



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE FILOSOFIA E CIÊNCIAS HUMANAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO E MEIO
AMBIENTE

ELISE EUGÊNIA DA CRUZ DIAS

EFEITO DA VINHAÇA NA QUALIDADE AMBIENTAL E NA LABILIDADE DE
FÓSFORO EM SOLO CULTIVADO COM CANA DE AÇÚCAR

Recife

2022

ELISE EUGÊNIA DA CRUZ DIAS

**EFEITO DA VINHAÇA NA QUALIDADE AMBIENTAL E NA LABILIDADE DE
FÓSFORO EM SOLO CULTIVADO COM CANA DE AÇÚCAR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento e Meio Ambiente. **Área de Concentração:** Gestão e Políticas Ambientais.

Orientadora: Prof. Dr^a Maria do Socorro Bezerra de Araújo

Coorientador: Prof. Dr. Wagner Luís da Silva Souza

Recife

2022

Catálogo na fonte
Bibliotecária Valdícea Alves Silva, CRB4-1260

D541p Dias, Elise Eugênia da Cruz.
Efeito da vinhaça na qualidade ambiental e na labilidade de fósforo em solo cultivado com cana de açúcar / Elise Eugênia da Cruz Dias - 2022
83 f: Il.; 30 cm.

Orientadora: Prof. Dr^a. Maria do Socorro Bezerra de Araújo.
Coorientador: Prof. Dr. Wagner Luís da Silva Souza.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, CFCH.
Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Recife, 2022.
Inclui referências e apêndice.

1. Meio ambiente. 2. Labilidade de fósforo. 3. Lábeis – Semi - lábeis. 4. Contaminação - Poluição agrícola. 5. Destilação - caldo de cana de açúcar. 6. líquido residual – Caldo da cana I. Araújo, Maria do Socorro Bezerra de (Orientadora) II. Souza, Wagner Luís da Silva (Coorientador). III. Título.

363.7 CDD (22. ed.)

UFPE (BCFCH2020-126)

ELISE EUGÊNIA DA CRUZ DIAS

**EFEITO DA VINHAÇA NA QUALIDADE AMBIENTAL E NA LABILIDADE DE
FÓSFORO EM SOLO CULTIVADO COM CANA DE AÇÚCAR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento e Meio Ambiente. **Área de Concentração:** Gestão e Políticas Ambientais.

Aprovada em: 12/09/2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr^a. Maria do Socorro Bezerra de Araújo (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Dr. José Nildo Tabosa (Examinador Externo)
Instituto Agrônômico de Pernambuco

Dr^a. Valéria Sandra de Oliveira Costa (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Dr^a. Sara Fernandes Flor de Souza (Examinador Externo)
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Aos meus pais, Marconi Eugênio Dias e Érika Sobral da Cruz Dias, por todo amor, doação, sacrifício e investimento a mim destinados. A minha amada avó Maria da Conceição (em memória) que, de onde estiver, está cuidando e intercedendo por mim. Às minhas mais que tias: amigas e protetoras, Elmary Cruz e Fernanda Cruz. Ao meu avô materno, Fernando Cruz, pelo apoio incessante. Às minhas irmãs, Emanuele Dias e Ana Clara, pelo afeto e torcida. Ao meu esposo, Thawã Santos, pelo suporte imensurável.

Dedico

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por permitir este sonho possível e por concretizá-lo.

Aos órgãos de fomento FACEPE e CAPES, pela concessão da bolsa.

A Usina Trapiche, em nome do agrônomo Antônio Tabosa, que, com muita paciência, forneceu todas as informações solicitadas – e possíveis – e contribuiu com tudo o que esteve ao seu alcance.

A minha querida orientadora, professora Socorro Araújo, de quem sou grata pela vida, pelo acompanhamento, pelo carinho e ensino dedicados desde a minha graduação. Que me inseriu no mundo da pesquisa com tanto cuidado. Que me deu a oportunidade de ousar ter e realizar este sonho.

Ao meu coorientador, professor Wagner Souza, com quem tanto aprendi, e pude contar, não somente para a teoria, como também para a prática. Agradeço pelo empenho e dedicação com o ensino e pesquisa de qualidade. Professor Wagner é um exemplo de conduta e compromisso para o desenvolvimento científico do País.

Ao professor Nildo Tabosa, que muito contribuiu para a construção deste trabalho, desde a qualificação, até às análises dos solos por ele proporcionadas.

Ao Professor Brivaldo Almeida por ter aberto às portas do Laboratório de Física do Solo da UFRPE, para a realização das análises de densidade. Também o acolhimento e ajuda que recebi do técnico de laboratório de física do solo e amigo, Eudes Oliveira.

Ao professor Dário Primo, que me orientou em laboratório para a realização das análises, com muita didática, paciência e leveza.

A professora Manuella Vieira, que deu muitos direcionamentos e orientações na qualificação. Às professoras Valéria Sandra e Sara Fernandes pelas contribuições na defesa.

Aos professores do PRODEMA, pela formação eficiente.

A minha amada avó Maria da Conceição (em memória), que partiu para a glória e vida eterna antes do meu ingresso ao mestrado, mas que deixou todo o ensinamento e história de vida que serviu (e serve) de exemplo para que eu siga sempre firme.

Ao meu pai, Marconi Eugenio Dias, que, qualquer pessoa que passe pela minha vida, é testemunha de seu empenho comigo e com o meu trabalho. Agradeço pelos campos que fizemos, e por me manter firme para seguir este trabalho. A ele devo tudo o que construí.

A minha mãe, Érika Dias, a mulher mais forte desse mundo! Pelas inúmeras vezes que me sustentou. Que incontáveis vezes, teve a preocupação de sair de casa e me trazer refeições, enquanto estava redigindo este trabalho. A ela eu devo tudo o que consegui realizar.

Ao meu esposo, Thawã Santos, pela companhia de noites acordados, por prestar apoio, por não me deixar cair ou desistir nos momentos de fraqueza. Pela parceria, torcida e afeto que me mantiveram forte.

As minhas amadas tias e tio, Elmary Cruz, Fernanda Cruz e Alexandre Damasceno. Pelo apoio do dia a dia, pelo carinho, cuidado, atenção e amor que recebi ao longo dessa jornada. Inclusive ao tio Alexandre, que enfrentou conosco os trabalhos de campo.

Ao meu avô, Fernando Cruz, que se empolgou comigo a cada passo do trabalho, em cada descoberta, cada curiosidade, que manteve constante o fervor pelos resultados deste trabalho, e pelas muitas conversas que tivemos sobre este trabalho.

As minhas irmãs Emanuele Dias e Ana Clara, e ao amigo e cunhado Guylherme Melquíades, pelos momentos de descontração, tão necessários para a sanidade.

Ao grande amigo Valério Marcelo, pela amizade, pela ajuda e pelo apoio ilimitados que me deu por toda essa jornada.

Aos meus amigos da vida e do coração, Renata Alves e André Felipe, por toda a trajetória que construímos até aqui. Vocês são preciosos demais para mim!

A Viviane Gomes e Alane Aquino, pela parceria, amizade, alegria, força, e ajuda ao longo deste trabalho.

A família que o PRODEMA me deu, os companheiros de curso, amigos e parceiros dessa caminhada. A passagem pelo mestrado não seria a mesma sem vocês!

Aos amigos Gideoni Cristian, Dilcélia Souza e Maria Pricila por estarem sempre à postos para ajudar.

Aos que de forma direta ou indireta contribuíram na construção deste trabalho.

Agradeço!

“No fim, conservaremos apenas o que amamos.
Amaremos apenas o que compreendemos.
E compreenderemos apenas o que nos ensinaram”.

– Baba Dioum, Conservacionista Senegalês

(BRADY; WEIL, 2013, p. 1)

RESUMO

A produção nacional de açúcar e álcool gera resíduos ao longo do seu processo de fabricação, dentre os quais encontra-se a vinhaça, que se descartada de forma inadequada pode ocasionar sérios impactos ambientais. Trata-se de um resíduo proveniente da destilação fracionada do caldo de cana de açúcar fermentado para a obtenção do etanol. A vinhaça, foi por muito tempo lançada em corpos d'água como forma de descarte, causando sérios problemas de poluição. Essa prática de descarte no meio ambiente foi proibida por lei, e ela passou a ser utilizada como condicionador para melhoria do solo, agindo como complemento da fertilização de alguns nutrientes no solo. Existem relatos de que áreas com produção de cana de açúcar, recebendo aplicação de vinhaça, tem pouca necessidade de reposição de fertilização fosfatada. Nesse sentido, o objetivo com este trabalho é determinar o efeito da vinhaça na labilidade de fósforo em solo de área tradicionalmente cultivada com cana de açúcar. O estudo foi conduzido na Usina Trapiche, que se localiza no município de Sirinhaém, na Zona da Mata Sul do Estado de Pernambuco, Região Nordeste brasileira. Foram determinadas formas de fósforo: lábeis e moderadamente lábeis em áreas cultivadas com cana de açúcar, recebendo há mais de dez anos apenas vinhaça (T1), apenas fertilização fosfatada (T2) e vinhaça mais fertilização fosfatada (T3), que foram comparadas a uma área adjacente com mata nativa (T0) e mesmas características de relevo e solo. Os resultados obtidos indicaram que a aplicação de vinhaça proporcionou aportes de fósforo para a fração prontamente disponível do solo obtendo valores mais altos que o tratamento com fertilizante fosfatado. A área que recebe apenas o tratamento com vinhaça (T1) apresentou resultados, para os atributos de fertilidade do solo, similares aos do tratamento com fertilizante (T2), sugerindo que a vinhaça tem o potencial de ser usada como um condicionador para melhoria da fertilidade do solo e diminuir custos com fertilizantes fosfatados.

Palavras-Chave: fertilização fosfatada; formas lábeis de fósforo; poluição ambiental; produção de etanol; vinhaça.

ABSTRACT

The national sugar and alcohol production generates waste throughout the manufacturing process, including vinasse which, if improperly disposed of, can have serious environmental consequences. It is a byproduct of fractional distillation of fermented sugar cane juice to produce ethanol. Vinasse was once thrown into bodies of water as a form of disposal, causing severe pollution issues. This practice of the disposing vinasse in the environment was made illegal by law, and it began to be used as a conditioner for soil improvement, as a supplement to fertilizing some nutrients in the soil. According to reports, areas with sugarcane production that receive vinasse application have little need for phosphate fertilization replacement. In this regard, this study aims to determine the effect of vinasse on phosphorus lability in a soil of area traditionally cultivated with sugarcane. The study was conducted at Usina Trapiche, which is located in the city of Sirinhaém, in the southern forest zone of the state of Pernambuco, northeastern Brazil. The following phosphorus forms were determined: labile and moderately labile in sugar cane-cultivated areas that had only vinasse (T1), only phosphate fertilization (T2), and vinasse plus phosphate fertilization (T3) for more than ten years, and were compared to a nearby area with native forest (T0) and the same relief and soil characteristics. The results obtained indicated that the application of vinasse increased phosphorus contributions to the readily available fraction of the soil, yielding higher values than the phosphate fertilizer treatment. The area that received only the vinasse treatment (T1) had similar soil fertility attributes to the fertilizer treatment (T2), indicating that vinasse has the potential to be used as a conditioner to improve soil fertility and reduce phosphate fertilizer costs.

Keywords: phosphate fertilization; labile forms of phosphorus; environmental pollution; ethanol production; vinasse.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa das usinas sucroalcooleiras distribuídas pelo território brasileiro	21
Figura 2 - Fluxograma simplificado das biorrefinarias brasileiras de Cana de Açúcar para a produção de açúcar, etanol e eletricidade	22
Figura 3 - Produção mundial de etanol de combustível – Ano de 2021 (%).....	23
Figura 4 - Usinas Sucroalcooleiras distribuídas no Estado de Pernambuco – Nordeste Brasileiro	25
Figura 5 - Fluxograma das formas de Fósforo no sistema Solo-Planta.....	35
Figura 6 - Localização da Área de Estudo - Usina Trapiche, Sirinhaém-PE	37
Figura 7 - Classes de Solos do Município de Sirinhaém-PE.....	38
Figura 8 - Caracterização Física do Município de Sirinhaém - PE: Ilustrando a Vegetação, Geologia, Compartimentos de Relevo e Hidrografia	42
Figura 9 - Declividade e Altimetria do Município de Sirinhaém-PE.....	43
Figura 10 - Caracterização Física em Recorte Para a Usina Trapiche – Sirinhaém-PE: Ilustrando a Vegetação, Geologia, Compartimentos de Relevo, Pedologia e Hidrografia	44
Figura 11 - Pontos em que foram coletadas as amostras de solo em quatro (4) áreas, conforme o detalhamento do Quadro 1 apresentado anteriormente	45
Figura 12 - Aspecto da paisagem da área 01, local de mata nativa adjacente às áreas de coleta, localizada na Usina Trapiche, no município de Sirinhaém-PE.	48
Figura 13 - Modelo do formato da amostragem de solo num transecto em zigue-zague, realizada na área 01, local de mata nativa adjacente às áreas de coleta, localizada na Usina Trapiche, no município de Sirinhaém-PE. Marcadores na cor amarela indicam os locais dos pontos de amostragem.....	48
Figura 14 - Aspecto da paisagem da área 02, com plantação de cana de açúcar e tratada com vinhaça há mais de 10 anos, localizada na Usina Trapiche, no município de Sirinhaém-PE.....	49
Figura 15 - Modelo do formato da amostragem de solo num transecto em zigue-zague, realizada na área 02, cultivada com cana de açúcar e recebendo vinhaça há mais de dez anos, localizada na Usina Trapiche, no município de Sirinhaém-PE. Marcadores na cor amarela indicam os locais dos pontos de amostragem.	49

