20-30 cm ocorreu uma redução na média, no mínimo e no máximo da Densidade do Solo, com valores de 1,53 g.cm⁻³, 1,50 g.cm⁻³ e 1,56 g.cm⁻³, respectivamente. Resultados de densidade do solo mais elevados em áreas de Pastagem foram obtidos por Freitas et al. (2012), quando avaliaram a resistência à penetração em Neossolo Quartzarênico submetido a diferentes formas de manejo. Os valores de mínimos e máximos de Densidade do Solo não se enquadram nas faixas de limites críticos estabelecidos na literatura, segundo Reynolds et al. (2007, 2009), apresentando valores superiores ao limite crítico estabelecido (1,25 g.cm⁻³). O solo sob Pastagem apresentou as maiores Densidades do Solo devido ao efeito do pisoteio dos animais.

Na área de SAF (Sistema Agroflorestal), na camada 0-10 cm, o valor médio da Densidade do Solo foi de 1,48 g.cm⁻³, com valor mínimo de 1,43 g.cm⁻³ e máximo de 1,54 g.cm⁻³, segundo Carvalho et al. (2015), estudando os atributos físicos e químicos de um Neossolo Quartzarênico sob diferentes sistemas de uso e manejo, nessa mesma profundidade encontraram valor da Densidade do Solo superior na integração lavoura pecuária floresta de 1,65 g.cm⁻³. Na camada 10-20 cm observa-se que houve um aumento na média, mínimo e máximo, em relação à camada anterior, com valores de 1,59 g.cm⁻³, 1,51 g.cm⁻³ e 1,64 g.cm⁻³, respectivamente. Segundo Carvalho et al. (2004), quando avaliaram os atributos físicos da qualidade de um solo sob sistema agroflorestal, encontraram valores de Densidade do Solo aumentando na profundidade do solo, corroborando com essa pesquisa, porém os valores médios foram inferiores. Na camada 20-30 cm ocorreu redução nos valores da média, mínimo e máximo da Densidade do Solo em relação à camada 10-20 cm, com valores de 1,52 g.cm⁻³, 1,43 g.cm⁻³ e 1,56 g.cm⁻³. Os valores de mínimos e máximos de Densidade do Solo na área de SAF não se enquadram nas faixas de limites críticos estabelecidos na literatura, segundo Reynolds et al. (2007, 2009), apresentando valores superiores ao limite crítico estabelecido (1,25 g.cm⁻³).

Jakelaitis et al. (2008), verificam uma tendência da Densidade do Solo aumentar quando a vegetação natural é substituída por Pastagens e culturas, e Barreto et al. (2006), avaliando as características química e físicas de um solo sob floresta, sistema agroflorestal e pastagem no sul da Bahia, verificaram que não teve diferença na densidade do solo entre os sistemas estudados, este resultado provavelmente pode ser explicado devido ao curto tempo de estabelecimento da cultura para ocasionar mudanças nas características físicas do solo.

De acordo com Warrick (1998), a Densidade do Solo é um atributo homogêneo que apresenta baixa variabilidade e coeficiente de variação (CV) inferior a 15%, que corrobora com os resultados obtidos nesta pesquisa nas três áreas e nas três profundidades estudadas (Tabela 3) e por Melo et al. (2008) e Bicalho (2011), com CV de 7,26%.

Na Figura 1 são apresentados pelo Intervalo de Confiança da Média (IC), os valores médios da Densidade do Solo para cada área (Caatinga, Pastagem e SAF), nas três profundidades amostradas (0-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm).

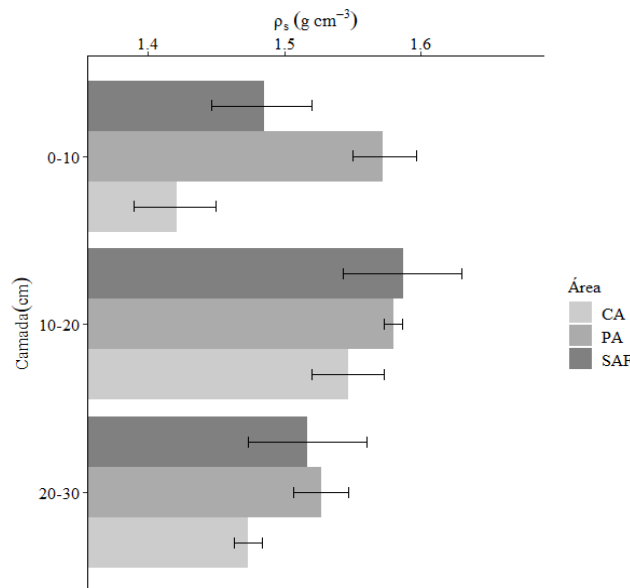


Figura 1. Valores médios de Densidade do Solo (ρ_s) nas profundidades (a) 0-10 cm, (b) 10-20 cm e (c) 20-30 cm, para as áreas consideradas (CA = Caatinga, SAF = sistema agroflorestal e PA = pastagem). As barras referem-se ao intervalo de confiança da média, e a sobreposição dos intervalos de confiança indica ausência de diferenças estatísticas entre as médias das áreas, na mesma profundidade.

Para a profundidade 0-10 cm, nota-se que houve diferença estatística significativa entre as áreas Pastagem e Caatinga e Pastagem e SAF, porém não houve diferença estatística significativa entre as áreas Caatinga e SAF, podendo estar relacionado ao tempo de transição da caatinga para o sistema agroflorestal (11 anos). A maior Densidade do Solo foi verificada na área de Pastagem e pode ser devido o processo de pisoteio animal o qual induz esse aumento na densidade do solo além de promover diminuição na macroporosidade.

Guimarães et al. (2013), avaliando intervalo de confiança da Densidade do Solo em áreas preservada e pastagem, na profundidade 0-10 cm, também comprovaram diferença estatística significativa entre as duas áreas, não havendo a sobreposição das barras, indicando que as médias da Densidade do Solo são diferentes.

Na profundidade 10-20 cm, não havendo diferença estatística significativa entre as áreas, havendo a sobreposição das barras, indicando que as médias da Densidade do Solo são iguais.

Na profundidade 20-30 cm, apenas as áreas Caatinga e Pastagem obtiveram médias estatisticamente diferentes, ou seja, havendo diferença significativa com valores da Densidade do Solo maiores na área de Pastagem podendo ser este comportamento explicado devido o processo de pisoteio dos animais em comparação a área de caatinga preservada.

Densidade da partícula

Na Tabela 4 são apresentados os resultados da análise descritiva para a Densidade de Partícula (g.cm^{-3}) nos diferentes usos (Caatinga, pastagem e SAF) e profundidades do solo (0-10, 10-20 e 20-30 cm).

