

Influência da Vinhaça e Colheita Mecanizada nos Aspectos Físicos e Químicos do Solo no Município de Paudalho – PE

Influence of Vinasse and Mechanized Harvesting on the Physical and Chemical Aspects of Soil in Paudalho Municipality - PE

Valquíria do Nascimento Tavares¹ 

Inaldo Jerfson Sobreira da Silva² 

Fernando Cartaxo Rolim Neto³ 

Roberto da Boa Viagem Parahyba⁴ 

Rômulo Simões Cezar Menezes⁵ 

Marcus Metri Correa⁶ 

Maria do Socorro Bezerra de Araújo⁷ 

Palavras-chave:

Disponibilidades de nutrientes
Densidade do solo
Densidade de partícula
Porosidade total

Resumo

O plantio da cana-de-açúcar emprega métodos e processos produtivos de alto potencial de impacto no meio ambiente. Todavia, essas indústrias vêm investindo em tecnologias buscando soluções, que vão desde o descarte dos resíduos produzidos até a erradicação das queimadas. Objetivou-se nesse trabalho verificar a influência da vinhaça e colheita mecanizada nos aspectos físicos e químicos de um Argissolo Vermelho Amarelo distrófico de textura média, cultivados com cana-de-açúcar. Para as análises da densidade do solo, densidade de partícula e porosidade total, a coleta de dados foi realizada através de um experimento em Delineamento Inteiramente Casualizado, com esquema fatorial, em três repetições, a fim de se analisar a interação entre os fatores tratamentos x profundidades. Para tanto, foram utilizados quatro tratamentos (T1, T2, T3 e T4), em três profundidades (0 – 20 cm, 20 – 40 cm e 40 – 60 cm), e com três repetições. Os dados obtidos foram submetidos à ANOVA e comparados pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$) de probabilidade, utilizando-se o programa estatístico ASSISTAT 7.7 beta. Os resultados mostraram que a fertirrigação não influenciou na densidade do solo, densidade de partícula e porosidade total. Ainda em relação aos atributos físicos do solo, a colheita mecanizada influenciou no aumento da densidade do solo e porosidade total. A unidade experimental sem aplicação de vinhaça apresentou pH ácido e elevados teores de saturação por alumínio, ocasionando uma diminuição da disponibilidade de nutrientes para o solo. Contudo, pode-se concluir que as unidades experimentais tratadas com vinhaça tiveram um aumento na disponibilidade de nutrientes. Portanto, a adição de vinhaça pode ser uma estratégia importante na manutenção e aumento da fertilidade do solo a longo prazo em lavouras de cana-de-açúcar.

Keywords

Availability of nutrients
Soil density
Particle density
Total porosity

Abstract

Sugarcane cultivation methods and processes usually have negative impacts on the environment. However, this industry has been seeking more sustainable technologies, ranging from the adequate disposal of the organic residues produced to the elimination of pre-harvest burning and introduction of mechanized harvest. The objective of this work was to verify the influence of vinasse application and mechanized harvesting on the physical and chemical aspects of a dystrophic Red Yellow Argisol of medium texture, cultivated with sugarcane. For this, a field experiment in a Completely Randomized Design, with a factorial scheme was conducted. Four management treatments, with three replications, were evaluated: T1 - Without application of vinasse, burned cane followed by manual harvest, without irrigation; T2 - With application of vinasse, mechanized harvest, without irrigation; T3 - With application of vinasse, mechanized harvest, with irrigation; T4 - With application of vinasse, burned cane followed by manual harvest, without irrigation. Soil samples were collected in three depths (0 – 20 cm, 20 – 40 cm and 40 – 60 cm) and soil physical and chemical characteristics were determined. The data obtained were submitted to ANOVA and compared by the Tukey test ($p \leq 0.05$) of probability, using the statistical program ASSISTAT 7.7 beta. The results showed that fertigation with vinasse did not influence soil density, particle density, and total porosity. However, mechanized harvesting increased soil density and total porosity. The soil in the experimental unit without vinasse application presented a more acidic pH and high levels of aluminum saturation, causing a decrease in the availability of nutrients, and the soils treated with vinasse had an increase in nutrient availability. Therefore, the addition of vinasse can be an important strategy in maintaining and increasing long-term soil fertility in sugarcane cropping systems.

¹Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Recife, PE, Brasil. valquiria_quimica@hotmail.com

²Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE, Recife, PE, Brasil. inaldo.fisica@gmail.com

³Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE, Recife, PE, Brasil. fernandocartaxo@yahoo.com.br

⁴Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA, Recife, PE, Brasil. parahyba@uep.cnps.embrapa.br

⁵Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Recife, PE, Brasil. romulo.menezes@ufpe.br

⁶Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE, Recife, PE, Brasil. marcus.metri@gmail.com

⁷Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Recife, PE, Brasil. maria.baraujo@ufpe.br

INTRODUÇÃO

O Brasil apresenta destaque no mercado de açúcar e álcool, sendo o único país que domina todos os estágios da tecnologia de produção da cana-de-açúcar apresentando uma cadeia de produção organizada (Silva, 2010).

A avaliação das condições físicas, químicas e biológicas dos solos submetidos à fertirrigação com vinhaça é essencial para melhorar os atributos do solo e aumentar a produção de canaviais. Marques (2006) afirma que a vinhaça é composta, em média, por 93% de água e 7% de sólidos, 75% dos quais correspondem à matéria orgânica. A fração sólida é constituída, principalmente, de compostos orgânicos e elementos minerais.

São vários os nutrientes necessários ao desenvolvimento da cana-de-açúcar. Essa cultura necessita de grandes quantidades de Nitrogênio (N), Fósforo (P) e Potássio (K). Contudo a cana-de-açúcar necessita também de outros macronutrientes: Cálcio (Ca^{2+}), Magnésio (Mg^{2+}), Enxofre (S) e dos micronutrientes: Boro (B), Cobre (Cu^{2+}), Ferro (Fe^{2+}), Manganês (Mn^{2+}) e Zinco (Zn^{2+}). Para avaliar o grau de fertilidade do solo é necessário saber a magnitude dos valores individuais de cada nutriente, assim como as variáveis deles derivadas (CTC – Capacidade de Troca de Cátions; SB – Soma de Bases; V (%) – Volume de Saturação por Bases; e m % - Percentagem de saturação por alumínio).