Figura 16 - Aspecto da paisagem da área 03, tratada com fertilizante fosfatado, cuja plantação de cana de açúcar tinha sido colhida há cerca de uma semana, localizada na Usina Trapiche, no município de Sirinhaém-PE.....	50
Figura 17 - Modelo do formato da amostragem de solo num transecto em zigue-zague, realizada na área 03, cultivada com cana de açúcar e recebendo fertilizante fosfatado há mais de dez anos, localizada na Usina Trapiche, no município de Sirinhaém-PE. Marcadores na cor amarela indicam os locais dos pontos de amostragem.	50
Figura 18 - Aspecto da paisagem da área 04, com plantação de cana de açúcar e tratada com vinhaça e fertilizante fosfatado há a mais de 10 anos, localizada na Usina Trapiche, no município de Sirinhaém-PE.	51
Figura 19 - Modelo do formato da amostragem de solo num transecto em zigue-zague, realizada na área 04, cultivada com cana de açúcar e recebendo vinhaça e fertilizante fosfatado há mais de dez anos, localizada na Usina Trapiche, no município de Sirinhaém-PE. Marcadores na cor amarela indicam os locais dos pontos de amostragem.....	51
Figura 20 - Amostras de solos das quatro áreas de tratamento (A1, A2, A3 e A4) antes e após destorroar e passar em peneira de 2mm de malha.....	52
Figura 21 - Teste de textura de campo - Indicando caráter argiloso para as áreas de coleta ..	55
Figura 22 - Índices de pH, Ca, Mg, Na, K, Al, H, S, CTC, C e MOS expressos em gráfico para os diferentes sistemas de manejo - Camada de 0-20	62
Figura 23 - Índices de pH, Ca, Mg, Na, K, Al, H, S, CTC, C e MOS expressos em gráfico para os diferentes sistemas de manejo - Camada de 20-40	62
Figura 24 - Valores de V e m expressos em gráfico para os diferentes sistemas de manejo - Camada de 0-20.....	63
Figura 25 - Valores de V e m expressos em gráfico para os diferentes sistemas de manejo - Camada de 20-40.....	63
Figura 26 - Valores de pH para as profundidades de 0-20 e 20-40 para os diferentes sistemas de manejo	65
Figura 27 - Valores de Al para as profundidades de 0-20 e 20-40 para os diferentes sistemas de manejo	66
Figura 28 - Valores de MOS para as profundidades de 0-20 e 20-40 para os diferentes sistemas de manejo.....	67

Figura 29 - Valores de P para a profundidade de 0-20 para os diferentes sistemas de manejo	70
Figura 30 - Valores de P para a profundidade de 20-40 para os diferentes sistemas de manejo	70

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Notícias divulgadas de despejo de vinhaça em Rios (2018-2022)	31
Quadro 2 - Objetivos e Metas dos ODS relacionadas ao presente trabalho.....	32
Quadro 3 - Áreas de tratamento selecionadas para coleta de solo	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção mundial de etanol de combustível (Milhões de Galões) – 2016 - 2021 .	23
Tabela 2 - Produção de açúcar mundial (2017-2021) (1000 Toneladas Métricas - valor bruto)	24
Tabela 3 - Exportação de açúcar mundial (2017-2021) (1000 Toneladas Métricas - valor bruto)	24
Tabela 4 - Quantidade de vinhaça produzida no Brasil, na Região Nordeste e no Estado de Pernambuco – Safras de 2016/2017 – 2021/2022	28
Tabela 5 - Quantidade de açúcar, etanol e vinhaça produzidos na Usina Trapiche - Safras de 2016/2017 - 2021/2022.....	28
Tabela 6 - Composição química da vinhaça conforme o tipo de mosto.....	29
Tabela 7 - Coordenadas Geográficas dos Pontos de Amostragem.....	46
Tabela 8 - Resultados das análises para os atributos físicos do solo sob diferentes sistemas de manejo.....	56
Tabela 9 - Resultados das análises estatísticas para os atributos químicos do solo sob diferentes sistemas de manejo	60
Tabela 10 - Análise da vinhaça utilizada na usina trapiche.....	66
Tabela 11 - Teores de fósforo no solo com diferentes graus de labilidade sob diferentes sistemas de manejo.....	68

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	HISTÓRICO DA CANA DE AÇÚCAR NO BRASIL E NO ESTADO DE PERNAMBUCO: BREVE RELATO	19
2.2	A CANA DE AÇÚCAR E A INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA	20
2.3	CARACTERÍSTICAS DA VINHAÇA E SUAS APLICAÇÕES	26
2.3.1	Produção e histórico de utilização da vinhaça	26
2.3.2	Composição da vinhaça e sua utilização atual	28
2.3.3	Impactos da aplicação de vinhaça	30
2.3.4	O uso da vinhaça e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável - ODS	32
2.4	O FÓSFORO NO MEIO AMBIENTE.....	33
2.4.1	O elemento fósforo e a sua importância no desenvolvimento das plantas	33
2.4.2	A dinâmica do fósforo no solo	34
3	MATERIAL E MÉTODOS	37
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	37
3.1.1	Clima	37
3.1.2	Pedologia	38
3.1.3	Vegetação	40
3.1.4	Geologia	40
3.1.5	Relevo	41
3.1.6	Hidrografia	41
3.2	COLETA DAS AMOSTRAS DE SOLO.....	45
3.2.1	Detalhamento das Áreas de coleta:	47
3.3	ANÁLISES DOS SOLOS	52
3.3.1	Procedimentos pré-análise laboratorial	52
3.3.2	Análises Físicas:	52

3.3.2.1	Granulometria	52
3.3.2.2	Densidade.....	53
3.3.3	Análises Químicas	53
3.3.4	Análises Estatísticas	54
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
4.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA ÁREA DE ESTUDO	55
4.2	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DA ÁREA DE ESTUDO	57
4.3	EFEITO DOS DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO NO ELEMENTO P	64
5	CONCLUSÕES	71
	REFERÊNCIAS	72
	APÊNDICE A - CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO SOLO NOS PONTOS DE COLETA SOB DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO	80
	APÊNDICE B - QUANTIFICAÇÃO DE P E OS DIFERENTES GRAUS DE LABILIDADE NO SOLO NOS PONTOS DE COLETA SOB DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO	81
	APÊNDICE C - CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO NOS PONTOS DE COLETA SOB DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO	82

1 INTRODUÇÃO

A produção da cana de açúcar (*Saccharum spp.*) têm contribuído com o desenvolvimento econômico do País, e possui, de acordo com dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) - Safra 2021/22 (2021), cerca de 8.243,1 mil hectares de área em produção agrícola, gerando cerca de 25,86 bilhões de litros de etanol e 36,6 mil toneladas de açúcar. E, em âmbito mundial, o Brasil corresponde a cerca de 27% da produção do etanol (RFA, 2022), e comanda o mercado do açúcar desde 1980 (CNA, 2018).

Apesar da grande contribuição à nível nacional e mundial, a produção brasileira do etanol e do açúcar geram resíduos ao longo do seu processo de fabricação. Dentre esses resíduos destaca-se a vinhaça, que é o produto final da destilação do álcool, e trata-se de um efluente líquido, de textura pastosa e apresenta uma coloração marrom escuro (MARQUES, 2015). Para cada litro de álcool produzido, cerca de 13 litros de vinhaça são deixados como resíduo. Ela possui um alto poder poluente, que se deve à sua alta concentração de matéria orgânica, baixo nível de pH e altos índices de Demanda Bioquímica por Oxigênio (DBO) (PAULINO *et al.*, 2011; SANTOS *et al.*, 2010).

O descarte da vinhaça no meio ambiente, que por muito tempo foi lançada em corpos d'água, e causou sérios problemas de poluição, foi regulamentado por meio da Portaria/GM n.º 323 de 1978, sendo proibido o lançamento em corpos d'água, e a vinhaça passou a ser utilizada como condicionador para melhoria do solo. Alguns efeitos da vinhaça para o solo são conhecidos, tais como alterações no pH, aumento da concentração de carbono orgânico, da Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e da atividade microbológica, além de beneficiar alguns atributos físicos. A vinhaça após ser submetida a um tratamento, tem sido utilizada como complementação da fertilização de alguns nutrientes no solo, como N, P, K (Nitrogênio, Fósforo e Potássio) na produção de cana de açúcar, na forma de fertirrigação (ROSSETTO; DIAS; VITTI, 2008; GLORIA; ORLANDO FILHO, 1983). Ademais, o reaproveitamento da vinhaça como fertilizante auxilia em uma forma de manejo adequada para este resíduo, de forma a reduzir o seu potencial poluidor para o meio ambiente além de utilizar e transformar um resíduo com poder poluente em um produto funcional para o solo.

A produção intensiva de cana de açúcar, sem a reposição adequada dos nutrientes retirados, tende a ocasionar um declínio natural da fertilidade do solo (BIGOTT; HOY; FULTZ, 2019). Em regiões de clima tropical, o fósforo (P) é o nutriente mais limitante na produção agrícola. Esse fato se deve às interações do íon fosfato com a matriz mineral do solo que resulta

em diferentes graus de labilidade do elemento (OLIVEIRA FILHO; PEREIRA, 2020). A labilidade do fósforo no solo refere-se à capacidade dos compostos fosfatados em repor a solução do solo, e a maior parte do fósforo, seja o natural do solo ou oriundo de fertilizações, tem sido acumulada no solo nas frações menos lábeis e principalmente nas frações não lábeis (ARAÚJO *et al.*, 2004).

As diversas interações e reações do íon fosfato no solo resultam em um aproveitamento de apenas 20-30% do P aplicado via fertilizante pelas plantas (OLIVEIRA FILHO *et al.*, 2017). Dessa forma, esse fenômeno interfere nos cultivos agrícolas, inclusive no da cana de açúcar, que necessita de grandes e recorrentes aplicações de fertilizantes para poder suprir a demanda nutricional da cultura. E vale destacar que o P é um elemento escasso na natureza, o que fomenta a preocupação com este recurso para a posteridade.

O uso da vinhaça na produção da cana de açúcar tem trazido benefícios ao solo e pode contribuir para a redução do uso de fertilizantes fosfatados. Este insumo é usado em grande escala para produção de cana de açúcar e grande parte dele é fixado aos minerais do solo, em formas pouco disponíveis às plantas, levando a necessidade de se aplicar o fertilizante em quantidades que possam além suprir as plantas, compensar a fixação pelo solo. Tem havido estudos sobre os efeitos da aplicação de vinhaça no solo (SERAFIM *et al.*, 2021; SILVA *et al.*, 2018), mas existem poucas informações sobre seus efeitos no fósforo adsorvido ao solo, que com o passar do tempo vai se transformando cada vez mais em formas pouco acessíveis pelas plantas.

Nesse sentido, o objetivo geral com este trabalho é: determinar o efeito da aplicação de vinhaça na labilidade de fósforo em solo de áreas tradicionalmente cultivadas com cana de açúcar. E os objetivos específicos: 1) Determinar as diferentes formas de fósforo utilizando metodologias distintas - fósforo inorgânico prontamente lábil - Mehlich-1 (1953); Lábil - NaHCO_3 ; Moderadamente Lábil - NaOH . 2) Comparar a labilidade de formas de fósforo em diferentes tempos de aplicação de vinhaça em solo cultivado com cana de açúcar; 3) Verificar o efeito da vinhaça na fertilidade do solo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 HISTÓRICO DA CANA DE AÇÚCAR NO BRASIL E NO ESTADO DE PERNAMBUCO: BREVE RELATO

A Cana de Açúcar (*Saccharum spp.*) é uma espécie de gramínea, nativa da Ásia. Possui o caule robusto, fibroso e articulado, folhas lineares, flores distribuídas em panículas¹ piramidais e cariopses² ovoides (DANIELS; ROACH, 1987). A planta em geral tem entre dois e seis metros de altura e é largamente cultivada em regiões tropicais e subtropicais (BIGOTT; HOY; FULTZ, 2019).

No Brasil, a cultura da cana de açúcar foi amplamente difundida pelo litoral, trazida pelos colonizadores portugueses que viram no território brasileiro terra próspera para o desenvolvimento desta cultura, como bem destaca Prado Júnior (1978, p. 9): “Seus solos são férteis, e prestam-se admiravelmente, por tudo isto, à agricultura tropical efetivamente servirá de base econômica não somente da sua ocupação pelos colonos europeus, mas de ponto de partida e irradiação da colonização de todo o país”.

O autor também destaca como a cana de açúcar foi um produto chave para o desenvolvimento econômico do Brasil, bem como foi fator determinante para a ocupação do País. O motivo principal para o sucesso da cultura no território brasileiro, foi dado aos fatores naturais em que o Brasil se enquadrava (ANDRADE, 2001). Prado Júnior (1978, p. 32) ainda destaca: “A qualidade do solo, revelar-se-ia surpreendentemente propício, em alguns pontos pelo menos da extensa costa. Foi o caso, particularmente do Extremo-Nordeste, na planície litorânea hoje ocupada pelo Estado de Pernambuco”.

Por vários séculos, o estado de Pernambuco foi o principal produtor nacional da cana de açúcar (ANDRADE, 2001). Um conjunto de elementos físicos e humanos provocaram o desencadeamento da cultura da cana de açúcar bem como sua expansão ao longo de quatro séculos. Dentre os fatores de cunho físico, pode-se citar a posição geográfica do estado em questão. Ou seja, o espaço entre o mercado europeu em relação a outras partes do país; as condições da natureza, sendo elas, o solo e o clima, bem como o sistema de agricultura

¹ PANÍCULA: inflorescência indefinida, tipo cacho, cujos pedicelos se dividem para formarem pequenos cachos, e, em seu todo, tem um aspecto de cone. É uma variação de cacho composto (Glossário de Botânica – UFSM).

² CARIOPSE: fruto seco, indeiscente, cujo pericarpo e semente se encontram concrecidos, formando uma unidade indivisa, é típico das poáceas. Muitos autores consideram como uma variedade especial de aquênio (Glossário de Botânica – UFSM).

açucareiro. Fatos esses, que contribuíram com o sucesso e o desenvolvimento dessa cultura em Pernambuco, como também no Brasil (PRADO JÚNIOR, 1961; SINGER, 1977).

Com o sucesso da cultura no país, com o passar dos anos foi-se expandindo o mercado interno e externo do açúcar, Singer (1977, p. 271 e 272) destaca que, o número de engenhos crescia constantemente “Se eram cinco em 1550, somavam trinta em 1570, sessenta e seis em 1584 e cento e quarenta e quatro por ocasião da conquista holandesa em Pernambuco”. De modo que estes resultados financeiros da colonização agrícola contribuíram significativamente, abrindo perspectivas expansionistas para utilização agrícola de cada vez mais territórios (FURTADO, 2005). Prado Júnior (1978) destaca ainda que durante mais de século e meio, a produção do açúcar representou a única base que firmou a economia brasileira. Sendo até meados do século XVII, o Brasil, o maior produtor mundial de açúcar, e desde 1980 até os dias atuais, comanda o mercado mundial deste produto (CNA, 2018).