Tabela 4. Momentos estatísticos da Densidade de Partícula para as diferentes áreas e profundidades do solo.

	Caatinga	Pastagem	SAF
Profundidade	0,0-10 cm		
Mínimo (g.cm ⁻³)	2,40	2,43	2,32
Média (g.cm ⁻³)	2,49	2,52	2,46
Máximo (g.cm ⁻³)	2,56	2,67	2,64
DP	0,08	0,13	0,17
CV (%)	3,34	5,29	6,72
Profundidade	10-20 cm		
Mínimo (g.cm ⁻³)	2,34	2,51	2,48
Média (g.cm ⁻³)	2,59	2,67	2,61
Máximo (g.cm ⁻³)	2,72	2,78	2,72
DP	0,22	0,14	0,12
CV (%)	8,36	5,37	4,64
Profundidade	20-30 cm		
Mínimo (g.cm ⁻³)	2,59	2,52	2,51
Média (g.cm ⁻³)	2,65	2,65	2,59
Máximo (g.cm ⁻³)	2,69	2,84	2,66
DP	0,05	0,17	0,08
CV (%)	1,99	6,28	2,94

DP = Desvio padrão; CV = Coeficiente de variação.

Observa-se que os valores médios da densidade de partícula na área da Caatinga teve um aumento nas profundidades estudadas, 2,49 g.cm⁻³ na camada 0-10 cm, 2,59 g.cm⁻³ na camada 10-20 cm e 2,65 g.cm⁻³ na camada 20-30 cm. Melo et al. (2008), avaliando a densidade de partícula em três profundidades de um Neossolo sob Caatinga, também verificou esse aumento da densidade nas profundidades.

A densidade de partículas é um atributo estático, levando em consideração que mudanças só seriam perceptíveis em um período de tempo muito considerável, diferente da Densidade do Solo que é um atributo que varia com o tempo, principalmente por processos naturais de adensamento e/ou com práticas de manejo (Bicalho, 2011).

Na área de pastagem a densidade de partícula na profundidade 0-10 cm foi de 2,52 g.cm⁻³, na camada 10-20 cm teve um aumento de 2,67 g.cm⁻³. Barreto et al. (2006), também estudando a densidade de partícula em pastagem, observou esse aumento nas mesmas camadas (0-10 e 10-20 cm) e na última camada 20-30 cm ocorreu uma pequena redução de 2,65 g.cm⁻³.

Segundo Brady e Weil (2007), geralmente valores de Densidade de Partícula não se diferem por possuírem grande estabilidade. Os valores de Densidade de Partícula encontrados no presente trabalho encontram-se dentro da faixa em que se enquadra a maior parte dos solos minerais, de 2,6 a 2,75 g.cm⁻³.

Na área de SAF a Densidade de Partícula na profundidade 0-10 cm foi de 2,46 g.cm⁻³, na camada 10-20 cm teve um aumento de 2,61 g.cm⁻³ e uma leve redução na camada 20-30 cm de 2,59 g.cm⁻³.

De acordo com a classificação do coeficiente de variação, segundo Warrick e Nielsen (1980), a variabilidade da Densidade de Partícula foi classificada como baixa (CV < 12%), demonstrando menor heterogeneidade desse atributo para as áreas de estudo e profundidades. De maneira geral, as variáveis Densidade do Solo, Densidade de Partícula e Porosidade Total apresentam coeficiente de variação relativamente baixo, segundo o

critério de classificação para o coeficiente de variação proposto, por Warrick e Nielsen (1980).

Na Figura 2 são apresentados pelo Intervalo de Confiança da Média (IC) os valores médios da Densidade de Partícula, para cada área (Caatinga, pastagem e SAF), nas três profundidades amostradas (0-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm).

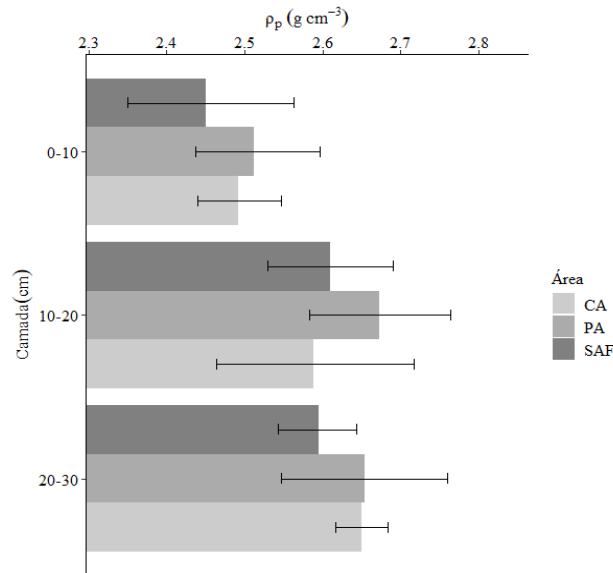


Figura 2. Valores médios da Densidade da Partícula (ρ_p), nas profundidades (a) 0-10 cm, (b) 10-20 cm e (c) 20-30 cm, para as áreas consideradas (CA = Caatinga, SAF = Sistema Agroflorestral e PA = Pastagem). As barras referem-se ao intervalo de confiança da média, e a sobreposição dos intervalos de confiança indica ausência de diferenças estatísticas entre as médias das áreas, na mesma profundidade.

Os dados mostraram que os valores da Densidade da Partícula não tiveram diferença significativa em nenhuma profundidade, nas áreas avaliadas. Podendo estar relacionada com natureza do mineral predominante nas áreas, pois a densidade da partícula é estática e alterações nesse atributo físico só seriam perceptíveis em um tempo muito considerável (Mota et al., 2008).

Observou-se que nas três profundidades de amostragem, 0-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm, os valores da Densidade da Partícula nas áreas de SAF e Caatinga foram menores possivelmente pode estar relacionado ao teor de matéria orgânica.

A densidade de partículas tem relevância mais importância para algumas determinações como a Porosidade Total do Solo, Velocidade de Sedimentação de Partículas em Água e dentre outros.

Umidade do solo

Na Tabela 5 são apresentados os resultados da análise descritiva para a Umidade Volumétrica do Solo ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$) nos diferentes usos (Caatinga, pastagem e SAF) e profundidades do solo (0-10, 10-20 e 20-30 cm).

Tabela 5. Momentos estatísticos da Umidade Volumétrica do Solo ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$) para as diferentes áreas e profundidades do solo.