Pesquisas que englobem a qualidade física do solo é de grande importância para a determinação do tipo de manejo a ser utilizado.

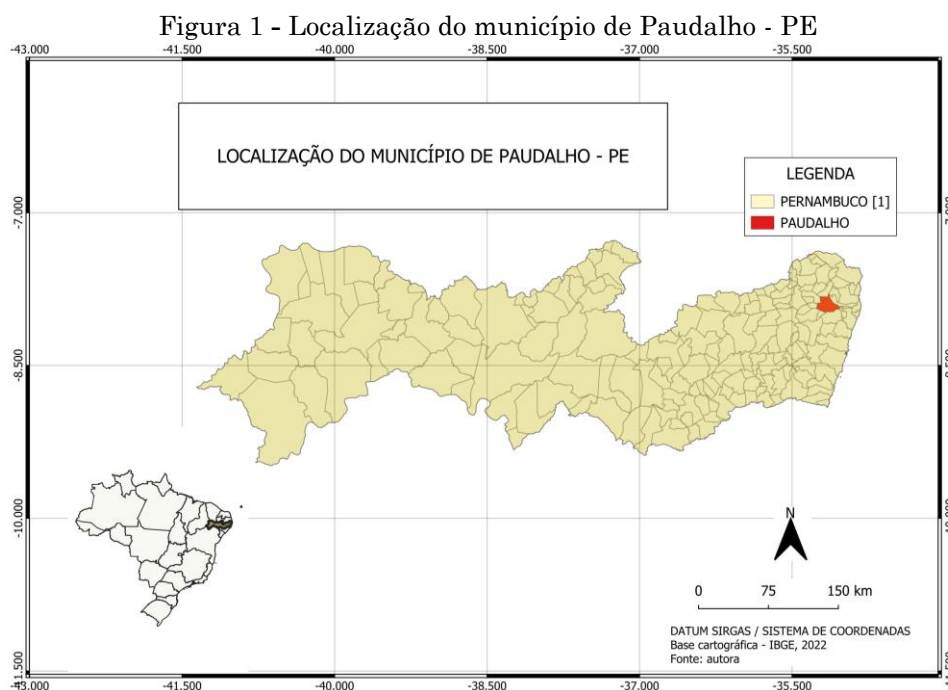
De acordo com Sales *et al.* (2010), os estudos sobre a qualidade física do solo evoluíram significativamente nos últimos anos, justificados quase sempre pela necessidade de se avaliar o comportamento de diversos atributos físicos, em áreas cultivadas e sob pastagens.

Souza *et al.* (2012) cita que a constante necessidade de aumentar a produtividade, promove o uso desordenado e intenso do tráfego de máquinas e equipamentos na cultura e no solo, o que resulta em efeitos degradantes para a qualidade física do solo. Bertol *et al.* (2010) também considera que a mecanização agrícola é um fator que pode provocar maior ou menor degradação do solo, onde esse tipo de prática por determinado período altera negativamente algumas de suas características físicas.

As determinações de densidade e de porosidade do solo são as avaliações mais comuns e difundidas para identificar camadas compactadas no solo (Lanzanova *et al.*, 2007). Contudo, objetivou-se nesse trabalho verificar a disponibilidade de nutrientes e os atributos físicos do solo cultivados com cana-de-açúcar submetidos a diferentes tipos de manejos.

MATERIAIS E MÉTODOS

As áreas selecionadas estão localizadas na Zona da Mata Norte do Estado de Pernambuco - Brasil, no município de Paudalho – PE, em região agrícola da Usina Petribú, conforme figura 1.



Fonte: Os autores (2023).

Segundo a classificação climática de Köppen-Geiger, a Zona da Mata Norte possui um clima As' (clima quente e úmido com chuvas de outono e inverno), com temperatura equilibrada ao longo do ano, com mínimas de 15 °C e máximas de 36°C. Apresenta um índice pluviométrico de 2.500 mm, com umidade relativa do ar variando entre 30% a 100% e relevo do tipo ondulado.

O solo da região foi classificado como Argissolo Vermelho Amarelo distrófico de textura média, conforme levantamento de solos

existente, executado pela equipe técnica da Usina Petribú. Em todas as unidades foram cultivadas a mesma variedade de cana-de-açúcar, a RB867515, por ser representativa para essa região.

A área de estudo foi dividida em quatro unidades experimentais submetidas a diferentes tratamentos com três repetições para cada tratamento. No quadro 1 são apresentadas as localizações dos pontos de coleta dos solos.