2.2 A CANA DE AÇÚCAR E A INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA

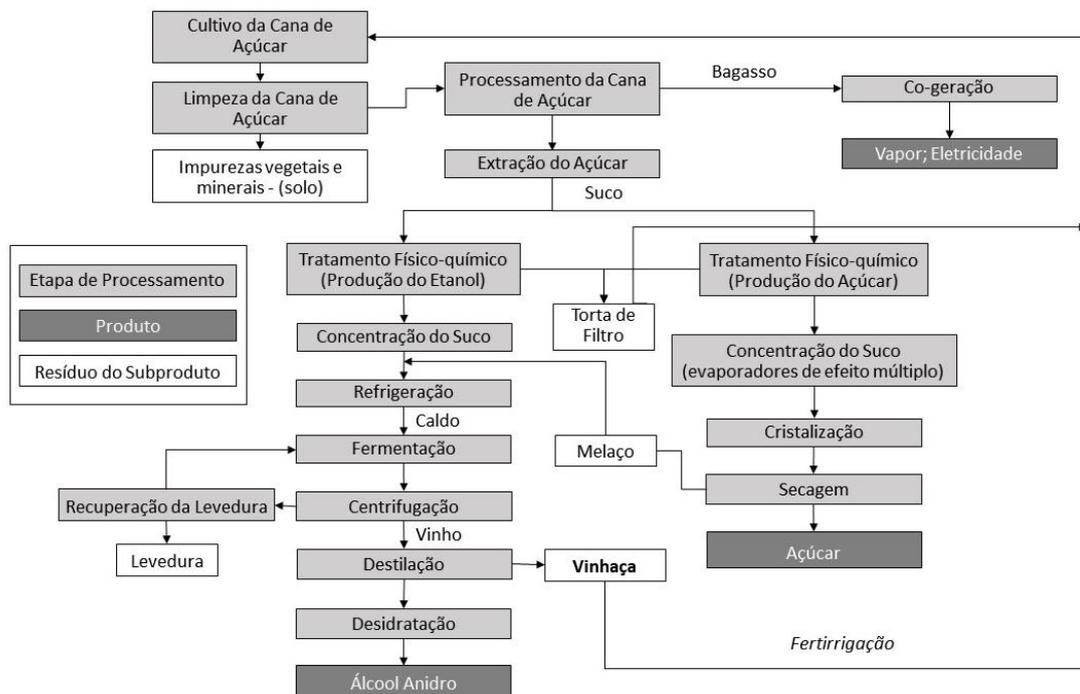
O Brasil foi um grande produtor de cana de açúcar em sua fase de colonização, desde então passou por muitas transformações que permitiram-no obter grande importância mundial por meio dos produtos derivados deste cultivo. Com o passar do tempo, com a melhor exploração do potencial da cana de açúcar, foi-se obtendo novos produtos derivados da planta, como é o caso do etanol.

Em meados de 1920, há relatos dos primeiros usos práticos do etanol, porém somente com a crise mundial do petróleo na década de 70, o Brasil começara a utilizar o etanol como combustível (IPEA, 2010). Em 1975, o governo brasileiro, por meio do decreto governamental de nº 76.593, criou o Programa Nacional do Álcool (Proálcool), com o principal objetivo de reduzir a dependência nacional em relação ao petróleo importado. O Proálcool contribuiu com o impulsionamento da produção de bioenergia no país nas últimas quatro décadas e foi bem sucedido na substituição dos derivados do petróleo (LEITE; CORTEZ, 2007). A indústria sucroalcooleira brasileira passou por altos e baixos econômicos ao longo da sua história, porém, atualmente, um conjunto de elementos, como a preocupação com o meio ambiente, a união mundial em busca da redução dos gases de efeito estufa, como também a estimativa de escassez dos combustíveis fósseis, fez-se renovar o interesse pelo etanol.

A cana de açúcar é uma das alternativas de fontes de energia renováveis, principalmente no cenário agrícola brasileiro, cujo setor sucroalcooleiro está em expansão. No Brasil, a cultura

Estas usinas são responsáveis pela produção de açúcar e etanol no País. De acordo com dados da CONAB (2021) a produção das usinas brasileiras gira em torno de 71 quilos de açúcar e 42 litros de etanol para cada tonelada de cana processada. O etanol é extraído da biomassa da cana de açúcar e possui potencial para a o sequestro de carbono da atmosfera, que, por sua vez, promove a redução do efeito estufa e seus danos ao meio ambiente (NOCELLI *et al.*, 2017). Os principais produtos gerados pela indústria sucroalcooleira são o açúcar e o etanol, porém, também são gerados subprodutos como o bagaço, a torta de filtro, levedura, melão e a vinhaça. A Figura 2, ilustra os produtos e subprodutos gerados a partir do beneficiamento da cana de açúcar.

Figura 2 - Fluxograma simplificado das biorrefinarias brasileiras de Cana de Açúcar para a produção de açúcar, etanol e eletricidade



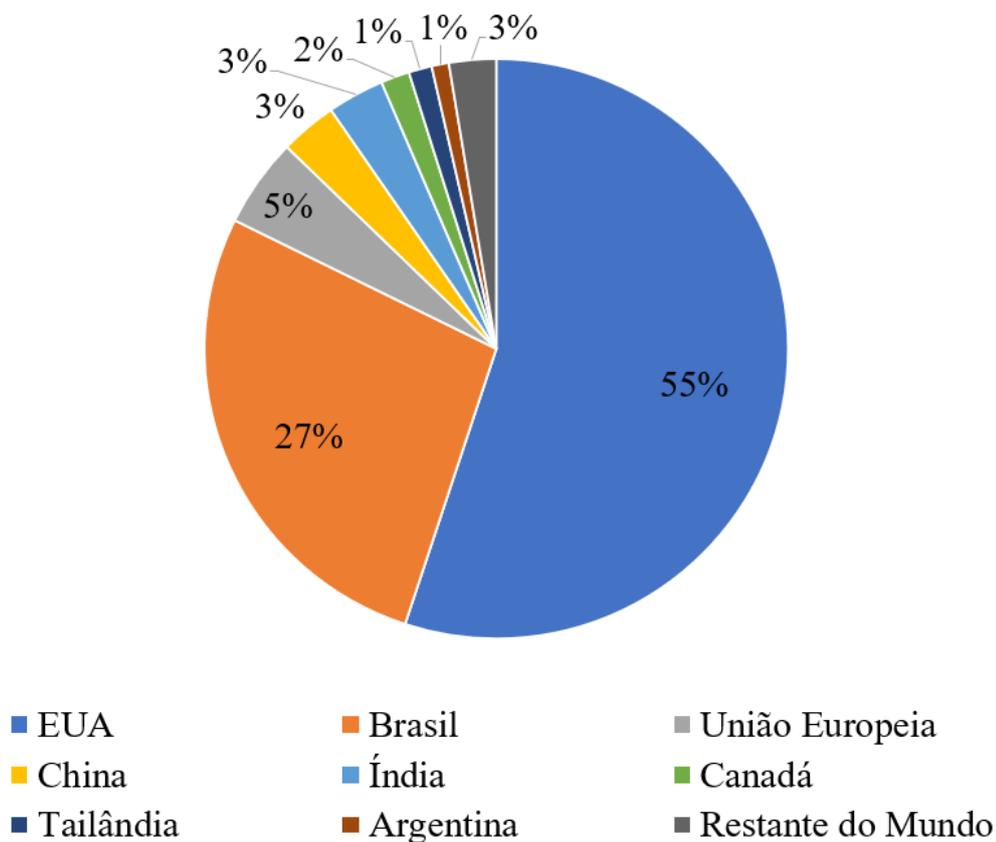
Fonte: Adaptado de Fuess, Rodrigues e Garcia (2017).

A indústria sucroalcooleira possui um impacto positivo na economia do País. No Brasil, a cana de açúcar é produzida em praticamente todo o território, e uma combinação entre clima, solo e as variedades da espécie da planta determinam a produtividade do cultivo (NOCELLI *et al.*, 2017). No mercado global, o Brasil possui grande importância na produção e exportação dos derivados da cana de açúcar, ocupando segundo lugar mundial na produção do etanol de combustível, como é possível observar nos dados dispostos na Tabela 1 para os anos de 2016-2021, e na Figura 3 que representa a produção de etanol de combustível para o ano de 2021 em porcentagem. E ocupa primeiro lugar mundial na produção e exportação de açúcar (Tabelas 2 e 3).

Tabela 1 - Produção mundial de etanol de combustível (Milhões de Galões) – 2016 - 2021

Região	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Estados Unidos da América	15.413	15.936	16.091	15.778	13.941	15.015
Brasil	6.840	6.730	8.060	8.860	8.100	7.430
União Europeia	1.190	1.250	1.300	1.350	1.280	1.350
China	730	850	810	1.010	930	860
Índia	260	230	430	460	540	860
Canadá	460	460	460	497	429	434
Tailândia	330	380	390	430	390	350
Argentina	240	290	290	290	210	260
Restante do Mundo	587	644	709	655	650	711
Total	26.050	26.770	28.540	29.330	26.470	27.270
Valor Anual em Litros - (Mundo)	98.730	101.458	108.167	111.161	100.321	103.353
Valor Anual em Litros - Brasil	25.923	25.507	30.547	33.579	30.699	28.160

Fonte: Adaptado de RFA - Renewable Fuels Association (2022) | * 1 Galão = 3,79L *

Figura 3 - Produção mundial de etanol de combustível – Ano de 2021 (%)

Fonte: Organizado Pela Autora. Base de Dados: RFA (2022)

Tabela 2 - Produção de açúcar mundial (2017-2021)
(1000 Toneladas Métricas - valor bruto)

Produção	2017/18	2018/19	2019/20	2020/21	2021/22
Brasil	38.870	29.500	30.300	42.050	36.000
Índia	34.309	34.300	28.900	33.760	34.700
União Europeia	19.508	16.750	17.040	15.399	16.590
China	10.300	10.760	10.400	10.600	10.300
Tailândia	14.710	14.581	8.294	7.587	10.000
Estados Unidos da América	8.430	8.164	7.392	8.373	8.466

Fonte: Adaptado de USDA (2021)

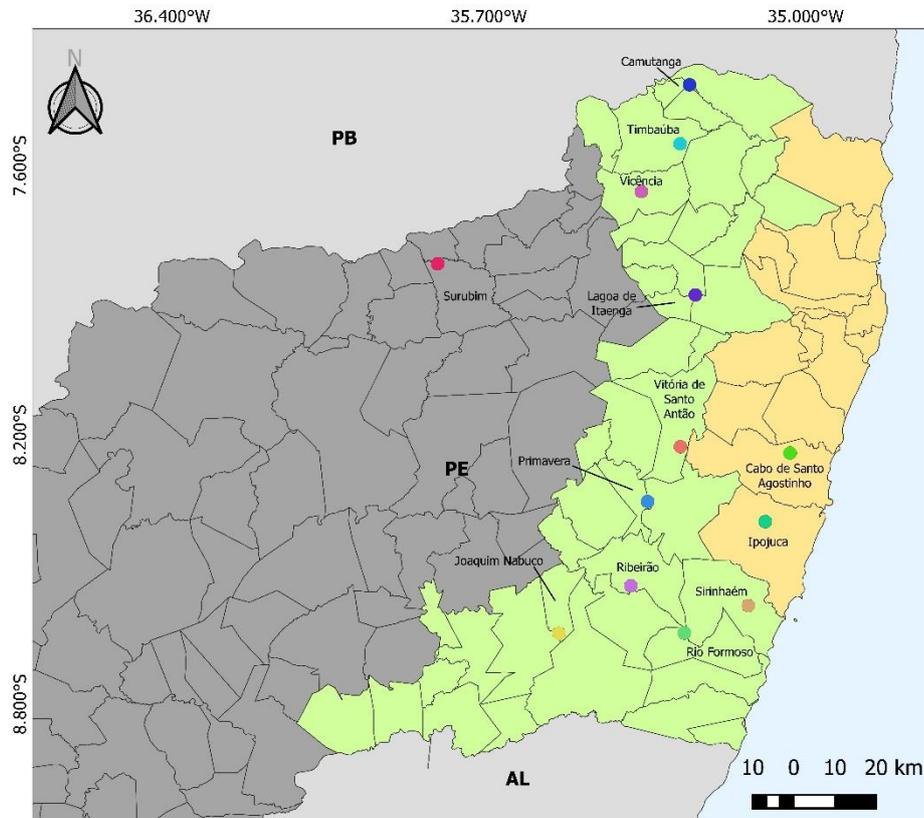
Tabela 3 - Exportação de açúcar mundial (2017-2021)
(1000 Toneladas Métricas - valor bruto)

Exportação	2017/18	2018/19	2019/20	2020/21	2021/22
Brasil	28.200	19.600	19.280	32.150	26.000
Tailândia	10.907	10.612	6.695	4.000	10.000
Índia	2.236	4.700	5.800	7.200	7.000
Australia	3.600	3.735	3.600	3.400	3.635
México	1.146	2.337	1.285	1.235	1.884
Guatemala	1.881	2.125	1.858	1.729	1.823

Fonte: Adaptado de USDA (2021)

Para o estado de Pernambuco, onde fica localizada a área de estudo, no ano de 2021, foram contabilizadas 13 indústrias de produção de açúcar e/ou álcool ativas, onde 2 estão localizadas na Mesorregião Metropolitana do Recife, 10 na Mesorregião da Mata Pernambucana e 1 no Agreste (NOVA CANA, 2021), conforme confere-se na Figura 4. Essas empresas são responsáveis pela geração de emprego e renda principalmente no interior do estado, aumentando a arrecadação dos municípios e movimentando toda economia local. Dados da CONAB (2021) para Pernambuco indicam uma produção de cerca de 350,7 milhões de litros de etanol e 844,9 toneladas de açúcar em uma área cultivada de 222,3 mil hectares para a safra de 2021/22.

Figura 4 - Usinas Sucroalcooleiras distribuídas no Estado de Pernambuco – Nordeste Brasileiro



Legenda

- COMPANHIA ALCOOLQUIMICA NACIONAL - Vitória de Santo Antão
- COOPERATIVA DA ASS. DOS FORNEC. DE CANA DE PERNAMBUCO (COAF) - Timbaúba
- COOPERATIVA DO AGRONEGOCIO DA CANA-DE-AÇÚCAR - Joaquim Nabuco
- USINA BOM JESUS - Cabo de Santo Agostinho
- USINA CENTRAL MATA SUL - Ribeirão
- USINA CENTRAL OLHO D'AGUA - Camutanga
- USINA IPOJUCA - Ipojuca
- USINA PETRIBÚ - Lagoa de Itaenga
- USINA SAO JOSÉ - Surubim
- USINA TRAPICHE - Sirinhaém
- USINA UNIAO E INDUSTRIA - Primavera
- USIVALE INDUSTRIA E COMERCIO - Vicência
- ZIHUATANEJO DO BRASIL AÇÚCAR E ALCOOL - Rio Formoso
- Região Metropolitana do Recife
- Mesorregião da Zona da Mata Pernambucana
- Estado de Pernambuco
- Região Nordeste

Sistema de Coordenadas Geográficas | Datum Geodésico: SIRGAS 2000.
 Base de Dados: IBGE, 2017; CONAB, 2021.
 Organização: DIAS, E. E. C.