	Caatinga	Pastagem	SAF
Profundidade	0,0-10 cm		
Mínimo ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)	0,13	0,18	0,08
Média ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)	0,13	0,18	0,09
Máximo ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)	0,13	0,18	0,10
DP	0,00	0,00	0,01
CV (%)	0,00	0,00	13,32
Profundidade	10-20 cm		
Mínimo ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)	0,12	0,17	0,11
Média ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)	0,12	0,17	0,12
Máximo ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)	0,13	0,18	0,14
DP	0,01	0,01	0,02
CV (%)	4,68	3,33	12,38
Profundidade	20-30 cm		
Mínimo ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)	0,10	0,15	0,10
Média ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)	0,10	0,16	0,11
Máximo ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)	0,11	0,17	0,12
DP	0,01	0,01	0,01
CV (%)	5,59	7,07	10,19

DP = Desvio padrão; CV = Coeficiente de variação.

A quantidade de água existente no solo está intimamente ligada aos valores de resistência do solo à penetração, e qualquer alteração neste último fator pode modificar os valores da umidade (Bottega et al., 2011).

Observa-se na Tabela 5 que, na área da Caatinga, os valores médios da Umidade Volumétrica do Solo diminuíram com a profundidade, na camada 0-10 cm, com o valor de $0,13 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$, na camada 10-20 cm, com o valor de $0,12 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$, e na camada 20-30 cm, com o valor de $0,10 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$, podendo estar relacionado a alguns fatores como a infiltração restrita das chuvas concentradas, absorção intensa das raízes superficiais da maioria das espécies predominante na Caatinga e baixo teor de matéria orgânica em profundidade.

Na área sob Pastagem, os valores médios da Umidade Volumétrica do Solo também diminuíram com a profundidade, na camada 0-10 cm, média foi $0,18 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$, na camada 10-20 cm, $0,17 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$, e na camada 20-30 cm, $0,16 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$, possivelmente devido ao sistema radicular superficial das gramíneas e a compactação superficial pelo pisoteio dos animais.

Na área de SAF, os valores mais baixos das médias da Umidade Volumétrica do Solo, na superfície, na camada 0-10 cm, com $0,09 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$, e aumentando levemente na camada 10-20 cm, com $0,12 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$, podendo estar mais associado ao sombreamento e ao acúmulo de matéria orgânica do que a retenção hídrica, e na camada 20-30 cm houve uma leve diminuição no valor, de $0,11 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$. Segundo Vieira (2009), quando o solo está seco ou apresenta baixo conteúdo de água, suas partículas ficam mais próximas e difíceis de serem separadas por qualquer força externa.

De acordo com a classificação do coeficiente de variação, segundo Warrick e Nielsen (1980), a variabilidade da umidade volumétrica do solo foi classificada como média ($12\% \leq CV \leq 62\%$), para o SAF, nas camadas 0-10 cm e 10-20 cm, e baixa ($CV < 12\%$) para as demais umidades volumétricas avaliadas, podendo observar que, nas áreas de Caatinga e pastagem, na camada 0-10 cm, o $CV = 0,00$, demonstrando menor

heterogeneidade da umidade volumétrica do solo para as duas áreas de estudo na camada superficial, mostrando uma distribuição homogênea.

Na Figura 3 são apresentados, pelo intervalo de confiança da média (IC), os valores médios da Umidade Volumétrica do Solo ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$) para cada área (Caatinga, Pastagem e SAF), nas três profundidades amostradas (0-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm).

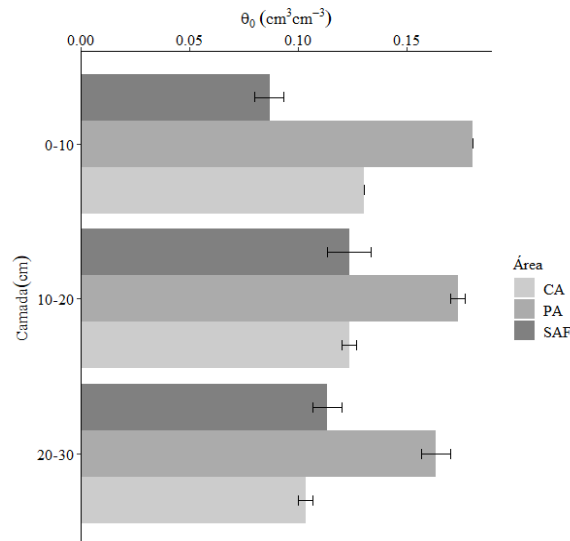


Figura 3. Valores médios da Umidade Volumétrica do Solo (θ_0), nas profundidades (a) 0-10 cm, (b) 10-20 cm e (c) 20-30 cm, para as áreas consideradas (CA = Caatinga, SAF = Sistema Agroflorestal e PA = Pastagem). As barras referem-se ao intervalo de confiança da média, e a sobreposição dos intervalos de confiança indica ausência de diferenças estatísticas entre as médias das áreas, na mesma profundidade.

Na camada 0-10 cm observa-se que houve diferença significativa entre as três áreas indicando ausência de diferenças entre as médias e o maior valor de umidade volumétrica foi na área de Pastagem. Nas camadas 10-20 cm e 20-30 cm a umidade volumétrica não foi significativa estatisticamente nas áreas de SAF e Caatinga, a umidade volumétrica na área de Pastagem apresentou valores superiores nas três camadas estudadas. Por isso a umidade do solo é considerada fator importante que determina a amplitude de deformação que pode ocorrer no solo quando alguma pressão é aplicada, aumentando a densidade do solo.

Porosidade total do solo

Os resultados da análise descritiva para a Porosidade Total do Solo ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$) nos diferentes usos (Caatinga, SAF e Pastagem) e profundidades do solo (0-10, 10-20 e 20-30 cm) são apresentados na Tabela 6.

Observa-se que a Porosidade Total do Solo apresentou variação entre os usos e ao longo do perfil. Na área sob Caatinga teve o maior valor médio de Porosidade Total na camada superficial 0-10 cm, com valor de $0,43 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$, a Pastagem $0,37 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ e o SAF $0,39 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$. Carvalho et al. (2004), avaliando os atributos físicos da qualidade de um solo, sob sistema agroflorestal, comparando à Porosidade Total do Solo, entre o SAF e o preparo convencional do solo, o SAF apresentou média superior (64,71%) ao solo sob

preparo convencional (54,38%). Este fato é, possivelmente, um reflexo da maior atividade biológica e de seus efeitos na agregação do solo.