Quadro 1 - Localização dos pontos coletados

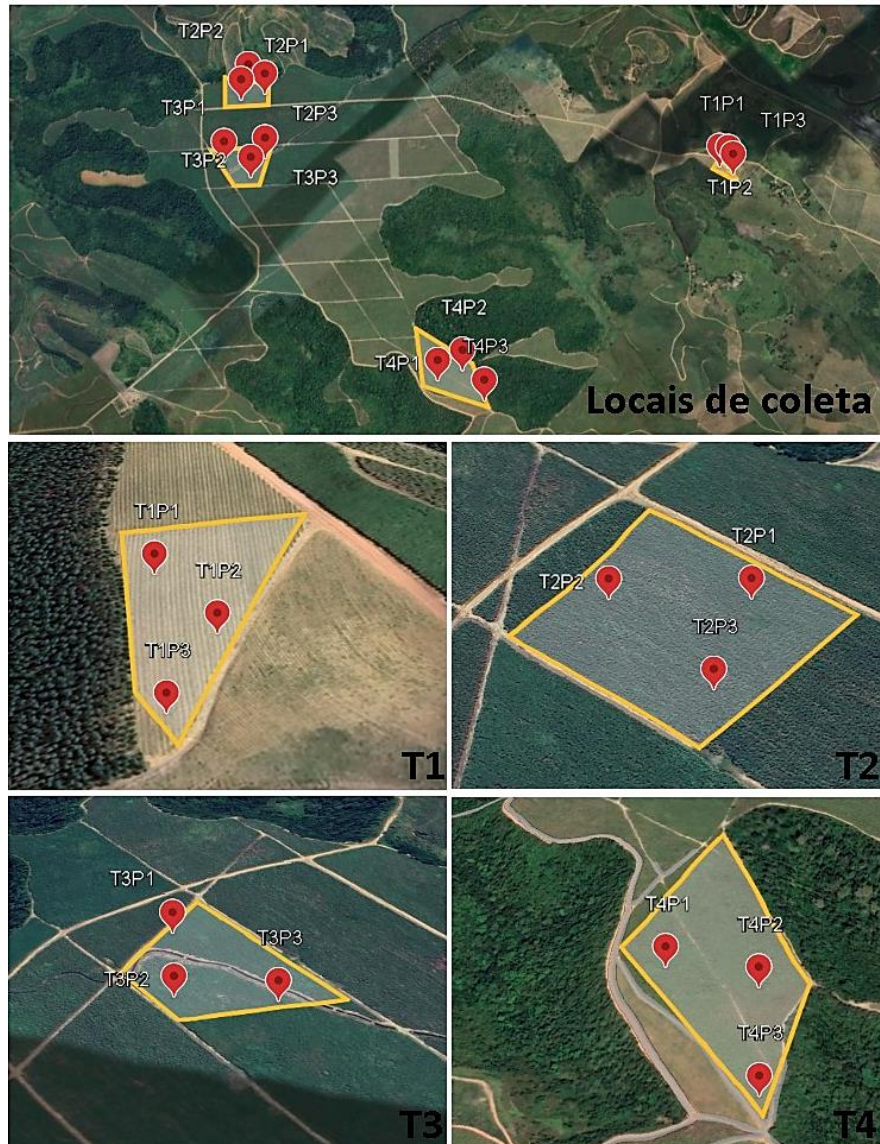
Tratamento	Manejo	PONTO (Repetições)		LOCALIZAÇÃO
		P1	P2	
T1	Sem aplicação de vinhaça; cana queimada; sem irrigação.	P1		07°56'38,1" de latitude Sul e 35°12'18,0" de longitude Oeste
		P2		07°56'37,9" de latitude Sul e 35°12'18,5" de longitude Oeste
		P3		07°56'37,5" de latitude Sul e 35°12'19,0" de longitude Oeste
T2	Com aplicação de vinhaça; colheita mecanizada; sem irrigação.	P1		07°55'38,4" de latitude Sul e 35°13'11,5" de longitude Oeste
		P2		07°55'38,4" de latitude Sul e 35°13'10,8" de longitude Oeste
		P3		07°55'38,2" de latitude Sul e 35°13'10,2" de longitude Oeste
T3	Com aplicação de vinhaça; colheita mecanizada; com irrigação.	P1		07°55'41,8" de latitude Sul e 35°13'19,0" de longitude Oeste
		P2		07°55'42,2" de latitude Sul e 35°13'19,1" de longitude Oeste
		P3		07°55'42,8" de latitude Sul e 35°13'19,0" de longitude Oeste
T4	Com aplicação de vinhaça; cana queimada; sem irrigação.	P1		07°56'28,2" de latitude Sul e 35°13'16,2" de longitude Oeste
		P2		07°56'27,9" de latitude Sul e 35°13'15,7" de longitude Oeste
		P3		07°56'27,7" de latitude Sul e 35°13'15,4" de longitude Oeste

Fonte: Os autores (2023).

Em cada unidade experimental foram abertas 3 (três) trincheiras com dimensões de 0,60m de largura, 0,80m de comprimento e 0,60m de profundidade. Foram coletadas amostras nas camadas de 0-20, 20-40 e 40-60 cm

de profundidade. Todas as coletas das amostras de solo obedeceram aos critérios do manual de descrição e coleta de amostras de solos da EMBRAPA (2011). A figura 2 mostra uma ampliação dos pontos de coleta de cada área.

Figura 2 - Localização das áreas coletadas



Fonte: Os autores (2023).

Para as coletas das análises químicas, foram utilizadas as amostras deformadas de solos, retirando-se de cada trincheira três amostras, sendo uma por camada. Logo, para cada unidade experimental, obteve-se 3 amostras por camada, totalizando 36 amostras no geral.

Após coletar as amostras de solo para as análises químicas, as amostras foram secadas ao ar, homogeneizadas e tamisadas em peneira com 2 mm de abertura de malha para obtenção da Terra Fina Seca ao Ar (TFSA). Posteriormente, elas foram colocadas em depósitos plásticos identificados e armazenadas até análise.

As análises químicas e físicas foram realizadas no Laboratório de Solos da Estação

Experimental de Cana-de-açúcar de Carpina, da Universidade Federal Rural de Pernambuco (EECAC - UFRPE), exceto a análise de N, que foi realizada no Laboratório de Química Ambiental do DEPA – UFRPE. Os seguintes atributos químicos foram determinados na TFSA: pH em H₂O, Carbono Orgânico (CO), Cálcio (Ca²⁺), Magnésio (Mg²⁺), Potássio (K⁺), Sódio (Na⁺), acidez potencial (H⁺ + Al³⁺), Hidrogênio (H⁺), Nitrogênio (N), matéria orgânica (M.O.), Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e Soma de bases (SB). As referências utilizadas na análise desses atributos estão presentes no quadro 2.

Quadro 2 - Atributos químicos analisados

Atributos	Métodos	Referências
pH em H ₂ O	Peagâmetro	
Fósforo	Solução extratora de Mehlich 1 (Ácido Clorídrico 0,05 M + ácido sulfúrico 0,0125 M) por Espectrofotometria	
Cálcio (Ca ²⁺), Magnésio (Mg ²⁺) e Alumínio (Al ³⁺)	Extração com solução de cloreto de potássio (KCl) 1 mol.L ⁻¹ , e determinados por espectrofotometria de absorção atômica.	
Potássio (K ⁺) e Sódio (Na ⁺)	Fotometria de chama, extrator do solo a solução Mehlich 1	
acidez potencial (H ⁺ +Al ³⁺)	Extração com solução de acetato de cálcio Ca(C ₂ H ₃ O ₂) ₂ com indicador fenolftaleína, seguido de titulação com solução de Hidróxido de Sódio 0,025 mol.L ⁻¹	EMBRAPA (2011)
CTC (T) a pH 7,0	$T = SB + H^+ + Al^{3+}$	
Percentagem de saturação por bases (V%)	$V(\%) = SB \times 100 / T$	
Saturação por alumínio	$m(\%) = Al^{3+} \times 100 / t$	
Hidrogênio (H ⁺)	Subtração do Alumínio (Al ³⁺) da quantidade de acidez potencial (H ⁺ + Al ³⁺)	
Somas de base SB	$SB = Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + Na^+$	
CTC efetiva (t)	$t = SB + Al^{3+}$	Lopes e Guilherme (2004).
Nitrogênio (N)	A amostra foi triturada em almofariz e passada em peneira de 60 mesh (0,250 mm), dosado por destilação da amônia, em destilador Kjeldahl, após digestão sulfúrica.	Mendonça e Matos (2005).