Fonte: Elaboração da autora. | Software: QGIS v. 3.12.3

Apesar da sua notória importância para a economia do País, a cultura da cana de açúcar gera alguns impactos ambientais, sendo eles: perda de boa parte da biodiversidade local causada pelo desmatamento em função da expansão da área agrícola, contaminação de águas

superficiais e do solo tendo em mente o uso de forma irregular de herbicidas, erosão do solo, eliminação de gases de efeito estufa durante o período de queima, entre outros (LANGOWSKI, 2007). Expondo isso, o período da queima é um dos pontos críticos quando se fala dos impactos negativos da cana de açúcar, tendo em mente a grande emissão de gás carbônico (CO₂) na atmosfera. Em contrapartida, em sua fotossíntese, a cana consegue atingir um saldo positivo em sequestro de carbono, podendo retirar até 15 Mg ha⁻¹ de CO₂ da atmosfera, dessa forma, absorvendo mais carbono do que liberando, auxiliando na manutenção do meio ambiente, além de reduzir em cerca de 20% a emissão de CO₂ no País com a utilização do etanol como combustível (BUSATO; CANELLAS; VELLOSO, 2005).

Alcançar um modo ambientalmente correto para gerenciar resíduos, é o grande desafio do setor industrial, pois, quando esses materiais são descartados de forma inadequada, pode acarretar uma cadeia de impactos ambientais, tais como poluição de corpos hídricos, contaminação do solo e do lençol freático, óbito de animais e até a destruição de ecossistemas. O setor sucroalcooleiro brasileiro, possui destaque nesse cenário, pois produz uma elevada quantidade de resíduos, que, quando mal administrados podem causar uma série de impactos ao meio ambiente (TAVARES *et al.*, 2018).

Em conjunto com o crescimento econômico que os derivados da cana de açúcar trouxeram para o Brasil, também estão acompanhados uma série de resíduos advindos do processo de industrialização desses derivados, destacando-se como principais, o bagaço (proveniente da extração do caldo), a torta de filtro (resíduo oriundo da decantação do caldo), CO₂ (oriundo da fermentação do álcool e queima da cana de açúcar) e vinhaça (efluente proveniente da destilação da fermentação do álcool). Os problemas decorrentes da grande quantidade de resíduos produzidos a partir da produção do açúcar, álcool e a gestão inadequada para o descarte, são algumas das mais sérias questões a serem discutidas em âmbito tanto social quanto ambiental na perspectiva de um desenvolvimento sustentável (TAVARES, 2016).

2.3 CARACTERÍSTICAS DA VINHAÇA E SUAS APLICAÇÕES

2.3.1 Produção e histórico de utilização da vinhaça

Desde a instauração do Proálcool, o setor sucroalcooleiro brasileiro apontou crescimento de forma acelerada na produção de cana de açúcar e seus derivados. E o resultado disto é a posição atual do Brasil frente ao mercado internacional. Na produção do etanol, que é dado a partir da refrigeração, fermentação, centrifugação e destilação do caldo da cana de açúcar

ou melaço, é gerado um resíduo denominado de Vinhaça, também conhecido como vinhoto, restilo ou tiborna. A vinhaça é o produto final da destilação do álcool, trata-se de um efluente líquido, de textura pastosa e apresenta uma coloração marrom escuro.

A vinhaça, há algumas décadas, era totalmente descartada. Possuindo como destino principal os rios, provocando a contaminação dos corpos d'água, a morte de peixes e comprometendo todo o meio biótico das áreas afetadas. Este fato se deve à composição química da vinhaça, que possui alta concentração de Matéria Orgânica (MO), baixo nível de pH e altos índices de DBO³ (SILVA; GRIEBELER; BORGES, 2007).

Devido às graves consequências aos efeitos poluentes da vinhaça e a sua crescente expansão nas regiões açucareiras do País, passou a ser considerado poluição, por meio do decreto de nº 303 de 28 de fevereiro de 1967, que criou o Conselho Nacional de Controle da Poluição Ambiental, “*qualquer alteração das propriedades físicas, químicas ou biológicas do meio ambiente (solo, água e ar), causada por qualquer substância sólida, líquida, gasosa ou em qualquer estado da matéria, que, direta ou indiretamente: Seja nociva ou ofensiva à saúde à segurança e ao bem-estar das populações*”. De modo a evitar a poluição das águas e do meio ambiente. Após alguns meses, o referido decreto foi revogado pela Lei nº 5.318, de 26 de setembro de 1967, a qual Instituiu a Política Nacional de Saneamento e criou o Conselho Nacional de Saneamento. E, somente em novembro de 1978, por meio da Portaria/GM n.º 323, o lançamento de vinhaça em corpos d'água foi diretamente proibido. Em consequência disto, o usineiro ficou sujeito a providenciar meios de dispor a vinhaça.

Segundo Tibau (1978) a vinhaça, devido às características químicas e ao elevado grau de acidez, teve a sua aplicação na agricultura fortemente condenada pelos pedologistas, visto que o produto demonstrava fortes danos aos locais afetados e, certamente, provocaria a esterilização do solo. Foi quando, fadado entre o dilema da crescente poluição ambiental que estava se agravando devido ao descarte do produto, certo produtor resolveu testá-la na pior terra que estivesse próxima da usina. O autor, então, relata o resultado:

“Passados algum tempo, notou que a terra que havia sido encharcada de vinhaça, nascia os mais autênticos padrões de terra fértil. O proprietário baseado nesses indícios, revelados por “analistas” que para ele nunca falharam, sem perda de tempo, providenciou o preparo do terreno e plantou cana. Para surpresa dele e admiração de

³ DBO – Demanda Bioquímica por Oxigênio: Refere-se à quantidade de oxigênio, em partes por milhão, que uma determinada água poluída necessita para oxidar a matéria orgânica, transformando-a em compostos estáveis e inócuos. A vinhaça, rica em matéria orgânica em estado coloidal, se deteriora facilmente na ausência de oxigênio em detrimento da fermentação anaeróbica na qual se instala. Daí a facilidade e rapidez com que polui as águas (TIBAU, 1978).

todos, os resultados foram espetaculares! A produtividade que girava em torno de 70 t/ha passou para 280 t/ha, ou seja, um aumento de 400%!” (TIBAU, 1978, p. 115).

A partir de então, a vinhaça se tornou um problema de dupla face: de um lado, o seu efeito poluente e de outro o aspecto econômico, destacando o seu valor como melhorador do solo e como fertilizante (TIBAU, 1978).

2.3.2 Composição da vinhaça e sua utilização atual

Para cada litro de álcool produzido é gerado em torno de 13 litros de vinhaça (PAULINO *et al.*, 2011). De acordo com essa informação e em conjunto os boletins da CONAB – Safras de 2016/2017 à 2021/2022, a Tabela 4 apresenta dados de produção de etanol e vinhaça produzidos nas referidas safras no Brasil, na Região Nordeste e no Estado de Pernambuco. E a Tabela 5 expõe os dados de produção da área de estudo, a Usina Trapiche.

Tabela 4 - Quantidade de vinhaça produzida no Brasil, na Região Nordeste e no Estado de Pernambuco – Safras de 2016/2017 – 2021/2022

Produção de Etanol (L)	2016/2017	2017/2018	2018/2019	2019/2020	2020/2021	2021/2022
Brasil (Bi)	27,8	27,2	33,1	34,0	29,7	25,9
Região Nordeste (Bi)	1,39	1,52	1,94	2,11	1,90	1,90
Pernambuco (Mi)	335	319	431	450	357	350

Produção de Vinhaça (L)	2016/2017	2017/2018	2018/2019	2019/2020	2020/2021	2021/2022
Brasil (Bi)	361,4	353,6	430,8	464,1	386,1	336,7
Região Nordeste (Bi)	18,0	19,8	25,2	27,4	24,7	24,7
Pernambuco (Bi)	4,35	4,15	5,60	5,85	4,64	4,55

Fonte: Elaborado Pela Autora. Base de Dados: CONAB (2017-2021) – *Quantidade de vinhaça estimada pelo cálculo: Quant. Etanol * 13.*

Tabela 5 - Quantidade de açúcar, etanol e vinhaça produzidos na Usina Trapiche - Safras de 2016/2017 - 2021/2022

Produção	2016/2017	2017/2018	2018/2019	2019/2020	2020/2021	2021/2022
Açúcar (t)	2,5	2,4	2,5	3,0	2,7	2,3
Etanol (Mi)	26,5	23,5	27,5	30,4	23,8	27,5
Vinhaça (Mi)	344,5	305,5	357,5	395,2	309,4	357,5

Fonte: Elaborado Pela Autora. Dados fornecidos pela Usina Trapiche (2022). – *Quantidade de vinhaça estimada pelo cálculo: Quant. Etanol * 13.*

Por ser um subproduto da produção do etanol sem nenhuma utilização aparente, no passado a vinhaça era apenas um resíduo a ser descartado e uma fonte poluidora do meio ambiente, o que ocorreu em muitos cursos d'água. Devido a sua riqueza em matéria orgânica e K, além de outros componentes, este resíduo passou a ter um alto valor econômico no cultivo de cana de açúcar, e o seu aproveitamento na agricultura passou a reduzir custos com fertilizantes e outros insumos agrícolas (SILVEIRA, 2016; SILVA; BONO; PEREIRA, 2014).

A composição da vinhaça vai depender da natureza e da constituição da matéria-prima utilizada, de como se deu o processo de fermentação, da época da amostragem, bem como do processo utilizado na fabricação do álcool (SILVEIRA, 2016). A vinhaça pode ser oriunda de diferentes tipos de mosto⁴, o mosto de melaço (mel residual da fabricação do açúcar), o mosto do caldo de cana, e o mosto misto, que é a mistura do mosto de melaço com o mosto do caldo da cana. Na Tabela 6 é possível observar a diferença da composição da vinhaça conforme o tipo de mosto.

Tabela 6 - Composição química da vinhaça conforme o tipo de mosto

Parâmetro	Melaço	Caldo	Misto
pH	4,2 – 5,0	3,7 – 4,6	4,4 – 4,6
Temperatura (°C)	80 – 100	80 – 100	80 – 100
DBO (mg/l O₂)	25.000	6.000 – 16.500	19.800
DQO (mg/l O₂)	65.000	15.000 – 33.000	45.000
Sólidos Totais (mg/l)	81.500	23.700	52.700
Sólidos Voláteis (mg/l)	60.000	20.000	40.000
Sólidos Fixos (mg/l)	21.500	3.700	12.700
Nitrogênio (mg/l N)	450 – 1.610	150 – 700	480 – 710
Fósforo (mg/l P₂O₅)	100 – 290	10 – 210	9 – 200
Potássio (mg/l K₂O)	3.740 – 7.830	1.200 – 2.100	3.340 – 4.600
Cálcio (mg/l CaO)	450 – 5.180	130 – 1.540	1.330 – 4.570
Magnésio (mg/l MgO)	420 – 1.520	200 – 490	580 – 700
Sulfato (mg/l SO₄)	6.400	600 – 760	3.700 – 3.730
Carbono (mg/l C)	11.200 – 22.900	5.700 – 13.400	8.700 – 12.100

⁴ Mosto - (do latim *müstum*, “novo”, “jovem”): líquido açucarado destinado à fermentação alcoólica (SILVEIRA, 2016)

Relação C/N	16 – 16,27	19,7 – 21,07	16,4 – 16,43
Matéria Orgânica (mg/l)	63.400	19.500	3.800
Subst. Redutoras (mg/l)	9.500	7.900	8.300

Fonte: MARQUES (2006).

Como observado na Tabela 6, a vinhaça é um líquido com carga orgânica elevada e alta concentração de nutrientes, o seu principal constituinte é a MO, além de possuir macronutrientes como N, K, e P, este último, em menor quantidade. Esse produto concentra também, cátions como o Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg). Nutrientes, esses, que são de grande importância para o desenvolvimento das plantas. Sua riqueza nutricional está relacionada à origem do mosto, o mesmo equivale à uma solução de açúcar, cuja concentração é controlada de modo a tornar a fermentação mais eficiente. Desse modo, quando o mosto é advindo do melaço apresenta maiores teores de MO, K, Ca e Mg, ao passo que esses elementos decaem quando se trata do mosto de caldo de cana.

Uma das soluções para o uso consciente da vinhaça é a chamada fertirrigação, utilizando este produto rico em matéria orgânica em áreas de plantio de cana de açúcar, que, segundo Orlando Filho (1981), atende uma necessidade na demanda química da planta e é um fator que influencia na produtividade. Essa prática foi intensificada após as proibições do descarte em cursos d'água. Após esse processo, alguns efeitos para o solo são conhecidos, tais como alterações no pH, aumento da concentração de carbono orgânico, da CTC e da atividade microbiológica, além de beneficiar alguns atributos físicos (SILVA; GOMES; ALSINA, 2007). Dessa forma, a vinhaça é utilizada constantemente nas lavouras de cana de açúcar, por resolver um problema de descarte deste resíduo, como também por complementar a adubação mineral. Proporcionando, assim, vantagens quanto à economia com insumos na adubação (TAVARES, 2016; OLIVEIRA, 2010). Para a utilização da vinhaça no solo, se faz necessário a análise da mesma, como também do solo, visto que uma alta concentração de potássio, bem como de outros elementos, no solo pode ser prejudicial (SANTOS; SILVA; SOUZA, 2012).

2.3.3 Impactos da aplicação de vinhaça

A principal preocupação da utilização da vinhaça no solo é devido a sua composição química, em especial das concentrações do elemento K, que, caso esteja em excesso, pode endurecer os tecidos das plantas, além de dificultar a absorção de Ca e Mg (MARSCHNER,

2011). Porém, no estudo conduzido por Gloeden *et al.*, (1991) foi apontado que a concentração de K foi mantida próxima do natural mesmo recebendo a vinhaça.

A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - CETESB no ano de 2015, por meio de norma técnica estabeleceu alguns parâmetros para a aplicação de vinhaça no solo. Onde estabelece que se deve realizar aplicação de acordo com as necessidades da planta, e as doses aplicadas devem ser calculadas em função da demanda da cultura em relação ao K e concentrações no solo deste nutriente (CETESB, 2015).