Na camada 10-20 cm a Pastagem apresentou o maior valor médio 0,41 cm³.cm⁻³ seguido da Caatinga com 0,40 cm³.cm⁻³ e SAF com 0,39 cm³.cm⁻³ e na última camada avaliada 20-30 cm a área sob CA apresentou o maior valor médio de Porosidade Total do Solo de 0,44 cm³.cm⁻³, a Pastagem, 0,42 cm³.cm⁻³, e o SAF 0,41 cm³.cm⁻³. Os maiores valores médios de porosidade total do solo estão na área da Caatinga, resultado encontrado por Jakelaitis et al. (2008), avaliando a qualidade da camada superficial de solo sob mata, pastagens e áreas cultivadas, observou que o solo sob manejo exclusivo com pastagem apresentou porosidade total abaixo de 50%, enquanto para os solos dos demais ambientes sob ação antrópica direta os valores estiveram entre 52% e 55%, exceto o solo de mata, que foi o mais poroso, com cerca de 65%.

A Porosidade Total foi maior na área de Caatinga podendo estar relacionada com a ausência de intervenção humana e a preservação da estrutura natural do solo, na área de Pastagem foram encontrados os menores valores da Porosidade Total do Solo, reflexo do pisoreio animal indicando maior compactação na área e na área de SAF os valores médios form intermediários com ligeiro aumento na última profundidade, possivelmente devido ao efeito das raízes.

Tabela 6. Momentos estatísticos da Porosidade Total do Solo (cm³.cm⁻³) para as diferentes áreas e profundidades do solo.

	Caatinga	Pastagem	SAF
Profundidade	0,0-10 cm		
Mínimo (cm ³ .cm ⁻³)	0,39	0,35	0,36
Média (cm ³ .cm ⁻³)	0,43	0,37	0,39
Máximo (cm ³ .cm ⁻³)	0,46	0,40	0,46
DP	0,04	0,02	0,06
CV (%)	8,88	5,79	14,15
Profundidade	10-20 cm		
Mínimo (cm ³ .cm ⁻³)	0,35	0,37	0,34
Média (cm ³ .cm ⁻³)	0,40	0,41	0,39
Máximo (cm ³ .cm ⁻³)	0,44	0,44	0,43
DP	0,05	0,04	0,05
CV (%)	11,56	8,81	11,74
Profundidade	20-30 cm		
Mínimo (cm ³ .cm ⁻³)	0,43	0,40	0,38
Média (cm ³ .cm ⁻³)	0,44	0,42	0,41
Máximo (cm ³ .cm ⁻³)	0,46	0,47	0,45
DP	0,01	0,04	0,04
CV (%)	2,83	10,04	8,92

DP = Desvio Padrão; CV = Coeficiente de Variação.

De acordo com a classificação do coeficiente de variação segundo Warrick e Nielsen (1980), a variabilidade da Porosidade Total do Solo foi classificada como média (12% ≤ CV ≤ 62%) para o SAF na camada 0-10 cm e baixa (CV < 12%) para demais valores da porosidade total do solo avaliada, demonstrando menor heterogeneidade desse atributo para as áreas de estudo e profundidades.

Na Figura 4 são apresentados pelo Intervalo de Confiança da Média (IC) os valores médios da Porosidade Total do Solo (ϕ_t , $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$) para cada área (Caatinga, Pastagem e SAF), nas três profundidades amostradas (0-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm).

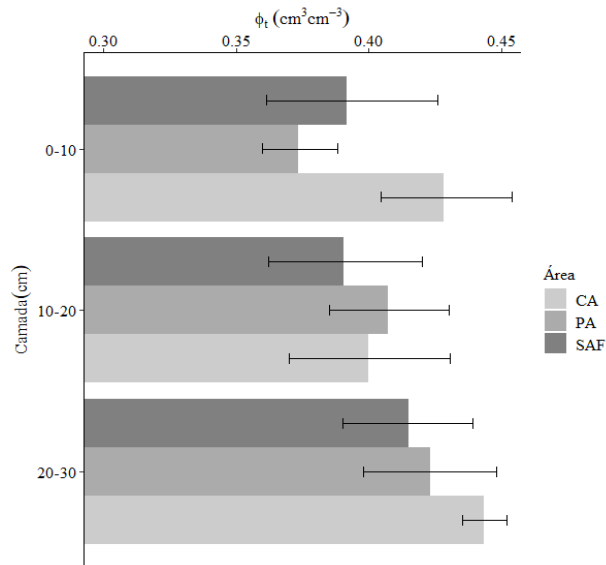


Figura 4. Valores médios da Porosidade Total do Solo (ϕ_t), nas profundidades (a) 0-10 cm, (b) 10-20 cm e (c) 20-30 cm, para as áreas consideradas (CA = Caatinga, SAF = Sistema Agroflorestal e PA = Pastagem). As barras referem-se ao intervalo de confiança da média, e a sobreposição dos intervalos de confiança indica ausência de diferenças estatísticas entre as médias das áreas, na mesma profundidade.

Na profundidade superficial de 0-10 cm, os valores de Porosidade Total do Solo tenderam a ser reduzidos em virtude do impacto direto de uso, manejo e fatores climáticos. Observa-se que nas áreas de Caatinga e Pastagem houve diferença significativa e os menores valores foram encontrados na área de Pastagem, podendo esse comportamento ser explicado pelo fato desta área sofrer compactação devido ao pisoteio dos animais que proporciona aumento da densidade do solo, reduzindo a Macroporosidade e a Porosidade Total, afetando a Capacidade de Retenção de Água, reduzindo o rendimento das culturas e interferindo na biodiversidade do solo (Lees et al., 2016).

Nas profundidades inferiores, 10-20 cm e 20-30 cm, não foi constatado diferença significativa para as três áreas de estudo, mas observa-se um aumento da Porosidade Total do solo na camada 20-30 cm em todas as áreas podendo estar relacionado à menor compactação por tráfego de máquinas/pisoteio dos animais e maior preservação da estrutura original do solo, resultando em maior macroporosidade.

Resistência à penetração do solo

Na Tabela 7 são apresentados os resultados da análise descritiva para Resistência à Penetração do Solo (Mpa), nos diferentes usos (Caatinga, Pastagem e SAF) e profundidades do solo (0-10, 10-20 e 20-30 cm). Em termos absolutos, pode-se verificar que o valor médio da resistência do solo à penetração na área da Caatinga aumentou com a profundidade, com valores na camada 0-10, de 2,4 Mpa, na camada 10-20 cm, de 4,0 Mpa, e na camada 20-30 cm, de 5,1 Mpa, este aumento em profundidade pode estar

relacionado com a menor umidade e por uma possível compactação natural das camadas mais profundas do solo. Os valores médios de Resistência à Penetração do Solo na área de Caatinga foram classificados, segundo Canarache (1990), como baixa na camada superficial e moderada nas camadas 10-20 cm e 20-30 cm, podendo haver restrição para impedir o crescimento e o desenvolvimento das raízes das plantas. Tavares Filho e Tessier (2010) afirmam que valores de Resistência do Solo à Penetração das raízes de 2,0 a 4,0 Mpa já podem restringir ou mesmo impedir o crescimento e o desenvolvimento das raízes.