Fonte: Os autores (2023).

Foram feitas as seguintes análises físicas: granulometria, densidade da partícula e porosidade total.

Para a determinação da densidade do solo utilizou-se o método do anel volumétrico com o amostrador tipo Uhland. Foram coletadas 3 amostras de cada camada, 0-20, 20-40 e 40-60 cm de profundidade do solo, em 12 pontos, perfazendo um total de 108 amostras de solo. As dimensões do anel volumétrico foram de 5 cm de diâmetro e 5 cm de altura, e as estruturas do solo foram mantidas não deformadas. Após a retirada do anel do amostrador, foi efetuado a toilette, segundo EMBRAPA (2011). Os cálculos foram realizados através da razão da massa do solo seco em estufa pelo volume total do solo.

A análise de granulometria do solo foi realizada através do método do densímetro (EMBRAPA, 1997 modificado por Almeida, 2008). Para tanto foram pesados 20g de solo TFSA e colocados em garrafas pet de 500 ml, adicionando-se 100 ml de água e 25 ml do dispersante, hidróxido de sódio. As mesmas foram colocadas em agitador tipo Wagner, por 16 horas. Após agitação, o conteúdo foi lavado com água e passado através de peneira com malha de 0,053 mm, colocada sobre um funil apoiado em

um suporte. A suspensão foi coletada em proveta de 1.000 ml, cujo conteúdo foi completado até aproximadamente 840 ml, agitando-se com um bastão o líquido contido na proveta por 20s, sendo depois mantido em repouso por 24 horas. Posteriormente, realizou-se a leitura com o densímetro. A areia retida na peneira foi lavada e colocada em estufa a 65°C até peso constante e o silte foi determinado por diferença. As classes dos solos foram obtidas pelo triângulo textural do United States Department of Agriculture (USDA).

Para a determinação da densidade de partículas, foram pesadas 20g de solo seco em estufa a 105° C, empregando-se o método do balão volumétrico. Nessa análise utilizou-se 50 ml de álcool etílico, e em seguida subtraiu-se o volume de álcool gasto para preencher o espaço poroso do solo. A densidade de partícula foi determinada pela razão entre a massa do solo seco em estufa e o volume de sólidos.

A porosidade total foi determinada a partir da razão percentual dos valores encontrados na densidade do solo e na densidade de partícula.

O experimento foi realizado através de um Delineamento Inteiramente Casualizado, com esquema fatorial, em três repetições, a fim de se

analisar a interação entre os fatores tratamentos x profundidades. Para tanto, foram utilizados quatro tratamentos (T1, T2, T3 e T4),

conforme quadro 3, em três profundidades (0 – 20 cm, 20 – 40 cm e 40 – 60 cm).

Quadro 3 - Identificação dos tratamentos e dos manejos

Tratamentos	Manejo
<i>T1</i>	Sem aplicação de vinhaça; cana queimada; sem irrigação.
<i>T2</i>	Com aplicação de vinhaça; colheita mecanizada; sem irrigação.
<i>T3</i>	Com aplicação de vinhaça; colheita mecanizada; com irrigação.
<i>T4</i>	Com aplicação de vinhaça; cana queimada; sem irrigação

Fonte: Os autores (2023).

Os dados obtidos foram submetidos à ANOVA e comparados pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$ e $p \leq 0,01$) a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente, utilizando-se o programa estatístico ASSISTAT 7.7 beta.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Análise física do solo

Em experimentos fatoriais pode-se, por meio dos efeitos das interações, verificar se um fator é independente ou dependente do(s) outro(s). Se uma interação for não significativa evidencia que os fatores são independentes, ou seja, o

comportamento de um fator independe da variação (ausência ou presença) de outro fator.

Nesse caso as conclusões em separado para os fatores são válidas. No entanto, se uma interação for significativa indica que a resposta de um fator depende da presença ou ausência do outro. Nestes casos, uma das alternativas é estudar o comportamento de um fator dentro de cada nível de outro fator (Storck *et al.*, 2006).

Para esse estudo, observou-se através da análise de variância que não houve interação significativa entre os fatores tratamentos X profundidades para nenhuma das variáveis analisadas.

Logo, os fatores foram analisados independentes entre si, conforme descrito no quadro 4.

Quadro 4 – Resultado da análise de variância

Análise estatística	Atributos físicos
Significativo para tratamento e profundidade (com interação)	-
Significativo para tratamento e profundidade (sem interação)	-
Significativo apenas para profundidade	-
Significativo apenas para tratamento	DS, PT
Não significativo para nenhum dos fatores	DP

Fonte: Os autores (2023).

Para todos os fatores analisados em relação a densidade de partícula, verificou-se que os resultados foram não significativos, enquanto que para a densidade do solo e porosidade total, a interação apresentou-se significativa apenas para o fator tratamento.

Portanto, pode-se concluir que a densidade de partícula não foi influenciada pelos tipos de tratamentos realizados e nem pelas

profundidades estudadas. Os valores encontrados para a densidade do solo e porosidade total apresentaram significância dependendo do tipo de tratamento realizado.

Análises físicas, relativo à profundidade

Os resultados, relativos à profundidade, estão descritos na tabela 1.

Tabela 1 – Análise independente da profundidade

	Profundidade		
	0 - 20 cm	20 - 40 cm	40 - 60 cm
DS	1,70583a	1,69139a	1,71472a
DP	2,55263a	2,54906a	2,53343a
PT	33,17583a	33,60528a	32,26181a

Fonte: Os autores (2023).

Analisando a densidade do solo, densidade da partícula e porosidade total em relação à profundidade, observa-se que esses fatores não foram influenciados. Já Reinert e Reichert (2006) afirmam que a densidade do solo tende a aumentar com o aumento da profundidade no perfil.

Análise física, relativo aos tratamentos

A tabela 2 apresenta os resultados da influência dos tratamentos em relação aos aspectos físicos analisados.