Schneider *et al.* (2012) evidencia, no que diz respeito a legislação ambiental nas diferentes esferas de poder, a proibição do descarte da vinhaça diretamente nos rios, oceanos, solos e ar aleatoriamente, sem os devidos cuidados. Porém é fato que muitas usinas produtoras de açúcar e etanol ainda descartam inadequadamente seus subprodutos, como é possível visualizar notícias disponíveis na internet, dispostas no Quadro 1:

Quadro 1 - Notícias divulgadas de despejo de vinhaça em Rios (2018-2022)

NOTÍCIA	DATA	FONTE
Crime ambiental: Usina de cana-de-açúcar é multada em R\$ 240 mil por despejo de vinhaça em afluente do Rio Piracicaba	30/06/2022	G1 - Globo
Morte de peixes no Rio Ivinhema preocupa e é investigada pelo Imasul	08/02/2021	Campo Grande News
Usina responsável por vazamento em rios de Jaciara é autuada por órgão ambiental	29/07/2018	Circuito MT
Cetesb multa usina de cana em R\$ 125 mil	22/05/2018	Diário da Região

Esse tipo de descarte é altamente prejudicial a todas as populações envolvidas (humanas, vegetais e animais). Dessa forma, o uso consciente da vinhaça necessita ser difundido evidenciando suas vantagens para a melhoria do solo de modo a erradicar esses acontecimentos supracitados.

2.3.4 O uso da vinhaça e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável - ODS

Os ODS foram propostos pela Organização das Nações Unidas (ONU) em 2015, em prol de uma ação global para: “*acabar com a pobreza, proteger o meio ambiente e o clima e garantir que as pessoas, em todos os lugares, possam desfrutar de paz e de prosperidade*” (ONU, 2015). Ao todo são 17 objetivos e 169 metas que contemplam diversos temas em favor do desenvolvimento humano.

O presente trabalho é motivo de fomento de 2 ODS, os objetivos 9 e 12, apresentados no Quadro 2:

Quadro 2 - Objetivos e Metas dos ODS relacionadas ao presente trabalho

OBJETIVOS	METAS
9 - Indústria, Inovação e Infraestrutura	9.4 - Até 2030, modernizar a infraestrutura e reabilitar as indústrias para torná-las sustentáveis, com eficiência aumentada no uso de recursos e maior adoção de tecnologias e processos industriais limpos e ambientalmente adequados; com todos os países atuando de acordo com suas respectivas capacidades
12 - Consumo e Produção Responsáveis	12.2 - Até 2030, alcançar gestão sustentável e uso eficiente dos recursos naturais
	12.4 - Até 2020, alcançar o manejo ambientalmente adequado dos produtos químicos e de todos os resíduos, ao longo de todo o ciclo de vida destes, de acordo com os marcos internacionalmente acordados, e reduzir significativamente a liberação destes para o ar, água e solo, para minimizar seus impactos negativos sobre a saúde humana e o meio ambiente
	12.5 - Até 2030, reduzir substancialmente a geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso

Fonte: ONU (2015).

Dessa forma, a utilização da vinhaça para melhoria da fertilidade do solo auxilia na manutenção dos ODS 9 - Meta 9.4 e 12 - Metas 12.2, 12.4 e 12.5, de maneira que otimiza o recurso natural - solo - ajudando na produção agrícola; auxilia em uma forma de manejo adequada para este resíduo, de forma à reduzir o seu potencial poluidor para o meio ambiente;

utiliza e transforma um resíduo com poder poluente em um produto funcional para o solo; além de fomentar na estrutura industrial sucroalcooleira, de modo a repensar seus resíduos de modo benéfico para si, para a sociedade e para o meio ambiente.

2.4 O FÓSFORO NO MEIO AMBIENTE

2.4.1 O elemento fósforo e a sua importância no desenvolvimento das plantas

Dentre os elementos que compõem a vinhaça, está o fósforo, um macronutriente de suma importância para o desenvolvimento da planta. Existem estudos quantificando o fósforo em função da aplicação de vinhaça, embora ela seja rica principalmente em N e K (ROSSETTO; DIAS; VITTI, 2008; GLORIA; ORLANDO FILHO, 1983). Entretanto, estes estudos tratam na maioria das vezes de quantificar o fósforo que a vinhaça aporta ao solo e pouco se sabe qual seu efeito sobre a labilidade do fósforo acumulado no solo.

O fósforo é um elemento químico, não-metal, pertencente à série do nitrogênio. Está presente em todo o planeta, porém, não é encontrado livre na natureza e quase sempre ocorre em estado de oxidação. Segundo Corbridge (2016), o fosfato, no geral, está distribuído nos solos e em rochas e, geralmente, é ausente na atmosfera. Ainda segundo o autor, atualmente são conhecidos mais de trezentos minerais fosfatados, no entanto, somente os minerais do grupo Apatita⁵ ocorrem em concentrações suficientes na crosta terrestre, para servir como fonte comercial do elemento.

O nutriente P é requerido em grandes quantidades pelas plantas, por isso é considerado um macronutriente. É um dos elementos mais nobres do solo. Integra parte do metabolismo das plantas, tendo importância na reprodução e multiplicação das células, na formação de proteínas, na fotossíntese, no armazenamento de energia, no desdobramento de açúcares, na respiração e fornecimento de energia a partir da adenosina trifosfato (ATP – do inglês Adenosine TriPhosphate), na formação de grãos e de sementes e na formação de sacarose, sendo esta última função, no caso da cana de açúcar, essencial para a indústria sucroalcooleira (MALAVOLTA, 2007; MARSCHNER, 2011). O elemento também atua no desenvolvimento

⁵ Apatita: Fosfato tricálcico fluorífero ou clorífero – $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}_2\text{Cl})$. Aparece nas rochas eruptivas, metamórficas e nos pegmatitos, em forma de grandes cristais (GUERRA; GUERRA, 2008). É um fosfato insolúvel do qual se originam outros compostos encontrados na natureza, tais como: oxipatita, apatita carbonatada, fosfato férrico, fosfato alumínico e fluorapatita, sendo estes três últimos fortemente insolúveis. Os fosfatos solúveis são os fosfatos monocálcicos, fosfato magnésico, fosfato potássico e o fosfato bicálcico solúvel em ácido cítrico (TIBAU, 1978)

e ativação das raízes, que reflete diretamente na produtividade das culturas, além de melhorar o paladar de certas plantas (TIBAU, 1978).

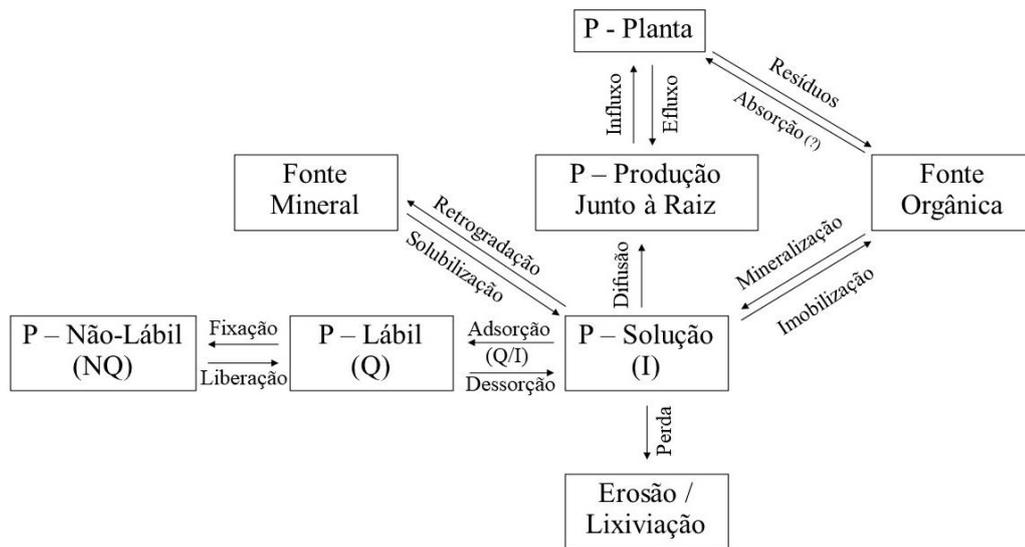
É um nutriente vital no início do desenvolvimento da planta, podendo comprometer toda a produção se sua concentração não estiver adequada neste estágio do ciclo de vida da cultura. O fósforo tem, ainda, a propriedade de aumentar a eficiência da utilização de água pela planta, bem como a absorção e a utilização de outros nutrientes que venham eles do solo ou do adubo, contribuindo para aumentar a resistência da planta a algumas doenças, a suportar baixas temperaturas e a falta de umidade (KORNDORFER, 2004).

2.4.2 A dinâmica do fósforo no solo

Solos das regiões tropicais, onde a precipitação supera a evapotranspiração favorecendo a lixiviação de cátions básicos e sílica (ALLEN; HAJEK, 1989), sofrem, com intensidade, à ação do intemperismo, que é um dos fatores naturais que causam a deficiência de nutrientes no solo. São exemplos de agentes do intemperismo: a chuva e o vento. Segundo Novais, Smyth e Nunes (2007), com o aumento do grau deste fenômeno, o solo se torna mais eletropositivo afetando a sua CTC. A adsorção aniônica aumenta, a saturação por bases diminui, enquanto aumenta, gradualmente, a retenção de ânions como o fosfato, por exemplo.

A baixa labilidade do P no solo se deve a elevada reatividade e a alta taxa de retenção de íons, relacionados aos constituintes dos solos (NOVAIS; SMYTH; NUNES, 2007). Por conta da intensa ação do intemperismo, os solos das regiões tropicais apresentam baixo teor de P-total e muito baixo teor de P-disponível para as plantas, fatores que se devem ao ambiente no qual o solo está inserido, favorecendo a retenção dos íons do P em seus constituintes sólidos, principalmente óxidos de Ferro (Fe) e Alumínio (Al), fator que diminui a concentração do P em solução (EMBRAPA, 2003). Dessa forma, em solos mais intemperizados, como Latossolos e Argissolos, predomina-se as formas inorgânicas do P, ligadas à fração mineral.

Sabendo disso, a variação nos graus de estabilidade destes compostos em maior e menor, são classificados como fosfatos lábeis e não-lábeis. A fração lábil é referente aos compostos fosfatados com capacidade de repor a solução do solo quando absorvido por plantas ou microrganismos (SANTOS; GATIBONI; KAMINSKI, 2008). Por este motivo, as frações mais lábeis sofrem com o grau de intemperização do solo, da mineralogia, da textura e do teor de matéria orgânica (VILAR; VILAR, 2013). A Figura 5, caracteriza a dinâmica do fósforo no sistema solo-planta, ilustrando o conteúdo supracitado.

Figura 5 - Fluxograma das formas de Fósforo no sistema Solo-Planta

Fonte: NOVAIS; SMYTH; NUNES (2007)

Como é possível observar na Figura 5 e relacionando com o que já foi exposto, a Fonte Mineral é o repositório dos fertilizantes aplicados no solo. A retrogradação indica que, em algumas condições, o P-Solução poderá migrar para alguma forma de baixa reatividade relativo à fonte mineral. E, em função da ação do intemperismo, o P-Solução é adsorvido, posteriormente se fixando e se tornando não-lábil.

A planta possui o solo como sua fonte principal de nutrientes minerais. E, quando ocorre a deficiência de nutrientes no solo, a produtividade da planta é comprometida, se fazendo necessário a reposição de nutrientes por meio da fertilização do solo (NOVAIS; SMYTH; NUNES, 2007). A fertilização fosfatada tem sido utilizada para suprir a deficiência de P no solo, porém este elemento pode ser adsorvido na superfície dos colóides ou convertido a compostos pouco solúveis de Fe e Al (BRADY; WEIL, 2013; EMBRAPA, 2003). Este fato faz com que a eficiência da adubação fosfatada seja comprometida, levando ao baixo aproveitamento dos fertilizantes e fazendo com que cada vez mais aplicações de fertilizante sejam realizadas.

O P é obtido a partir de sua extração de rochas fosfáticas, que constitui uma fonte não renovável deste elemento. Estima-se que em meados de 2050, a demanda mundial por fósforo duplique, sendo que algumas pesquisas apontam que poderá ocorrer um pico na produção de fertilizantes fosfatados nos próximos 30 anos, e um esgotamento das reservas mundiais de rochas fosfáticas nos próximos 50-100 anos (PANTANO *et al.*, 2016). Dados esses, que incitam a preocupação com a manutenção desse elemento no planeta.

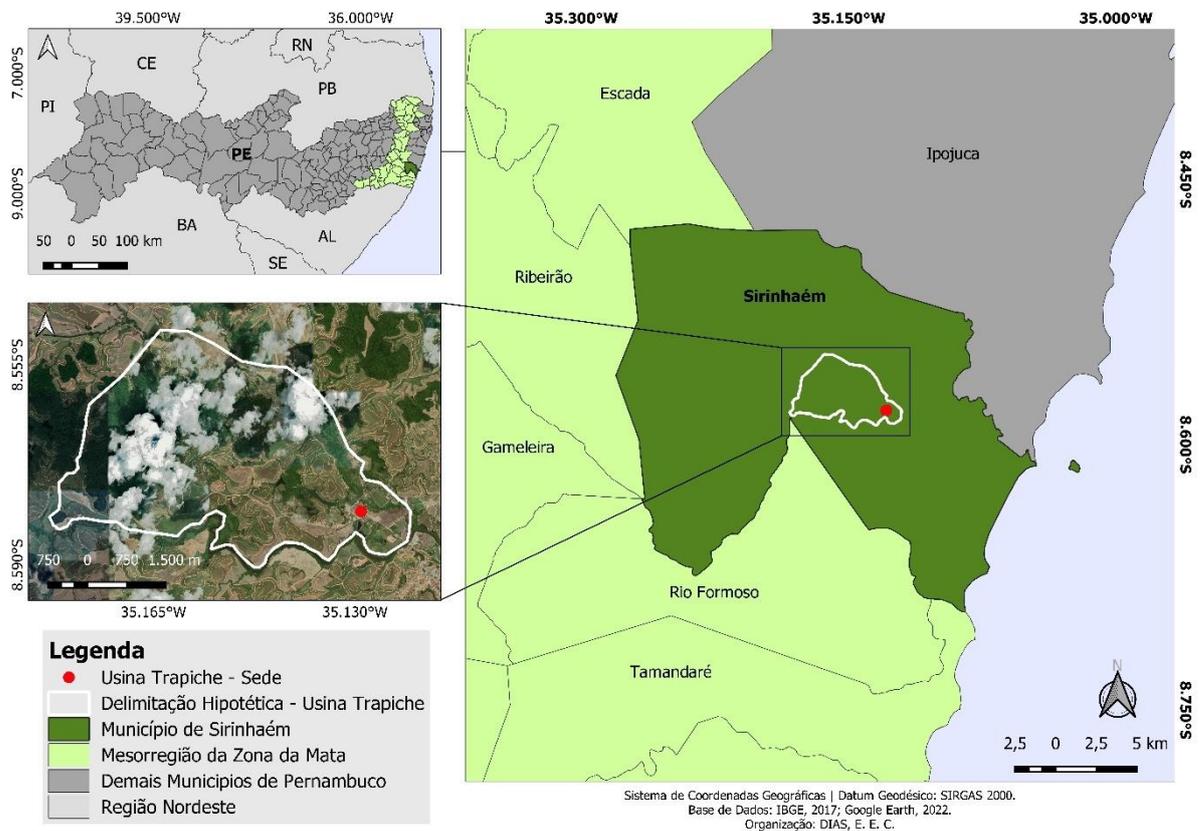
Desse modo, a intervenção humana no ciclo do P, têm aclamado preocupações com a disponibilidade deste nutriente na natureza, e se faz necessário novas perspectivas que visem a recuperação e/ou utilização do fósforo já presente na natureza, sendo o fósforo acumulado em áreas tradicionalmente cultivadas com cana de açúcar, uma boa alternativa, e, a vinhaça demonstra participar da contribuição na sua reutilização como fertilizante de solos destinados à produção agrícola.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo, onde o trabalho foi conduzido, é a Usina Trapiche, localizada no município de Sirinhaém – PE, que se situa na Zona da Mata Sul do estado de Pernambuco (Figura 6). O local escolhido foi devido ao histórico de grande produção de cana de açúcar, e consequentemente largo histórico de fertilizações fosfatadas, além do aproveitamento da vinhaça para aplicação no canavial, apresentando os atributos necessários para a realização da pesquisa.