Tabela 7. Momentos estatísticos da Resistência à Penetração do Solo (Mpa) para as diferentes áreas e profundidades do solo.

	Caatinga	Pastagem	SAF
Profundidade	0,0-10 cm		
Mínimo (Mpa)	1,94	2,63	3,32
Média (Mpa)	2,40	3,55	4,23
Máximo (Mpa)	2,63	4,69	5,38
DP	0,32	0,74	0,74
CV (%)	13,54	20,99	17,57
Profundidade	10-20 cm		
Mínimo (Mpa)	3,32	3,32	4,01
Média (Mpa)	4,01	4,23	4,69
Máximo (Mpa)	5,38	5,38	5,38
DP	0,97	0,74	0,49
CV (%)	24,32	17,57	10,38
Profundidade	20-30 cm		
Mínimo (Mpa)	4,69	3,32	5,38
Média (Mpa)	5,15	3,55	5,84
Máximo (Mpa)	5,38	4,01	6,76
DP	0,32	0,28	0,56
CV (%)	6,30	7,93	9,63

DP = Desvio Padrão; CV = Coeficiente de Variação.

Na área de Pastagem, a média da Resistência do Solo à Penetração na camada superficial, 0-10 cm, foi de 3,5 Mpa, na camada 10-20 cm, houve aumento no valor, 4,2 Mpa, e na camada 20-30 cm, diminuiu para 3,5 Mpa. De acordo com Canarache (1990), a classificação da resistência do solo à penetração na área sob Pastagem é moderada compactação, já podendo restringir ou mesmo impedir o crescimento e o desenvolvimento das raízes. Esses valores de Resistência do Solo à Penetração encontrados na área de Pastagem, segundo Trimble e Mendel (1995), pode estar relacionado à força aplicada pelo pisoteio dos animais.

Na área de SAF observa-se que o valor médio da Resistência do Solo à Penetração aumentou com a profundidade, com valores, na camada 0-10 cm, de 4,2 Mpa, na camada 10-20 cm, de 4,7 Mpa, e na camada 20-30 cm, de 5,8 Mpa, possivelmente devido à compactação histórica ou presença de horizontes mais adensados naturalmente, aliados à menor umidade. Os valores médios de Resistência do solo à penetração na área de SAF foram classificados, segundo Canarache (1990), como moderada compactação, nas camadas 0-10 cm e 10-20 cm, e alta compactação, na camada 20-30 cm, nesse solo, esse comportamento pode ser, possivelmente, devido à influência da textura do solo, pois tem

uma predominância da fração areia nas camadas avaliadas resultando em rápida permeabilidade e consequente variação no conteúdo de água no solo, transferindo essa característica para a resistência do solo à penetração das raízes. Mion et al. (2012), pesquisando solo de textura arenosa, também observaram valores de Resistência do Solo à Penetração aumentando com a profundidade.

Segundo Santos et al. (2012), tem-se observado, em sistemas agroflorestais, um decréscimo nos valores de Densidade do Solo e Resistência do Solo à Penetração, em relação às áreas preservadas consideradas sistemas de referência.

De acordo Warrick e Nielsen (1980), o CV, que é usado para comparar e avaliar variáveis, foi classificado para a Resistência do Solo à Penetração como baixa ($CV < 12\%$), para a camada 10-20 cm, na área da Pastagem, e para a camada 20-30 cm, nas três áreas de estudo, demonstrando menor heterogeneidade desse atributo para as áreas de estudo e profundidades, e média ($12\% \leq CV \leq 62\%$) para as demais camadas nas três áreas.

Na Figura 5 são apresentados pelo Intervalo de Confiança da Média (IC) os valores médios de resistência à penetração do solo ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$) para cada área (Caatinga, Pastagem e SAF), nas três profundidades amostradas (0-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm).

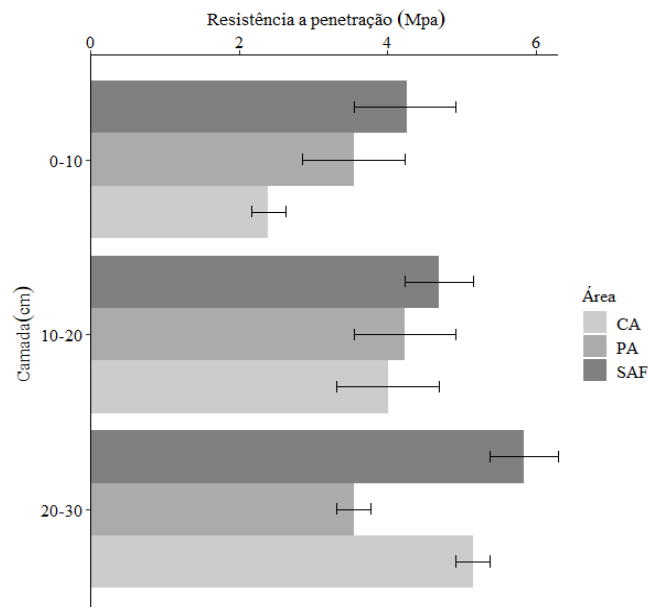


Figura 5. Valores médios da Resistência à Penetração do solo (RP), nas profundidades (a) 0-10 cm, (b) 10-20 cm e (c) 20-30 cm, para as áreas consideradas (CA = Caatinga, SAF = Sistema Agroflorestal e PA = pastagem). As barras referem-se ao intervalo de confiança da média, e a sobreposição dos intervalos de confiança indica ausência de diferenças estatísticas entre as médias das áreas, na mesma profundidade.

Para a profundidade 0-10 cm, os dados mostraram que os valores médios não tiveram diferença significativa nas áreas de SAF e Pastagem. Para essa profundidade de amostragem, os valores de resistência à penetração do solo na área da Caatinga foram menores, devido este ambiente manter o solo em condições mais próximas do natural, sem as pressões antrópicas.

Na profundidade 10-20 cm, os valores médios da Resistência do Solo à Penetração obtiveram um aumento em relação à camada superficial, reflexo do adensamento natural

da subsuperfície, mas não tiveram diferença significativa em ambas às áreas, porém a área de Caatinga obteve os menores valores de Resistência do solo à Penetração.

Na profundidade 20-30 cm, as áreas SAF e Caatinga apresentaram valores de resistência à penetração do solo sem diferença significativa. Os maiores valores de resistência à penetração do solo foram encontrados na área de SAF. Este comportamento pode ser explicado pela umidade do solo que é uma variável que deve estar associada à resistência à penetração, pois a água atua como lubrificante das partículas do solo. Isso significa que quanto menor a umidade do solo, maior sua resistência (Jasper et al., 2023).