Tabela 2 – Análise independente do tratamento

	Tratamentos			
	T1	T2	T3	T4
DS	1,58815c	1,75482b	1,88222a	1,59074c
DP	2,55060a	2,53070a	2,57706a	2,52181a
PT	37,68871a	30,57092b	26,90074b	36,89685a

Fonte: Os autores (2023).

Em relação a *densidade* do solo é possível observar que os solos manejados com colheita mecanizada apresentaram valores maiores para densidade do solo. Collares *et al.* (2011), também encontrou resultados semelhantes onde mostraram que o elevado tráfego de máquinas tende a aumentar a densidade e reduzir a porosidade do solo, favorecendo a sua degradação.

Ainda é possível observar que a aplicação da vinhaça não influenciou na densidade do solo. Porém, para Barros *et al.* (2010), a adição de resíduos orgânicos pela aplicação da vinhaça pode resultar em aumento de matéria orgânica no solo. Já Miranda *et al.* (2012) relata que a umidade, porosidade e densidade do solo são sensíveis à adição de vinhaça, promovendo reduções na densidade do solo e incrementos na umidade e porosidade.

Para a densidade de partícula, percebeu-se que os tratamentos estudados não apresentaram diferença. De acordo Nascimento *et al.* (2017), a fertirrigação por um maior

período apresentam maior densidade das partículas e condutividade hidráulica, porém, não influenciam na densidade do solo e na porosidade total.

Com relação a porosidade total, observou-se que a fertirrigação não influenciou, conforme Nascimento *et al.* (2017), entretanto, foi possível observar que os solos manejados com colheita mecanizada, apresentaram uma diminuição da porosidade total do solo. Grego (2010), afirma que a intensificação no maior grau de mecanização nas diversas fases do processo de produção da cana-de-açúcar tem um forte impacto sobre o solo, o que diminui sua porosidade e permeabilidade.

Análise granulométrica e classificação textural

Para a classificação das classes texturais foi tirada uma média das repetições de cada camada e classificada de acordo com o triângulo de Ferret (Tabela 3).

Tabela 3 – Classe textural dos solos analisados por camada
Granulometria da TFSA

	Areia	Silte	Argila	Classe Textural	
%.....				
T1	0-20 cm	53,08	8,22	38,69	Argilo arenosa
	20-40 cm	42,25	5,05	52,69	Argilosa
	40-60 cm	30,38	4,26	65,35	Muito argilosa
T2	0-20 cm	64,48	8,82	26,69	Argilo arenosa
	20-40 cm	57,1	3,56	39,33	Argilo arenosa
	40-60 cm	46,5	1,49	52	Argilosa
T3	0-20 cm	67,75	7,58	24,66	Argilo arenosa
	20-40 cm	60,82	5,87	33,3	Argilo arenosa
	40-60 cm	44,45	0,23	55,3	Argilosa
T4	0-20 cm	46,44	11,56	42	Argilo arenosa
	20-40 cm	35,14	6,21	58,64	Argilosa
	40-60 cm	25,54	1,79	72,66	Muito Argilosa

Fonte: Os autores (2023).

A classe argilo arenosa foi observada na camada de 0-20 cm em todos os solos estudados. Para a camada de 20-40 cm, foi possível observar que os tratamentos com cana queimada apresentaram uma textura argilosa, enquanto que os solos com manejo da colheita mecanizada apresentaram uma textura argilo arenosa. Em relação a camada de 40-60 cm todos os tratamentos apresentaram uma textura classificada entre argilosa e muito argilosa.

De acordo com a EMBRAPA (2013), este aumento no percentual de argila condiz com a

classe dos Argissolos, caracterizados pela presença de horizonte B textural, onde ocorre um incremento de argila em profundidade.

Análise química do solo

Foi realizada a análise de variância para verificar se os tratamentos influenciam na profundidade. O resultado é apresentado no quadro 5.

Quadro 5 – Resultado da análise de variância

Análise estatística	Atributos químicos
Significativo para tratamento e profundidade (com interação)	Ca ⁺² , Mg ⁺² , V (%), (H ⁺ +Al ³⁺), m (%)
Significativo para tratamento e profundidade (sem interação)	pH, K ⁺ , N, P, SB, CTC
Significativo apenas para profundidade	-
Significativo apenas para tratamento	-
Não significativo para nenhum dos fatores	-

Fonte: Os autores (2023).

A análise de variância indicou que a interação entre tratamentos x profundidades foi significativa para Ca⁺², Mg⁺², V (%), (H⁺ + Al³⁺) e m (%).

Os atributos pH, K⁺, N, P, SB e CTC não apresentaram interação significativa entre tratamentos x profundidades, logo os fatores tratamentos e profundidades foram analisados independentemente.

Análise dos elementos químicos do solo que tiveram interação significativa entre tratamentos x profundidades

Para a análise dos resultados presentes na tabela 4, as relações entre o mesmo tratamento para as diferentes profundidades são verificadas nas linhas da tabela através das letras maiúsculas. Para a análise da interação entre os diferentes tratamentos na mesma profundidade verificam-se as colunas da tabela através das letras minúscula.

Tabela 4 - Análise dos elementos químicos do solo que tiveram interação significativa entre tratamentos x profundidades.

Profundidade	Tratamento	Ca ²⁺	Mg ²⁺	V (%)	(H ⁺ +Al ³⁺)	m(%)	Al ³⁺	H ⁺
0 - 20 cm	T1	1,8333dA	0,3333cA	47,4088bA	2,7667aA	10,8682aB	0,3000bA	2,4667aA
	T2	3,3667aA	1,0000aA	80,1502aA	1,2000bB	0,0000bB	0,0000aB	1,2000bB
	T3	2,6667bA	0,8333bA	80,7180aA	1,0000bB	0,0000bB	0,0000aB	1,0000bB
	T4	2,2667cA	0,4000cA	54,6346bA	2,8667aA	8,3176abA	0,3000aA	2,5667aA
20 - 40 cm	T1	0,3333cB	0,3000aA	18,8289bB	3,2333aA	66,2234aA	1,4667aA	1,7667aB
	T2	1,9000abB	0,3333aB	53,8280aB	2,2000bA	5,1571bB	0,1333bB	2,0667aA
	T3	1,5667bB	0,3333aB	57,8104aB	1,9333bA	8,5908bA	0,2333baA	1,7000aA
	T4	2,1000aA	0,3333aA	57,1899aA	2,2667bB	12,9174bA	0,4333bA	1,8333aB
40 - 60 cm	T1	0,3333cB	0,3000aA	18,1992cB	3,1333aA	68,4890aA	1,5000aA	1,6333abB
	T2	0,9000bC	0,3000aB	36,3197bC	2,5667abA	37,3688bA	0,8000bA	1,7667aA
	T3	1,3000aB	0,3333aB	58,8662aB	1,5667cAB	16,9467cA	0,4333cA	1,1333bB
	T4	1,3667aB	0,3000aA	51,9883aA	2,0333bcB	8,6383cA	0,2000cA	1,8333aB

Fonte: Os autores (2023).