Figura 6 - Localização da Área de Estudo - Usina Trapiche, Sirinhaém-PE



Fonte: Elaboração da autora. | *Software: QGIS v. 3.12.3*

3.1.1 Clima

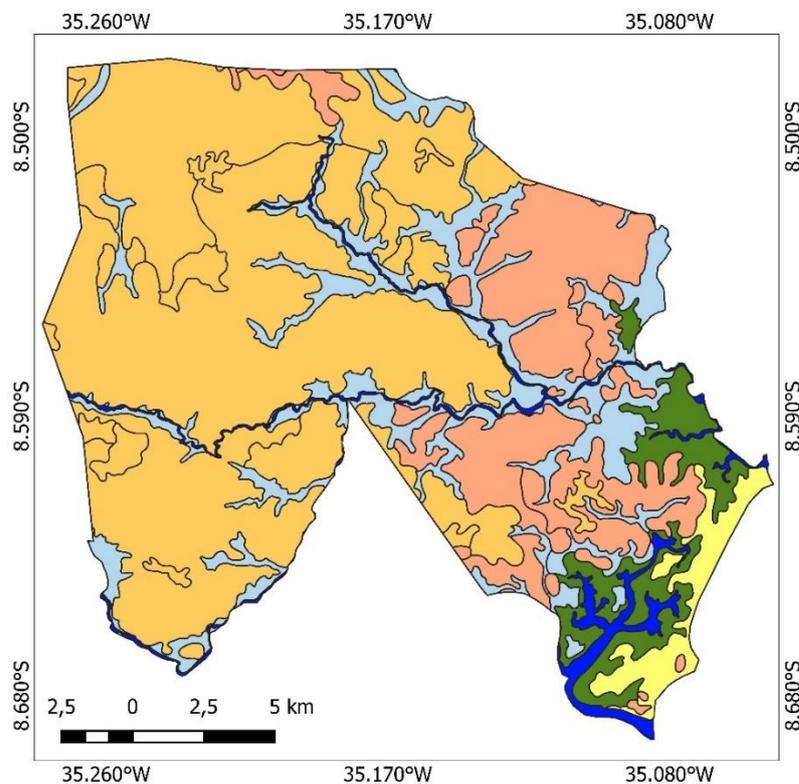
A área de estudo, segundo a classificação climática de Köppen e Geiger (1928), possui clima do tipo As' que se caracteriza como quente e úmido com chuvas de outono e inverno. A Zona da Mata Sul possui temperaturas equilibradas ao longo do ano, com mínimas podendo chegar a 15°C e máximas a 36°C, apresentando um índice pluviométrico de em média 1800 mm

por ano e temperatura média de 26°C (INMET, 2021). Desse modo, prevalece, para essa região, o intemperismo químico, que age alterando os minerais que compõem as rochas, tendo, geralmente, a ocorrência de solos mais profundos e quimicamente empobrecidos nestas áreas correspondentes.

3.1.2 Pedologia

De acordo com dados do Zoneamento Agroecológico de Pernambuco – ZAPE (2001), no município de Sirinhaém são encontradas as classes de solo: Neossolo, Gleissolo, Latossolo, Argissolo e Solos Indiscriminados de Mangue. Conforme pode-se observar na Figura 7.

Figura 7 - Classes de Solos do Município de Sirinhaém-PE



Legenda

- Corpo D'água Continental
- R - Neossolo
- G - Gleissolo
- L - Latossolo
- P - Argissolo
- SM - Solos Indiscriminados de Mangue
- Limite Municipal de Sirinhaém

Sistema de Coordenadas Geográficas | Datum Geodésico: SIRGAS 2000.
Base de Dados: Zoneamento Agroecológico de Pernambuco (ZAPE, 2001)
Organização: DIAS, E. E. C.



Os Neossolos: Neossolos são solos pouco evoluídos, podem ser constituídos por material mineral ou orgânico com menos de 20 cm de espessura. É caracterizado por não possuir horizonte B diagnóstico e por apresentar insuficiência de outros atributos diagnósticos que caracterizam os diversos processos de formação dos solos (EMBRAPA, 2018). Os Neossolos também apresentam características fortes herdadas do material originário (EMBRAPA, 2006).

Os Gleissolos: Gleissolo vem do russo "gley " que significa massa do solo pastosa, com conotação de excesso de água. São solos hidromórficos, constituídos por material mineral, expresso pela forte gleização. Esses solos passam permanentemente ou periodicamente em saturação por água, o processo de gleização acarreta a manifestação de cores acinzentadas, representadas pela redução e solubilização do ferro. São solos que, em condições naturais, são mal drenados. São desenvolvidos em várzeas, planícies aluvionares, geralmente em áreas vinculadas a excesso d'água, tendo uma textura tendendo a arenosa nos horizontes superficiais. São solos com sérias limitações agrícolas, que se deve ao lençol freático elevado e ao risco de inundação e alagamentos recorrentes, porém, se drenados e corrigidos quimicamente, esses solos podem ser utilizados para pastagens, cana de açúcar, bananicultura, entre outros cultivos (ARAÚJO FILHO *et al.*, 2014; EMBRAPA, 2000a; 2018; OLIVEIRA; JACOMINE; CAMARGO, 1992).

Os Latossolos: Latossolo vem do latim "lat", tendo o significado de tijolo, sendo referente a solos muito intemperizados. São solos formados de materiais minerais, e apresentam horizonte B latossólico. Possuem uma evolução avançada com um processo expressivo de latossolização, resultado de uma intemperização intensa dos minerais primários. Esses solos possuem uma concentração relativa de argilominerais resistentes e/ou óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio (EMBRAPA, 2018; GUERRA; GUERRA, 2008).

Os Argissolos: Argissolo vem do latim "argilla", tendo o significado de argila, representando solos em processo de acumulação de argila. São solos que apresentam o horizonte B textural, com argila de alta ou baixa atividade, conjugada com uma baixa saturação por bases ou caráter alítico. Possuem uma evolução avançada e translocação de argila da parte mais superficial para a subsuperficial. Esses solos, quando localizados em áreas de relevo suave ondulado, podem permitir o desenvolvimento das raízes das plantas, por conta de sua profundidade (EMBRAPA, 2018; JATOBÁ; SILVA; GOMES, 2014; PEDRON; SAMUEL-ROSA; DALMOLIN, 2012).

Os Solos Indiscriminados de Mangue: Solos Indiscriminados de Mangue são solos halomórficos, pouco desenvolvidos, lamacentos escuros e com alto teor de sais advindos da água do mar. São formados a partir de sedimentos marinhos e fluviais com presença de matéria orgânica e ocorrem em locais de topografia plana na faixa costeira sob constante influência marinha. No geral, não apresentam diferenciação de horizontes ao longo do perfil (AGEITEC, 2011).

3.1.3 Vegetação

O município de Sirinhaém localiza-se na região fisiográfica Litoral-Mata, possuindo como cobertura nativa predominante a mata atlântica. Na região são encontradas formações florestais ombrófilas, além de manguezais e restingas (CPRH, 2021). Atualmente uma pequena parcela da vegetação nativa está presente na região, onde outrora predominava-se a presença de florestas ombrófilas e subdeciduais, atualmente foram reduzidas aos topos de morros e locais de difícil acesso onde a topografia impediu o avanço da agropecuária. A vegetação do litoral também sofreu com influência antrópica, atualmente restam poucas áreas de vegetação primitiva, as quais deram lugar a plantação de coqueiros. A vegetação do município está representada no Mapa “A” da Figura 08 onde pode-se observar que a maior parcela se dá pela agropecuária.

3.1.4 Geologia

O município de Sirinhaém está geologicamente inserido na Província Borborema, sendo constituído pelos litotipos dos Complexos Belém do São Francisco e Cabrobó. Das Suítes Leucocrática Peraluminosa e Itaporanga. Das Formações Algodais e Cabo, e dos Depósitos Aluvionares, Litorâneos e Fluviomarinhos advindos do período Quaternário (CPRM, 2005).

Segundo dados disponibilizados pelo Serviço Geológico do Brasil - CPRM (2005), o município de Sirinhaém apresenta as seguintes unidades litoestratigráficas, representadas no Mapa “B” da Figura 08:

- Q2a - Depósitos Aluvionares (Cenozóico – Quaternário)
- Q2l - Depósitos Litorâneos (Cenozóico – Quaternário)
- Qfm – Depósitos Fluviomarinhos (Cenozóico – Quaternário)
- K2ag - Formação Algodais (Mesozóico – Cretáceo)

- K1cb - Formação Cabo (Mesozóico – Cretáceo)
- NP3 2it - Suíte Itaporanga (Proterozóico – Neoproterozóico)
- MN al - Suíte Intrusiva Leucocrática Peraluminosa (Proterozóico – Mesoproterozóico)
- MP3bf - Complexo Belém do São Francisco (Proterozóico – Mesoproterozóico)
- MP3ca4 - Complexo Cabrobó - Unidade 4 (Proterozóico – Mesoproterozóico)

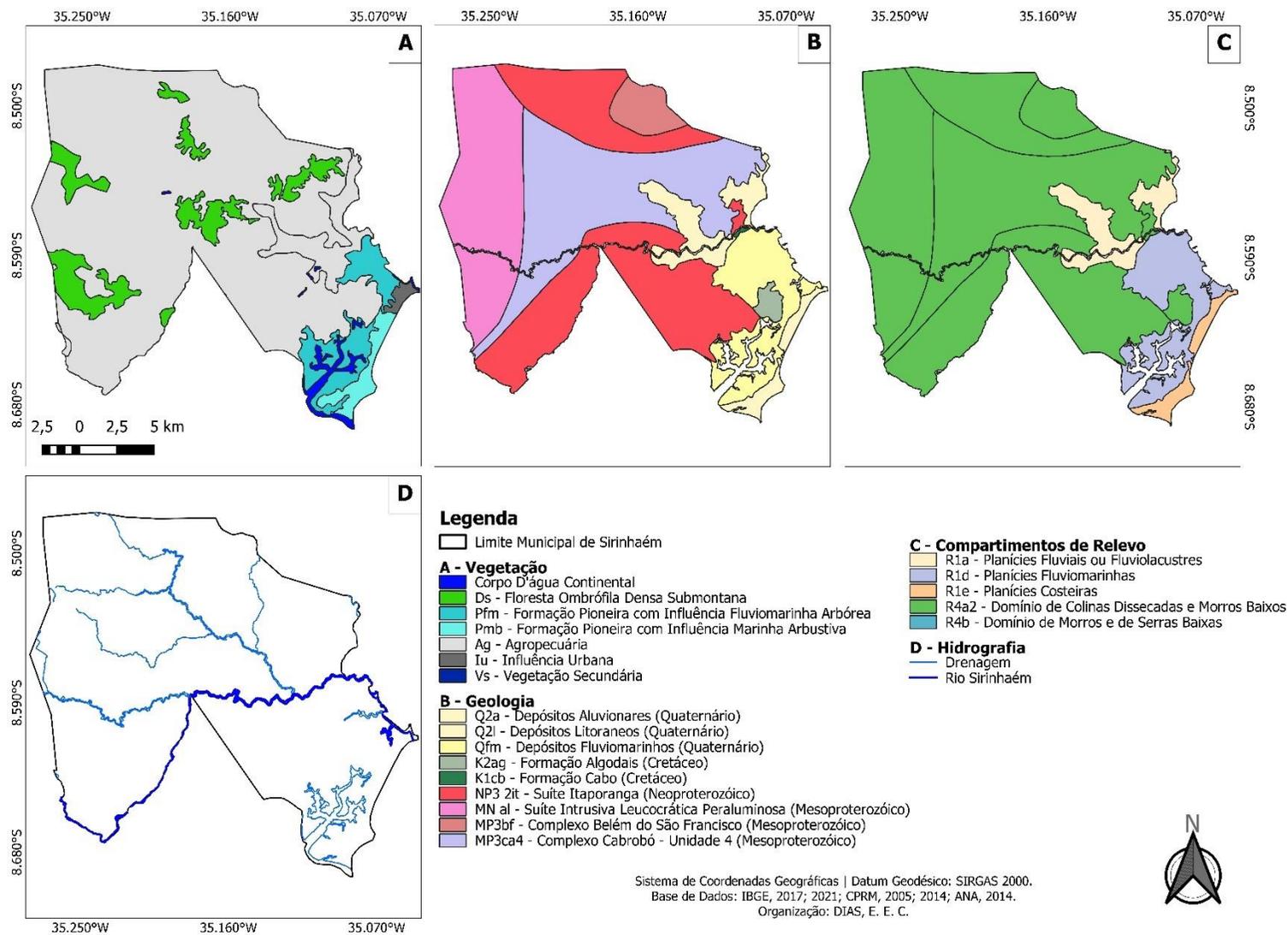
3.1.5 Relevo

O Relevo do município de Sirinhaém é formado por áreas com retrabalhamento intenso, possuindo formas bastante dissecadas e vales profundos. Na região litorânea de Pernambuco e Alagoas, é formada pelo mar de morros que antecedem o planalto da Borborema (CPRM, 2005). É possível observar os compartimentos de relevo presentes no município no Mapa “C” da Figura 8.