Conclusão

A análise dos atributos físicos do solo nas áreas de Caatinga, Pastagem e Sistema Agroflorestal (SAF), em diferentes profundidades, demonstra que o uso e manejo exercem influência direta sobre a qualidade do solo. A Caatinga apresentou o funcionamento dos atributos físicos estudados como referência natural de conservação, o sistema agroflorestal demonstrou constituir uma estratégia promissora para a melhoria e manutenção da qualidade física do solo no semiárido, enquanto a pastagem apresentou condições de compactação do solo, havendo a necessidade de práticas de manejo conservacionistas para mitigar processos de degradação e promover a sustentabilidade do solo.

Conflitos de interesses

Os autores declaram não haver interesses concorrentes ou relações pessoais conhecidas que possam ter influenciado as inferências relatadas neste artigo.

Agradecimento

A CAPES, UFRPE/UAST e UFBA.

Referências

- Althoff, T. D.; Menezes, R. S. C.; Pinto, A. S.; Pareyn, F. G. C.; Carvalho, A. L.; Martins, J. C. R.; Carvalho E. X.; Silva, A. S. A.; Dutra, E. D.; Sampaio, E. V. S. B. Adaptation of the century model to simulate C and N dynamics of Caatinga dry forest before and after deforestation. **Agriculture, Ecosystems Environment**, v. 254, p. 26-34, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.11.016>
- Alvares, C. A.; Stape, J. L.; Sentelhas, P. C.; Gonçalves, J. L. M.; Sparovek, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Arshad, M. A.; Lower, B.; Grossman, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: Doran, J. W.; Jones, A. J. (Eds.). **Methods for assessing soil quality**. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p. 123-141.
- Barreto, A. C.; Lima, F. H. S.; Freire, M. B. G. S.; Araújo, Q. R.; Freire, F. J. Características químicas e físicas de um solo sob floresta, sistema agroflorestal e pastagem no sul da Bahia. **Revista Caatinga**, v. 19, n. 4, p. 415-425, 2006.
- Bicalho, I. M. Um estudo da densidade do solo em diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Enciclopédia Biosfera**, v. 7, n. 12, p. 1-9, 2011.

- Bottega, E. L.; Bottega, S. P.; Silva, S. A.; Queiroz, D. M.; Souza, C. M. A.; Rafull, L. Z. L. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em um Latossolo Vermelho Distroférrico. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 6, n. 2, p. 331-336, 2011.
- Brady, N.; Weil, R. R. **The nature and properties of soils**. 14. ed. Libano: Prentice-Hall, 2007.
- Canarache, A. PENETR: A generalized semi-empirical model estimating soil resistance to penetration. **Soil and Tillage Research**, v. 16, n. 1/2, p. 51-70, 1990. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(90\)90021-5](https://doi.org/10.1016/0167-1987(90)90021-5)
- Carvalho, R. P.; Daniel, O.; Davide, C. A.; Souza, F. R. Atributos físicos e químicos de um Neossolo Quartzarênico sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Caatinga**, v. 28, n. 1, p. 148-159, 2015.
- Carvalho, R.; Goedert, W. J.; Armando, M. S. Atributos físicos da qualidade de um solo sob sistema agroflorestal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 11, p. 1153-1155, 2004. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2004001100015>
- Centeno, L. N.; Guevara, M. D. F.; Cecconello, S. T.; Sousa, R. O. D.; Timm, L. C. Textura do solo: conceitos e aplicações em solos arenosos. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, v. 4, n. 1, p. 31-37, 2017. <https://doi.org/10.15210/rbes.v4i1.11576>
- Correia, K. G. **Biota do solo e atividade microbiana de áreas em diferentes estágios sucessionais e aspectos socioeconômicos no Município de Santa Terezinha, PB**. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2010. (Tese de doutorado).
- Costa, C. C. A.; Camacho, R. G. V.; Macedo, I. D.; Silva, P. C. M. Análise comparativa da produção de serapilheira em fragmentos arbóreos e arbustivos em área de Caatinga na Flona de Açú-RN. **Revista Árvore**, v. 34, n. 2, p. 259-265, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622010000200008>
- Couqueiro, J. R. O Semiárido Brasileiro: lugar de vida do/a camponês/a. **Revista Eletrônica de Culturas e Educação**, v. 1, n. 6, p. 47-60, 2012.
- Efron, B. Bootstrap methods: Another Look at the Jackknife. In: Kotz, S.; Johnson, N. L. (Eds.). **Breakthroughs in Statistics**. New York: Springer, 1992. p. 569-593. (Springer Series in Statistics). https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4380-9_41
- Efron, B. Bootstrap Methods: Another look at the Jackknife. **The Annals of Statistics**, v. 7, n. 1, p. 1-26, 1979. <https://doi.org/10.1214/aos/1176344552>
- Flores, J. P. C.; Anghinoni, I.; Cassol, L. C.; Carvalho, P. C. F.; Leite, J. G. D. B.; Fraga, T. I. Atributos físicos do solo e rendimento de soja em sistema plantio direto em integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 4, p. 771-780, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000400017>
- Freitas, I. C.; Santos, F. C. V.; Custódio Filho, R. O.; Silva, N. R.; Correchel, V. Resistência à penetração em Neossolo Quartzarênico submetido a diferentes formas de manejo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 12, p. 1275-1281, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012001200003>
- Gama, D. C.; Jesus, J. B. Principais solos da Região Semiárida do Brasil favoráveis ao cultivo do *Eucalyptus* L'Heritier. **Biofix Scientific Journal**, v. 5, n. 2, p. 214-221, 2020. <https://doi.org/10.5380/biofix.v5i2.70968>