Os resultados apresentados mostraram que a profundidade de 0 – 20 cm, apresentou os maiores valores médios de Ca²⁺ e Mg²⁺ para todos os tratamentos. Silva *et al.* (2006) verificou conteúdos decrescentes de Ca²⁺ e Mg²⁺, com a profundidade em Latossolo Amarelo no estado do Pará. Verifica-se na tabela 4, que os maiores valores de cálcio se encontram nas camadas superficiais do solo, concordando com os resultados de Araújo *et al.* (2004) que observaram em sistemas agroflorestais, valores mais elevados de pH e Ca²⁺, na superfície do solo.

Os resultados encontrados de V (%) na tabela 4 estão de acordo com os encontrados por Ronquim (2010) que verificou uma baixa percentagem de saturação por bases V (%) e uma alta saturação por alumínio m (%) em solos ácidos.

Diante dos resultados apresentados verificou-se que as unidades experimentais tratadas com vinhaça apresentaram os melhores resultados em relação a unidade experimental sem aplicação de vinhaça, para Ca²⁺, Mg²⁺ e V (%) em todas as profundidades.

Os teores de Ca²⁺ e Mg²⁺ diminuíram com o aumento da profundidade, porém, os tratamentos com aplicação de vinhaça proporcionaram um aumento dos valores de Ca²⁺ e Mg²⁺, quando comparados com o

tratamento que não houve aplicação de vinhaça. Esse resultado concorda com Santos *et al.* (2012) que estudando a adição de vinhaça ao solo, por 30 anos, verificaram uma elevação do conteúdo de cálcio, magnésio e zinco em profundidade, quando compararam com áreas sem aplicação de vinhaça.

Para os valores encontrado de (H⁺+Al³⁺) e m (%), observou-se que os tratamentos com cana queimada, apresentaram valores mais elevados quando comparados com os tratamentos com cana crua. Esses resultados também foram obtidos por Souza *et al.* (2012), os quais observaram em Latossolo Vermelho do estado de São Paulo, valores menores de acidez potencial (H⁺+Al³⁺), Al³⁺ e saturação por alumínio m (%) em áreas sob cultivo sem queima da cana em comparação com a cana queimada.

Análise dos elementos químicos do solo que não tiveram interação significativa entre tratamentos x profundidades

Os atributos pH, K⁺, N, P, SB e CTC não apresentaram interação significativa entre tratamentos x profundidades, logo os fatores tratamentos e profundidades foram analisados independentemente.

A tabela 5 apresenta o comportamento desses atributos ao longo da profundidade.

Tabela 5 - Análise dos elementos químicos do solo que não tiveram interação significativa entre tratamentos x profundidades.

	Profundidade		
	0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm
pH	5,6000a	4,78333b	4,27500b
K	0,48803a	0,37543b	0,28587c
N	0,08177a	0,06290b	0,04313c
SB	3,75217a	2,23956b	1,75722b
CTC	3,90217a	2,80623b	2,49055b
P	5,33333a	3,41667a	1,16667b

Fonte: Os autores (2023).

Em relação às profundidades (tabela 5), verificou-se que o pH diminuiu com o aumento da profundidade. Esse resultado concorda com Malavolta (1980) o qual afirma que a acidez geralmente aumenta com a profundidade do solo. Os resultados para os teores de SB corroboram com os de Silva *et al.* (2006), os quais observaram que a SB diminuiu com o aumento da profundidade, quando estudaram os efeitos de diferentes usos da terra sobre as características químicas de um Latossolo Amarelo do Estado do Pará. Os estudos de Silva *et al.* (2006) e Araújo *et al.* (2004) também encontraram uma diminuição da CTC com o aumento da profundidade.

Em relação ao potássio, os resultados estão de acordo com Brito *et al.* (2009), que estudando o comportamento da vinhaça em diferentes solos, verificaram que o aumento do teor de K⁺ no solo variou em profundidade.

Para o P, observou-se um decaimento nos valores médios com o aumento da profundidade. Esse fato também foi observado por Giacomini *et al.* (2003), os quais afirmam que se deve ao fato de que, a liberação do fósforo ocorre em maiores quantidades nas primeiras camadas do solo, devido ao acúmulo de resíduos vegetais de cultivos anteriores, proporcionado pelo plantio direto, o que vai depender da quantidade de nutrientes acumulados pelas plantas de cobertura. De acordo com Berwanger (2006) a movimentação vertical do P no perfil do solo é condicionada pelo tipo de solo, sendo que dependendo da textura e mineralogia, pode haver maior interação entre o solo e o nutriente, resultando em elevada adsorção do P.

A tabela 6 apresenta os resultados da influência dos tratamentos em relação aos aspectos químicos analisados.

Tabela 6 - Análise dos elementos químicos do solo que não tiveram interação significativa entre tratamentos x profundidades.

	Tratamento			
	T1	T2	T3	T4
pH	4,08889b	5,07778a	5,51111a	4,86667a
K	0,14498c	0,26410b	0,60057a	0,52279a
N	0,05324b	0,06160b	0,05751b	0,07804a
S.B	1,41692b	2,97811a	3,03632a	2,90057a
CTC	2,50581b	3,28922a	3,25854a	3,21168ab
P	1,44444b	5,66667a	3,55556ab	2,55556b

Fonte: Os autores (2023).