3.1.6 Hidrografia

O município está inserido nos domínios da Bacia Hidrográfica do Rio Sirinhaém e do grupo de bacias de pequenos rios litorâneos. O principal curso d'água que corta o município de Sirinhaém é o rio Sirinhaém, que nasce na serra do Alho, no município de Camocim de São Félix. Corta os municípios de Bonito, Barra de Guabiraba, Cortês, Ribeirão, Gameleira, Rio Formoso e Sirinhaém (CPRM, 2005). O Mapa “D” da Figura 8 ilustra os principais corpos d'água que cortam o município de Sirinhaém.

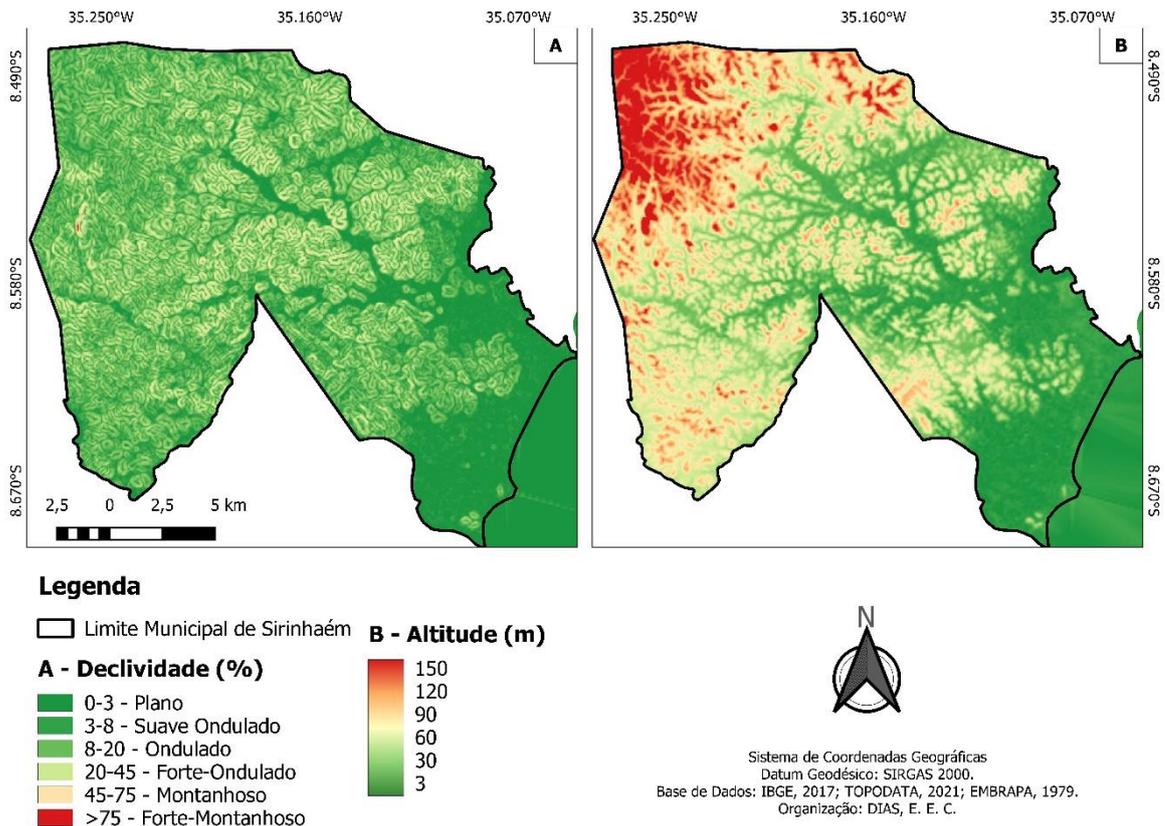
Figura 8 - Caracterização Física do Município de Sirinhaém - PE: Ilustrando a Vegetação, Geologia, Compartimentos de Relevo e Hidrografia



Fonte: Elaboração da autora. | Software: QGIS v. 3.12.3

O município apresenta ainda cotas altimétricas que variam entre 3 e 150 metros, conforme é possível visualizar na Figura 9, acompanhado de uma declividade predominante variando entre Plano – Forte-Ondulado, que confere às áreas das planícies (R1a, R1d e R1e) e das áreas colinosas e de morros e serras baixas (R4a2 e R4b).

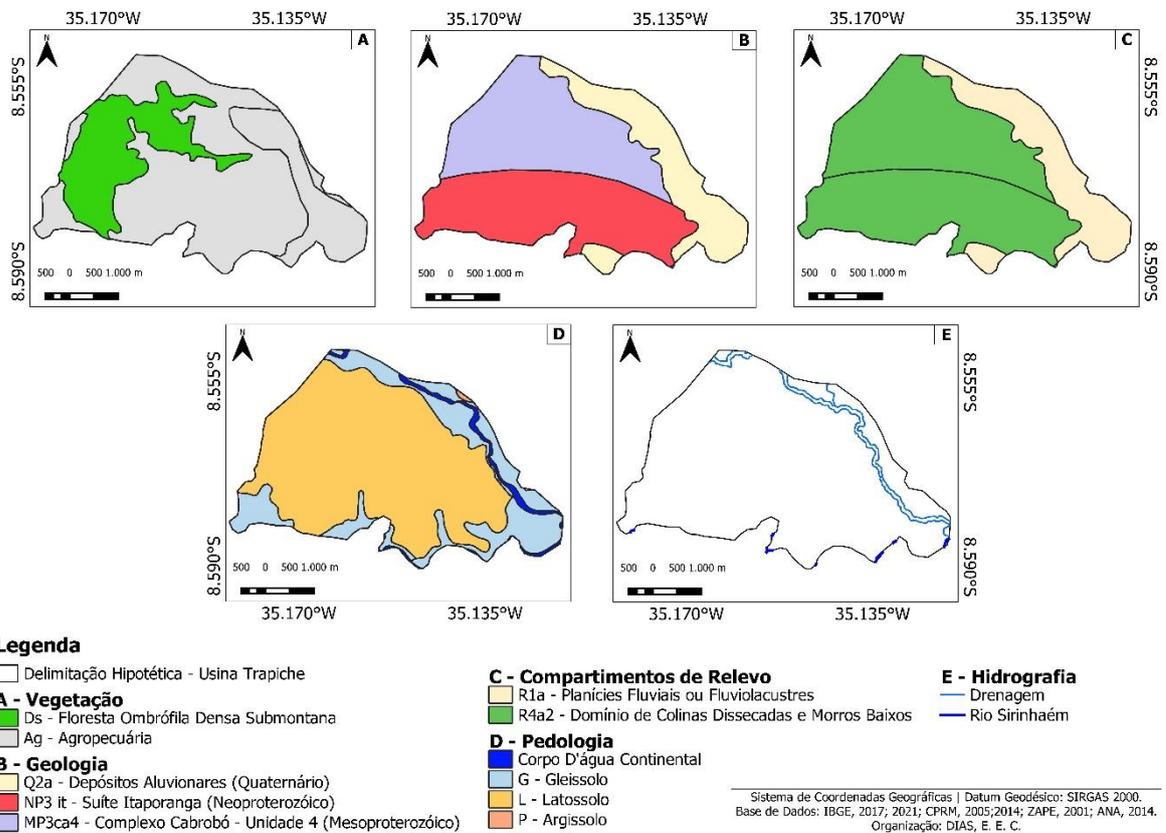
Figura 9 - Declividade e Altimetria do Município de Sirinhaém-PE



Fonte: Elaboração da autora. | *Software: QGIS v. 3.12.3*

O solo está disposto em concordância com o meio onde está localizado. Ele depende, portanto, da formação geológica-geomorfológica e climática para a sua formação. As diferentes composições e interações do ambiente dão origem a diferentes tipos de solos. Para a área de estudo, temos a presença de um Argissolo Vermelho-Amarelo, que é resultado desta interação. A Figura 10 apresenta um conjunto de mapas que representam os elementos físicos da área de estudo. Em detrimento da escala dos metadados disponíveis, alguns elementos não podem ser observados em detalhe, como é o caso do mapa pedológico (Mapa “D”), onde não é possível visualizar a classe de solo coletada nos pontos onde foram realizadas as amostragens (apresentados na Figura 10 e Tabela 7).

Figura 10 - Caracterização Física em Recorte Para a Usina Trapiche – Sirinhaém-PE: Ilustrando a Vegetação, Geologia, Compartimentos de Relevo, Pedologia e Hidrografia



Fonte: Elaboração da autora. | *Software: QGIS v. 3.12.3*

Na área de estudo ainda são encontrados resquícios de vegetação nativa (mata atlântica), encontradas, principalmente, nas áreas de topos (Mapa “A”). O Mapa B apresenta depósitos aluvionares provenientes da era cenozoica (Q2a), a unidade geológica suíte intrusiva Itaporanga proveniente da era proterozóica (NP3 it), e a unidade geológica Complexo Cabrobó advinda também da era proterozóica (MP3ca4).

A unidade geológica em que a área de coleta está inserida é a suíte intrusiva Itaporanga que possui composição litológica de rochas como granito, diorito, granodiorito e monzonito, esses tipos de rochas são compostas por minerais como quartzo, feldspato calco-sódico e feldspato plagioclásico (aluminossilicatos), piroxênio e biotita. Na área de estudo também são encontrados o Complexo Cabrobó e os depósitos aluvionares, o complexo Cabrobó é formado por quartzitos micáceos, quartzitos-feldspáticos, enquanto os depósitos são compostos por material sedimentar inconsolidado.

No Mapa “C”, identifica-se os compartimentos R1a e R4a2 que conferem, respectivamente, a planícies fluviais ou fluvialacustres e domínio de colinas dissecadas e

morros baixos. Para o mapa de solos (Mapa “D”) estão presentes às classes de solos: Gleissolo, Latossolo e Argissolo. E o Mapa “E” ilustra a drenagem, onde o Rio Sirinhaém é visto em pequenos trechos.

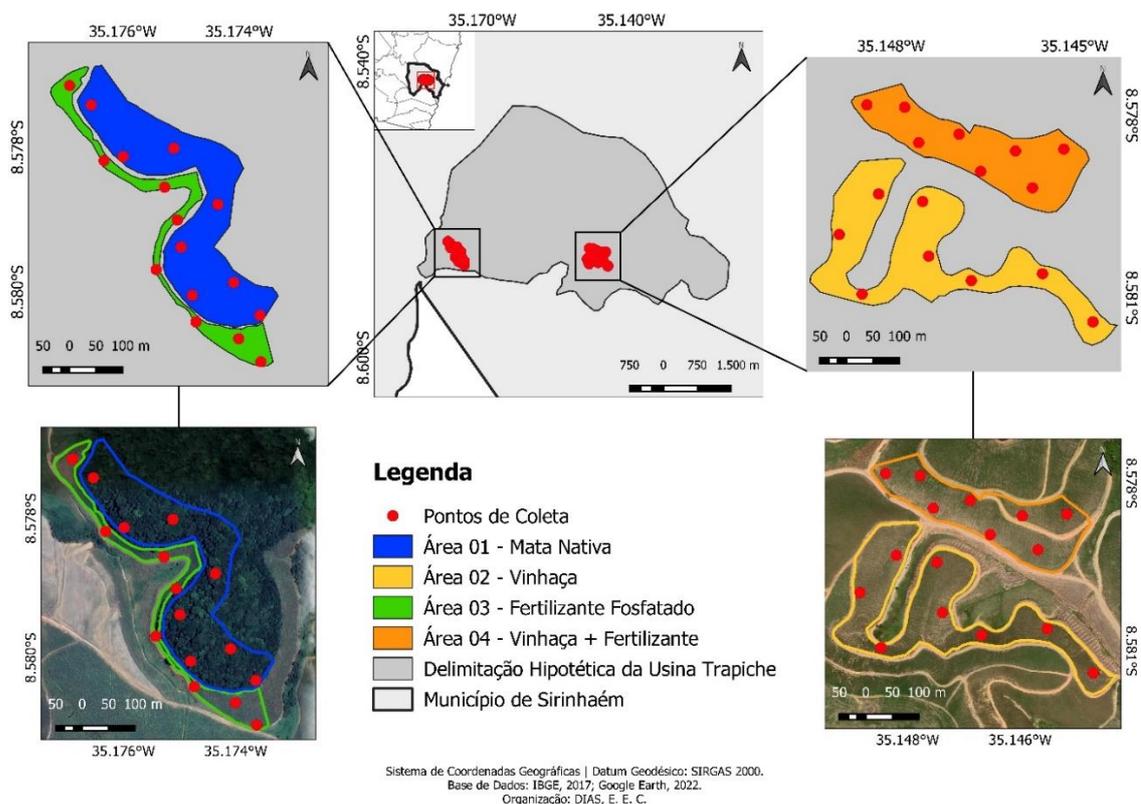
3.2 COLETA DAS AMOSTRAS DE SOLO

As coletas das amostras de solo foram realizadas em quatro áreas conforme descrito no Quadro 3, e ilustrado na Figura 11, nas camadas de 0-20 e 20-40 cm de profundidade, seguindo um transecto, acompanhando o formato da área.

Quadro 3 - Áreas de tratamento selecionadas para coleta de solo

Classificação	Tratamentos (T)	Classe de Solo
Área 01	T0 - Mata Nativa	Argissolo Vermelho-Amarelo
Área 02	T1 - Vinhaça	Argissolo Vermelho-Amarelo
Área 03	T2 - Fertilizante Fosfatado	Argissolo Vermelho-Amarelo
Área 04	T3 - Vinhaça e Fertilizante Fosfatado	Argissolo Vermelho-Amarelo

Figura 11 - Pontos em que foram coletadas as amostras de solo em quatro (4) áreas, conforme o detalhamento do Quadro 1 apresentado anteriormente



Foram coletadas amostras deformadas e indeformadas na área útil, nas camadas de 0-20 e 20-40 cm, perpendicularmente entre as linhas da cana-de-açúcar, em oito pontos, totalizando oito repetições em cada camada. A coleta foi realizada sob amostragem simples, determinadas ao acaso formando um padrão de zigue-zague à fim de realizar-se um modelo representativo para a área. Ao todo, foram coletadas 64 amostras em 32 pontos, sendo 32 amostras da camada 0-20, e 32 amostras da camada 20-40. Na Tabela 7 estão presentes as coordenadas geográficas de cada ponto coletado.