- Gomes, R. P.; Bergamin, A. C.; Silva, L. S.; Campos, M. C. C.; Cazetta, J. O.; Coelho, A. P.; Souza, E. D. Changes in the physical properties of an Amazonian Inceptisol induced by tractor traffic. **Chilean Journal of Agricultural Research**, v. 79, n. 1, p. 103-113, 2019. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392019000100103>
- Guerra, A. M. N.; Pessoa, M. F.; Maracajá, P. B. Estudo fitossociológico em dois ambientes da Caatinga localizada no assentamento Moacir Lucena, Apodi-RN - Brasil. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 9, n. 1, p. 141-150, 2014.
- Guimarães, R. M. L.; Tormena, C. A.; Blainski, E.; Fidalski, J. Intervalo hídrico ótimo para avaliação da degradação física do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 1512-1521, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000600008>
- Han, Y.; Zhang, J.; Mattson, K. G.; Zhang, W.; Weber T. A. Sample sizes to control error estimates in determining soil bulk density in California forest soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 80, p. 756-764, 2016. <https://doi.org/10.2136/sssaj2015.12.0422>
- Jacomine, P. K. T.; Cavalcanti, A. C.; Burgos, N.; Pessoa, S. C. P.; Silveira, C. O. **Levantamento exploratório: reconhecimento de solos do Estado de Pernambuco**. Recife: MA-DPP, SUDENE-DRN, 1973. v. 2.
- Jakelaitis, A.; Silva, A. A.; Santos, J. B.; Vivian, R. Qualidade da camada superficial de solo sob mata, pastagens e áreas cultivadas. **Revista Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 38, n. 2, p. 118-127, 2008.
- Jasper, S. P.; Zimmermann, G. G.; Kmiecik, L. L.; Savi, D. Atributos físicos do solo submetido à ensilagem com diferentes conjuntos mecanizados. **Revista Caatinga**, v. 36, n. 2, p. 456-463, 2023. <https://doi.org/10.1590/1983-21252023v36n222rc>
- Lees, K. J.; McKenzie, A. J.; Newell-Price, J. P.; Critchley, C. N.; Rhymer, C. M.; Chambers, B. J.; Whittingham, M. J. The effects of soil compaction mitigation on below-ground fauna: How earthworms respond to mechanical loosening and power harrow cultivation. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 232, p. 273-282, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.07.026>
- Marques, F. A.; Nascimento, A. F.; Araujo Filho, J. C.; Silva, A. B. **Solos do Nordeste**. Recife: EMBRAPA, 2014.
- Medeiros, P. H. A.; Araújo, J. C.; Bronstert, A. Interception measurements and assessment of Gash model performance for a tropical semi-arid region. **Revista Ciência Agronômica**, v. 40, n. 2, p. 165-174, 2009.
- Melo, R. O.; Pacheco, E. P.; Menezes, J. C.; Cantalice, J. R. B. Susceptibilidade à compactação e correlação entre as propriedades físicas de um Neossolo sob vegetação de Caatinga. **Revista Caatinga**, v. 21, n. 5, p. 12-17, 2008.
- Menezes, R. S. C.; Sales, A. T.; Primo, D. C.; Albuquerque, E. R. G. M. D.; Jesus, K. N. D.; Pareyn, F. G. C.; Santana, M. S.; Santos, U. J.; Martins, J. C. R.; Althoff, T. D.; Nascimento, D. M.; Gouveia, R. F.; Fernandes, M. M.; Loureiro, D. C.; Araújo Filho, J. C.; Giongo, V.; Duda, G. P.; Alves, B. J. R.; Ivo, W. M. P. M.; Andrade, E. M.; Sampaio, M. V. S. B. Soil and vegetation carbon stocks after land-use changes in a seasonally dry tropical forest. **Geoderma**, v. 390, 114943, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.114943>
- Mion, R. L.; Nascimento, E. M. S.; Sales, F. A. L.; Silva, S. F.; Duarte, J. M. L.; Sousa, B. M. Variabilidade espacial da porosidade total, umidade e resistência do solo à penetração de um Argissolo Amarelo. **Semina: Revista Ciências Agrárias**, v. 33, n. 6, p. 2057-2066, 2012. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2012v33n6p2057>

- Mora, J. L.; Lázaro R. Seasonal changes in bulk density under semi-arid patchy vegetation: The soil beats. **Revista Geoderma**, v. 235/236, p. 30-38, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.06.022>
- Mota, J. C. A.; Assis Júnior, R. N.; Amaro Filho, J.; Libardi, P. L. Algumas propriedades físicas e hídricas de três solos na chapada do Apodi, RN, cultivados com melão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 49-58, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000100006>
- Neves, L. V. M. W.; Fracetto, F. J. C.; Fracetto, G. G. M.; Araújo Filho, J. C.; Araujo, J. K. S.; Santos, J. C. B.; Mendes Júnior, J. P.; Souza Júnior, V. S. Microbial abundance and C and N stocks in tropical degraded Planosols from semi-arid northeastern Brazil. **Catena**, v. 196, 104931, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104931>
- Oliveira, I. A.; Campos, M. C. C.; Soares, M. D. R.; Aquino, R. E.; Marques Júnior, J.; Nascimento, E. P. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Cambissolo Háplico, sob diferentes usos na região sul do Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 4, p. 1103-1112, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000400027>
- Parente, H. N.; Parente, M. O. M. Impacto do pastejo no ecossistema caatinga. **Arquivos de Ciências Veterinárias e Zoologia da UNIPAR**, v. 13, n. 2, p. 115-120, 2010.
- Paula, B. V.; Lima, A. C. R.; Casalinho, H. D.; Buss, R. B.; Ribes, R.; Ribeiro, T. R. Diagnóstico da qualidade do solo sob cultivo de pêssego em agroecossistemas de base familiar. **Revista de la Facultad de Agronomía**, v. 114, n. 2, p. 271-278, 2015.
- Payton, M. E.; Miller, A. E.; Raun, W. R. Testing statistical hypotheses using standard error bars and confidence intervals. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 50, p. 547-551, 2000. <https://doi.org/10.1080/00103620009370458>
- Paz, R. J.; Paz, M. C. P.; Lins Filho, J. A.; Lucena, R. F. P. Unidades de conservação na região semiárida do Brasil. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 7, n. 17, p. 1283-1334, 2020. [https://doi.org/10.21438/rbgas\(2020\)071718](https://doi.org/10.21438/rbgas(2020)071718)
- Pereira, A. P. A.; Mendes, L. W.; Oliveira, F. A. S.; Antunes, J. E. L.; Melo, V. M. M.; Araújo, A. S. F. Land degradation affects the microbial communities in the Brazilian Caatinga biome. **Catena**, v. 211, 105961, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105961>
- Pereira, F. S.; Andrioli, I.; Pereira, F. S.; Oliveira, P. R.; Centurion, J. F.; Falqueto, R. J.; Martins, A. L. S. Qualidade física de um Latossolo Vermelho submetido a sistemas de manejo avaliado pelo Índice S. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 1, p. 87-95, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000100008>
- Ramalho, M. F. D. J. L. A fragilidade ambiental do Nordeste brasileiro: o clima semiárido e as imprevisões das grandes estiagens. **Sociedade e Território**, v. 25, n. 2, p. 104-115, 2013.
- Reichert, J. M.; Reinert, D. J.; Braida, J. A. Qualidade do solo e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Revista de Ciência Ambiental**, v. 27, p. 29-48, 2003.
- Reynolds, W. D.; Drury, C. F.; Tan, C. S.; Fox, C. A.; Yang, X. M. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. **Geoderma**, v. 152, n. 3/4, p. 252-263, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.06.009>
- Reynolds, W. D.; Drury, C. F.; Yang, X. M.; Fox, C. A.; Tan, C. S.; Zhang, T. Q. Land management effects on the near-surface physical quality of a clay loam soil. **Soil and Tillage Research**, v. 96, p. 316-330, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.still.2007.07.003>

Ribeiro, M. R.; Sampaio, E. V. S. B.; Galindo, I. C. L. Os solos e o processo de desertificação no Semiárido Brasileiro. In: Ribeiro, M. R.; Nascimento, C. W. A.; Ribeiro Filho, M. R.; Cantalice, J. R. B. (Eds.). **Tópicos em Ciências do Solo**. 1. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. p. 413-459.