Observou-se que os solos com manejo de vinhaça apresentaram um pH mais elevado em relação ao solo sem manejo de vinhaça. A análise química da vinhaça de acordo com Marques (2006) resultou num caráter ácido. A princípio esperava-se que a adição de vinhaça ao solo acarretasse uma diminuição no valor do pH do solo. Segundo Magalhães (2010), a elevação do

pH ocorre pela ação de microrganismos, causado pela proliferação de fungos na área onde a vinhaça foi aplicada e com isso o solo vai neutralizando; logo quando a vinhaça é aplicada, a acidez aumenta, depois que ocorre a redução, aumentando as bactérias. No entanto os valores da vinhaça aplicada ao solo, para esse experimento, apresentaram um caráter

levemente ácido, o qual provavelmente auxiliou na elevação do pH dos solos manejados com vinhaça.

Em relação a SB constatou-se que os solos com manejo de vinhaça apresentaram maior índice de fertilidade, que segundo Lobo e Silva (2008) a soma de bases é indicadora da fertilidade do solo, assim, quanto maior for o valor obtido para este parâmetro, maior será a fertilidade do solo.

Observou-se que os tratamentos com aplicação de vinhaça proporcionaram melhor CTC_{efetiva} em relação ao solo sem manejo de vinhaça. Segundo Glória e Orlando Filho (1983), a elevação da CTC pode ser justificada pelo grande aporte de matéria orgânica representada pelas adições da vinhaça e torta de filtro. Pela característica coloidal da matéria orgânica contida na vinhaça, sua adição confere ao solo maior quantidade de cargas negativas, diminuindo o potencial de lixiviação de cátions.

Os resultados mostraram um teor de K⁺ maior nos solos onde houve aplicação de vinhaça. Esse resultado concorda com Glória e Orlando Filho (1983).

Quanto ao P foi observado aumento significativo nos tratamentos sem queima (tabela 6). Os estudos de Canellas *et al.* (2003) também observaram aumento no conteúdo de P disponível em um Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar sem queima.

CONCLUSÕES

A fertirrigação não influenciou na densidade do solo, densidade de partícula e porosidade total. Ainda em relação aos atributos físicos do solo, a colheita mecanizada influenciou no aumento da densidade do solo e porosidade total.

Em relação aos atributos químicos do solo conclui-se que os tratamentos manejados com vinhaça influenciaram no aumento do pH do solo, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, SB e CTC_{efetiva}, enquanto que o sem aplicação de vinhaça, apresentou pH mais ácido e elevados teores de saturação por alumínio.

Com o aumento da profundidade houve um aumento nos teores de K⁺ e uma diminuição do pH e do P, independente do manejo e do tratamento.

Conclui-se que as unidades experimentais tratadas com vinhaça tiveram um aumento na disponibilidade de nutrientes. Portanto, a adição de vinhaça pode ser uma estratégia importante na manutenção e aumento da fertilidade do solo a longo prazo em lavouras de cana-de-açúcar.

AGRADECIMENTOS

A Usina Petribú S/A por ter cedido a área para realização do estudo. Ao empenho da equipe de colaboradores através da parceria entre a EMBRAPA, UFPE e UFRPE.

FINANCIAMENTO

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, B. G. **Métodos alternativos de determinação de parâmetros físicos do solo e uso de condicionadores químicos no estudo da qualidade do solo**. 2008. 105 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de São Paulo, São Paulo: ESALQ/USP, SP. 2008. <https://doi.org/10.11606/T.11.2008.tde-18112008-100808>.
- ARAÚJO, E. A.; LANI, J. L.; AMARAL, E. F.; GUERRA, A. Uso da terra e propriedades físicas e químicas de Argissolo Amarelo distrófico na Amazônia Ocidental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 2, 2004. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000200009>.
- BARROS, J. D. S.; CHAVES, L. H. G.; CHAVES, I. B.; FARIAS, C. H. A.; PEREIRA, W. E. Estoque de carbono e nitrogênio em sistemas de manejo do solo, nos Tabuleiros Costeiros paraibanos. **Revista Caatinga**, v. 26, n. 1, p. 35-42, 2013. <https://doi.org/10.1007/s35114-013-0318-0>.
- BARROS, R. P.; ALMEIDA, P. R. V.; SILVA, T. L.; SOUZA, R. M. L. B.; VIÉGAS, R. A.; MELO, A. S. Alterações em atributos químicos de solo cultivado com cana-de-açúcar e adição de vinhaça. **Revista Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 40, n. 3, p. 341-346, 2010.
- BERTOL, I.; VASQUEZ, E. V.; GONZÁLEZ, A. P.; COGO, N. P.; LUCIANO, R. V.; FABIAN, E. L. Sedimentos transportados pela enxurrada em eventos de erosão hídrica em um Nitossolo Háplico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 245-252, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000100025>.