Sanchez, P. A. Science in Agroforestry. **Agroforestry Systems**, v. 30, p. 5-55, 1995. <https://doi.org/10.1007/BF00708912>

Santos, H. G.; Jacomine, P. K. T.; Anjos, L. H. C.; Oliveira, V. A.; Lumbrreras, J. F.; Coelho, M. R.; Almeida, J. A.; Araujo Filho, J. C.; Lima, H. N.; Marques, F. A.; Oliveira, J. B.; Cunha, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS)**. 6. ed. Brasília: EMBRAPA, 2025.

Santos, K. S.; Montenegro, A. A. A.; Almeida, B. G.; Montenegro, S. M. G. L.; Andrade, T. S.; Fontes Júnior, R. V. P. Variabilidade espacial de atributos físicos em solos de vale aluvial no semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 8, p. 828-835, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000800003>

Santos, S. R. Q.; Cunha, A. P. M. A.; Ribeiro-Neto, G. G. Avaliação de dados de precipitação para o monitoramento do padrão espaço-temporal da seca no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 25, p. 80-100, 2019. <https://doi.org/10.5380/abclima.v25i0.62018>

Santos, U. J.; Sampaio, S. B. E. V.; Andrade, E. M.; Pinto, A. S.; Dias, B. O.; Jesus, K. N.; Santana, M.; Althoff, T.; Fernandes, M. M.; Menezes, R. S. C. Nitrogen stocks in soil classes under different land uses in the Brazilian Semiarid Region. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 21, n. 1, p. 1621-1630, 2021. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00466-4>

Secco, D.; Da Ros, C. O.; Secco, J. K.; Fiorin, J. E. Atributos físicos e produtividade de culturas em um Latossolo Vermelho Argiloso sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 3, p. 407-414, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832005000300011>

Silva, C. V. T.; Andrade, E. M.; Lemos Filho, L. C. A.; Ribeiro Filho, J. C.; Oliveira Júnior, H. S. Temporal dynamics of soil susceptibility to erosion in semi-arid watersheds. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 43, n. 1, e51378, 2021. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v43i1.51378>

Silveira, D. C. **Diagnóstico da qualidade do solo em um pomar de citros cultivado com plantas de cobertura nas condições ambientais do Recôncavo da Bahia**. Cruz das Almas: Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, 2009. (Disertação de mestrado).

Souza, E. D.; Carneiro, M. A. C.; Paulinno, H. B. Atributos físicos de um Neossolo Quartzarênico e um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, n. 11, p. 1135-1139, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2005001100012>

Souza, E. D.; Carneiro, M. A. C.; Paulino, H. B.; Silva, C. A.; Buzetti, S. Frações de carbono, biomassa e atividade microbiana em um Latosso Vermelho sob Cerrado submetido a diferentes sistemas de manejo e usos do solo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 28, n. 3, p. 323-329, 2006. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v28i3.940>

Souza, M. T. S.; Silva, M. E. F.; Paulo, P. F. M.; Ribeiro, A. B.; Andrade, A. P.; Cassuce, M. R. Caracterização climática e o efeito do estresse hídrico sob as plantas nativas da Caatinga. **Publicações em Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 8, n. 1, p. 1-17, 2014.

Spera, S. T.; Santos, H. P.; Fontaneli, R. S.; Tomm, G. O. Efeitos de sistemas de produção de grãos envolvendo pastagens sob plantio direto nos atributos físicos de solo e na produtividade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 3, p. 533-542, 2004. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000300014>

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

Stolf, R.; Cassel, D. K.; King, L. D., Reichardt, K. Measuring mechanical impedance in clayey gravelly soils. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 2, p. 189-196, 1998. <https://doi.org/10.1590/S0100-06831998000200003>

Stolf, R.; Reichardt, K.; Vaz, C. P. M. Response to "Comments on 'Simultaneous measurement of soil penetration resistance and water content with a combined penetrometer - TDR moisture probe' and 'A dynamic cone penetrometer for measuring soil penetration resistance'". **Soil Science Society of America Journal**, v. 69, n. 3, p. 927-929, 2005. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0927>

Tavares Filho, J.; Tessier, D. Effects of different management systems on porosity of Oxisols in Paraná, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 3, p. 899-906, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000300031>

Teixeira, P. C.; Donagemma, G. K.; Fontana, A.; Teixeira, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília: EMBRAPA, 2017.

Trimble, S. W.; Mendel, A. C. The cow as a geomorph agent: A critical review. **Geomorphology**, v. 13, n. 1/4, p. 233-253, 1995. [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(95\)00028-4](https://doi.org/10.1016/0169-555X(95)00028-4)

Vieira, R. M. S. P.; Tomasella, J.; Alvalá, R. C. S.; Sestini, M. F.; Affonso, A. G.; Rodriguez, D. A.; Barbosa, A. A.; Cunha, A. P. M. A.; Valles, G. F.; Crepani, E.; Oliveira, S. B. P.; Souza, M. S. B.; Calil, P. M.; Carvalho, M. A.; Valeriano, D. M.; Campello, F. C. B.; Santana, M. O. Identifying areas susceptible to desertification in the Brazilian Northeast. **Solid Earth**, v. 3, n. 1, p. 347-360, 2015. <https://doi.org/10.5194/se-6-347-2015>

Virgens, A. P.; Barreto-Garcia, P. A. B.; Paula, A.; Carvalho, F. F.; Aragão, M. A.; Monroe, P. H. M. Biomassa de espécies florestais em área de Caatinga arbórea. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 37, n. 92, p. 555-561, 2017. <https://doi.org/10.4336/2017.pfb.37.92.1465>

Warrick, A. W. Spatial variability. In: Hillel, D. (Ed.). **Environmental soil physics**. New York: Academic Press, 1998. p. 655-675.

Warrick, A. W.; Nielsen, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: Hillel, D. (Ed.). **Applications of soil physics**. New York: Academic Press, 1980.



Informação da Licença: Este é um artigo Open Access distribuído sob os termos da Licença Creative Commons Attribution, que permite uso irrestrito, distribuição e reprodução em qualquer meio, desde que a obra original seja devidamente citada.