- BERWANGER, A. L. Alterações e transferências de fósforo do solo para o meio aquático com o uso de dejetos líquidos de suínos. 2006. 102f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria - RS, 2006.
- BRITO, F. L.; ROLIM, M. M.; PEDROSA, E. M. R. Efeito da aplicação de vinhaça nas características químicas de solo da Zona da Mata de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência Agrárias**, Recife, v. 4, n. 4, p. 456-462, 2009. <https://doi.org/10.5039/agraria.v4i4a14>.
- CANELLAS, L. P.; VELLOSO, A. C. X.; MARCIANO, C. R.; RAMALHO, J. F. G. P.; RUMJANEK, V. M.; REZENDE, C. E.; SANTOS, G. A. Propriedades químicas de um Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar, com preservação do palhico e adição de vinhaça por longo tempo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 5, p. 935-944, 2003. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000500018>.
- COLLARES, G. L.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Compactação superficial de Latossolos sob integração lavoura – pecuária de leite no noroeste do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v. 41, n. 2, p. 246-250, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782011000200011>.
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro, 2011.
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2013. 353p.
- GIACOMINI, S. J.; AITA, C.; HÜBNER, A. P.; LUNKES, A.; GUIDINI, E. Liberação de fósforo e potássio durante a decomposição de resíduos culturais em plantio direto, **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, p. 1097-1104, 2003. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2003000900011>.
- GLÓRIA, N. A.; ORLANDO FILHO, J. **Aplicação de vinhaça como fertilizante**. SÃO Paulo: COPERSUCAR, 1983. p.5-38. (Boletim Técnico do Planalsucar, 5).
- GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R.; XAVIER, M. A. Spatial variability of some biometric attributes of sugarcane plants (variety IACSP93-3046) and its relation to physical and chemical soil attributes. **Bragantia**, Campinas, v. 69, suppl., p. 107-119, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052010000500012>.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Mapas cartográficos: IBGE, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/download-s-geociencias.html>.
- LANZANOVA, M. E.; NICOLOSO, R. S.; LOVATP, T.; ELTZ, F. L. I.; AMADO, T. J. C.; REINERT, D. J. Atributos físicos em sistema de integração lavoura-pecuária sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 5, p. 1131-1140, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000500028>.
- LOBO, M. F. G.; SILVA, M. R. A. **Estudo da adubação verde em solo de áreas em recuperação**. ENCONTRO LATINO AMERICANO DE PÓS-GRADUAÇÃO, IX, Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, SP. 2008.
- LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. **Interpretação de análise de solo: conceitos e aplicações**. ANDA - Associação Nacional para Difusão de Adubos, n. 2, p. 50, 2004.
- MAGALHÃES, V. R. **Influência de doses de vinhaça nas características agrônômicas de variedade de cana de açúcar canaplanta e atributos químicos do solo**. 2010. 89f. Dissertação (Mestrado Produção Vegetal) – Universidade Estadual de Montes Claros – Unimontes, Janaúba, 2010.
- MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980.
- MARQUES, M. O. **Aspectos técnicos e legais da produção, transporte e aplicação de vinhaça**. In: SEGATO, S. V.; PINTO, A. S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J. C. M. Atualização em produção de cana-de-açúcar. Piracicaba: Editorial 2006. p.369-375.
- MENDONÇA, E. S.; MATOS, E. S. **Matéria orgânica do solo; métodos de análises**. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 2005, 107 p.
- MIRANDA, T. L.; PEDROSA, E. M. R.; SILVA, E. F. F.; ROLIM, M. M. Alterações físicas e biológicas em solo cultivado com cana-de-açúcar após colheita e aplicação de vinhaça. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 7, n. 1, p. 150-158, 2012. <https://doi.org/10.5039/agraria.v7i1a897>.
- NASCIMENTO Jr, L. F.; SILVA, P. C.; BARBOSA, K. P.; CAVALCANTE, T. J.; RODRIGUES, A. A.; VITAL, R. G. Propriedades físicas do solo cultivado com cana-de-açúcar sob aplicação de vinhaça. **Revista Espacios**, v. 38, n. 39, p. 22, 2017.

- REINERT, D. J. e REICHERT, J. M. **Propriedades física do solo**. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.
- RONQUIM, C. C. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as Regiões tropicais**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento. Embrapa Monitoramento Por Satélite, Campinas: 26 p. 2010.
- SALES, L.E. de O.; CARNEIRO, M.A.C.; SEVERIANO, E. da C.; OLIVEIRA, G.C. de; FERREIRA, M.M. Qualidade física de Neossolo Quartzarênico submetido a diferentes sistemas de uso agrícola. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 34, p. 667-674, 2010. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542010000300020>.
- SANTOS, A. L. da S.; PEREIRA, E. C. G.; ANDRADE, L. de H. C. A expansão da cana-de-açúcar no espaço alagoano e suas consequências sobre o meio ambiente e a identidade cultural. **CAMPO-TERRITÓRIO: revista de geografia agrária**, v. 2, n. 4, p. 19-37, 2007. <https://doi.org/10.14393/RCT2411824>.
- SANTOS, I. A.; SILVA, M. B.; SOUZA, M. A. S.; **Alterações nos atributos químicos do solo por aplicação de vinhaça na cultura da cana-de-açúcar**. Rio Verde – 2012. Disponível em: <https://www.unirv.edu.br/conteudos/fckfiles/files/ALTERACOES%20NOS%20ATRIBUTOS%20QUIMICOS%20DO%20SOLO%20POR%20APLICACAO%20DE%20VINHACA%20NA%20CULTURA%20DA%20CANA%20DE%20ACUCAR.pdf>. Acesso em: 25 maio 2023.
- SILVA, G. R.; SILVA Jr., M. L.; MELO, V. S. Efeitos de diferentes usos da terra sobre as características químicas de um latossolo amarelo do estado do Pará. **Acta Amaz** 2006, v. 36, n. 2, p. 151, 2006. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672006000200004>.
- SILVA, G. S. O destino do bagaço da cana-de-açúcar: um estudo a partir das agroindústrias sucroalcooleiras do Paraná. **Revista em agronegócios e meio ambiente**, v. 3, n. 1, p. 59-76, 2010. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0310.1987.tb00265.x>.
- SILVA, M. S. C. **Indicadores de qualidade do solo em sistemas agroflorestais, em Paraty, RJ**. 2006. 54 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <https://tede.ufrrj.br/jspui/handle/tede/254>. Acesso em 26 maio 2023.
- SOUZA, G. S.; SOUZA, Z. M.; SILVA, R. B.; ARAÚJO, F. S.; BARBOSA, R. S. Compressibilidade do solo e sistema radicular da cana-de-açúcar em manejo com e sem controle de tráfego. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 4, p. 603-612, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2012000400017>.
- STORCK, L.; GARCIA, D. C.; LOPES, S. J.; STEFANEL, V. **Experimentação vegetal 2**. ed. Santa Maria: UFSM, 2006. 198 p.

CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Valquíria do Nascimento Tavares concebeu o estudo. Redigiu o texto, participou da coleta e preparação das amostras, realizou análises físicas e químicas em laboratório e analisou os dados. Inaldo Jerfson Sobreira da Silva foi responsável pelo uso do software de análise estatística, interpretação dos dados estatísticos e participou da coleta das amostras. Fernando Cartaxo Rolim Neto foi responsável pela metodologia de análise química e física do solo e participou da coleta das amostras. Roberto da Boa Viagem Parahyba foi responsável pela metodologia de coleta de solos e participou da coleta das amostras. Rômulo Simões Cezar Menezes foi responsável pela revisão da interpretação dos resultados e organização estrutural do artigo. Marcus Metri Correa foi o co-orientador do projeto. Orientou e revisou a escrita do artigo e realizou a revisão de literatura. Maria do Socorro Bezerra de Araújo foi a orientadora do projeto. Foi responsável pela escolha da área de estudo, problemática de pesquisa e tratamentos realizados.



Este é um artigo de acesso aberto distribuído nos termos da Licença de Atribuição Creative Commons, que permite o uso irrestrito, distribuição e reprodução em qualquer meio, desde que o trabalho original seja devidamente citado.