Tabela 7 - Coordenadas Geográficas dos Pontos de Amostragem

ÁREA 01 - MATA NATIVA	
Pontos de Amostragem	Coordenadas
P1	8°34'49.46"S/35°10'25.12"O
P2	8°34'47.42"S/35°10'26.73"O
P3	8°34'48.22"S/35°10'29.29"O
P4	8°34'45.21"S/35°10'29.99"O
P5	8°34'42.56"S/35°10'27.72"O
P6	8°34'39.07"S/35°10'30.44"O
P7	8°34'39.59"S/35°10'33.57"O
P8	8°34'36.38"S/35°10'35.54"O
ÁREA 02 - VINHAÇA	
P9	8°34'45.45"S/35° 8'53.53"O
P10	8°34'47.85"S/35° 8'55.85"O
P11	8°34'51.39"S/35° 8'54.51"O
P12	8°34'45.89"S/35° 8'50.94"O
P13	8°34'49.13"S/35° 8'50.58"O
P14	8°34'50.58"S/35° 8'48.07"O
P15	8°34'50.17"S/35° 8'43.88"O
P16	8°34'53.03"S/35° 8'40.92"O
ÁREA 03 - FERTILIZANTE FOSFATADO	
P17	8°34'52.34"S/35°10'25.06"O
P18	8°34'50.91"S/35°10'26.42"O
P19	8°34'49.87"S/35°10'29.06"O
P20	8°34'46.61"S/35°10'31.53"O
P21	8°34'43.53"S/35°10'30.22"O
P22	8°34'41.49"S/35°10'31.01"O
P23	8°34'39.84"S/35°10'34.75"O
P24	8°34'35.17"S/35°10'36.88"O
ÁREA 04 - VINHAÇA + FERTILIZANTE	
P25	8°34'40.17"S/35° 8'54.22"O
P26	8°34'40.31"S/35° 8'52.00"O
P27	8°34'42.41"S/35° 8'51.17"O
P28	8°34'41.91"S/35° 8'48.79"O
P29	8°34'44.11"S/35° 8'47.52"O
P30	8°34'42.90"S/35° 8'45.47"O
P31	8°34'45.08"S/35° 8'44.48"O
P32	8°34'42.79"S/35° 8'42.63"O

3.2.1 Detalhamento das Áreas de coleta:

Área 01 - Mata Nativa: A Área 01 é uma área de mata nativa residual, não recebeu alterações agrícolas e está cercada de plantação de cana de açúcar. A Área 01 foi escolhida como área controle por estar localizada ao lado da Área 03 e por possuir a mesma classe de solo, um Argissolo Vermelho-Amarelo (EMBRAPA, 2018).

Área 02 - Vinhaça: A Área 02 vem sendo cultivada com cana de açúcar por mais de 50 anos e recebe fertilização com vinhaça há mais de dez anos. Além da vinhaça, recebe Sulfato de Amônio (300 kg/ha), tendo recebido esses tratamentos na safra 2020/2021. A vinhaça é aplicada na plantação por aspersão.

Área 03 - Fertilizante Fosfatado: A Área 03 vem sendo cultivada com cana de açúcar por mais de 10 anos e vem recebendo fertilização fosfatada desde então, tendo recebido o tratamento na safra 2020/2021. O fertilizante fosfatado utilizado é o Super Simples e o MAP, sendo realizada esta aplicação no momento do plantio, bem como anualmente a cada corte da socaria. Além da fertilização fosfatada, a Área 03 recebe NPK e complexo de micronutrientes. O fertilizante fosfatado é aplicado manualmente.

Área 04 - Vinhaça + Fertilizante Fosfatado: A Área 04 vem sendo cultivada com cana de açúcar por mais de 10 anos e vem recebendo a fertilização fosfatada desde então. A aplicação é alternada por safra, onde em uma safra é aplicada a vinhaça e em outra é realizada a aplicação do fertilizante fosfatado, tendo recebido a fertilização fosfatada na safra 2020/2021 e vinhaça na safra 2021/2022. O fertilizante é o mesmo utilizado na Área 03, o Super Simples e o MAP, além desses tratamentos a Área recebe complexo de micronutrientes. A vinhaça é aplicada por aspersão e o fertilizante é aplicado manualmente.

As Figuras 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 e 19 ilustram a paisagem de cada área coletada.

Figura 12 - Aspecto da paisagem da área 01, local de mata nativa adjacente às áreas de coleta, localizada na Usina Trapiche, no município de Sirinhaém-PE.



Fonte: Arquivos da Autora.

Figura 13 - Modelo do formato da amostragem de solo num transecto em ziguezague, realizada na área 01, local de mata nativa adjacente às áreas de coleta, localizada na Usina Trapiche, no município de Sirinhaém-PE. Marcadores na cor amarela indicam os locais dos pontos de amostragem.



Fonte: Elaborado Pela Autora. Software: Google Earth Pro.

Figura 14 - Aspecto da paisagem da área 02, com plantação de cana de açúcar e tratada com vinhaça há mais de 10 anos, localizada na Usina Trapiche, no município de Sirinhaém-PE.



Fonte: Arquivos da Autora.

Figura 15 - Modelo do formato da amostragem de solo num transecto em zigue-zague, realizada na área 02, cultivada com cana de açúcar e recebendo vinhaça há mais de dez anos, localizada na Usina Trapiche, no município de Sirinhaém-PE. Marcadores na cor amarela indicam os locais dos pontos de amostragem.



Fonte: Elaborado Pela Autora. Software: Google Earth Pro.

Figura 16 - Aspecto da paisagem da área 03, tratada com fertilizante fosfatado, cuja plantação de cana de açúcar tinha sido colhida há cerca de uma semana, localizada na Usina Trapiche, no município de Sirinhaém-PE.



Fonte: Arquivos da Autora.

Figura 17 - Modelo do formato da amostragem de solo num transecto em zigue-zague, realizada na área 03, cultivada com cana de açúcar e recebendo fertilizante fosfatado há mais de dez anos, localizada na Usina Trapiche, no município de Sirinhaém-PE. Marcadores na cor amarela indicam os locais dos pontos de amostragem.



Fonte: Elaborado Pela Autora. Software: Google Earth Pro.

Figura 18 - Aspecto da paisagem da área 04, com plantação de cana de açúcar e tratada com vinhaça e fertilizante fosfatado há mais de 10 anos, localizada na Usina Trapiche, no município de Sirinhaém-PE.



Fonte: Arquivos da Autora.

Figura 19 - Modelo do formato da amostragem de solo num transecto em zigue-zague, realizada na área 04, cultivada com cana de açúcar e recebendo vinhaça e fertilizante fosfatado há mais de dez anos, localizada na Usina Trapiche, no município de Sirinhaém-PE. Marcadores na cor amarela indicam os locais dos pontos de amostragem.



Fonte: Elaborado Pela Autora. Software: *Google Earth Pro*.

3.3 ANÁLISES DOS SOLOS

3.3.1 Procedimentos pré-análise laboratorial

As amostras deformadas foram postas para secar ao ar por cerca de vinte dias. Após o processo de secagem, foram destorroadas, passadas em peneira de 2mm de malha (Figura 20) para seguir para as análises laboratoriais. As análises químicas e físicas foram realizadas no laboratório do Instituto Agrônomo de Pernambuco – IPA, no laboratório de física do solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE e no laboratório de Biomassa do Departamento de Energia Nuclear – DEN da UFPE.

Figura 20 - Amostras de solos das quatro áreas de tratamento (A1, A2, A3 e A4) antes e após destorroar e passar em peneira de 2mm de malha.



Fonte: Arquivos da Autora.

3.3.2 Análises Físicas:

3.3.2.1 Granulometria

A granulometria foi determinada de acordo com o método proposto pela EMBRAPA (2017). O método se baseia na velocidade de sedimentação das partículas que compõem o solo, quando suspensas em água após dispersão química e física.

3.3.2.2 Densidade

A densidade do solo foi determinada através do método do torrão parafinado proposto pela EMBRAPA (2017). O método consiste na obtenção da massa por pesagem bem como do volume pelo deslocamento de líquido após aplicação de parafina fundida.

3.3.3 Análises Químicas

Foram determinados K e Na por extração com Mehlich-1, Ca, Mg e Al por extração com KCl, H por extração com acetato de cálcio pH 7,0, e para determinação de pH em água. O enxofre (S) foi determinado por ataque ácido com HCl, precipitação com BaCl₂ e calcinação de BaSO₄. Todas as análises seguiram método descrito em EMBRAPA (2017). Os valores de CTC, Saturação por Bases (V) e Saturação por alumínio (m) foram calculados também de acordo com manual da Embrapa (2017).

O carbono foi quantificado de acordo com método proposto em Yeomans e Bremner (1988), adaptado por Mendonça & Matos (2005). O método consiste na oxidação por via úmida do solo, assumindo-se que todo o C contido no solo esteja em um estado de oxidação zero. O agente oxidante utilizado na metodologia é o dicromato ($Cr_2O_7^{2-}$) (*Cr VI*) em meio ácido.

Para maximizar a oxidação do C pelo dicromato, utiliza-se uma fonte externa de calor para assegurar que $\cong 100\%$ do C será oxidado. Após esse procedimento, a dosagem é feita por meio da determinação colorimétrica do Cr^{3+} formado. Os resultados da análise são calculados considerando-se que a MOS apresenta 58% de C, e então estima-se o teor da MOS multiplicando o teor de C por 1,72 (100/58), sendo este denominado o fator de Van Bemmelen (MENDONÇA; MATOS, 2005).

O fósforo inorgânico prontamente lábil foi determinado pelo método de Mehlich-1 (1953), denominado neste trabalho P-Mehlich-1, o moderadamente lábil por extração com bicarbonato de sódio, NaHCO₃ 0,5 mol L⁻¹ (Bowman e Cole, 1978), denominado P-bic, e o resistentemente lábil por extração com hidróxido de sódio, NaOH 0,1 mol L⁻¹ (EMBRAPA, 2017; ARAÚJO; SCHAEFER; SAMPAIO, 2004; 2006), denominado P-hid.

O P-Mehlich-1 está relacionado ao reservatório prontamente disponível às plantas, considerado o fósforo que está na solução do solo. O P-bic corresponde ao fósforo fracamente adsorvido aos argilominerais e que tem o potencial de repor rapidamente o fósforo na solução do solo, à medida que este vai se esgotando. O fósforo extraído por hidróxido de sódio corresponde ao P moderadamente adsorvido aos argilominerais e também tem potencial de repor fósforo na solução do solo, mas de forma mais lenta (ARAÚJO; SCHAEFER; SAMPAIO, 2003).

3.3.4 Análises Estatísticas

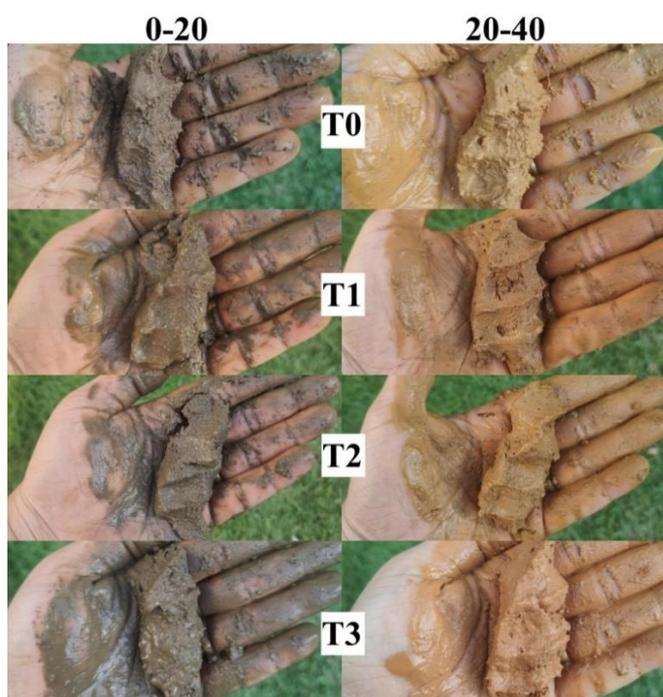
Para análise estatística, os dados foram submetidos a Análise de Variância (ANOVA) e comparados pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$) a 5% de probabilidade, para tal, foi utilizado o Software estatístico Sisvar, versão 5.6.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA ÁREA DE ESTUDO

As amostras coletadas no Argissolo Vermelho-Amarelo apresentaram diferentes resultados em detrimento ao sistema de manejo adotado para cada área de tratamento. Porém, de modo geral, a análise granulométrica indicou para as áreas uma textura de caráter argiloso, representado também no teste de campo (Figura 21). Para os resultados de densidade, T0 apresenta menores valores, com uma média de 1,19 (0-20) e 1,28 (20-40), por se tratar de uma área de mata preservada. Enquanto as áreas agrícolas (T1, T2 e T3) apresentam densidade maior com valores aproximados a 1,5 para ambas profundidades, que se deve ao uso do solo por meio da compactação advinda da mecanização e recorrente ação humana nas épocas de plantio e colheita. A densidade do solo está associada ao estado de compactação e, dependendo dos valores, pode oferecer riscos de restrição ao crescimento radicular. Para solos argilosos, de acordo com Reinert & Reichert (2006), densidades acima de 1,45 são considerados de risco para o crescimento radicular. Os resultados das análises de composição granulométrica, classe textural e densidade do solo estão dispostos na Tabela 8, que apresenta a caracterização física de acordo com o sistema de manejo (tratamentos).

Figura 21 - Teste de textura de campo - Indicando caráter argiloso para as áreas de coleta



Fonte: Arquivos da Autora.

Tabela 8 - Resultados das análises para os atributos físicos do solo sob diferentes sistemas de manejo

CAMADA 0-20							
SISTEMAS	TRATAMENTOS	COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA (%)				CLASSE TEXTURAL	DENSIDADE (g/cm ³)
		AREIA GROSSA	AREIA FINA	SILTE	ARGILA		
MATA	T0	33	14	12	41	Argilo-Arenoso	1,19
VINHAÇA	T1	38	18	16	28	Franco-Argilo-Arenoso	1,62
FERT. FOSFATADO	T2	33	20	15	32	Franco-Argilo-Arenoso	1,50
VIN. + FERT. FOSF.	T3	33	16	11	40	Argilo-Arenoso	1,49
CAMADA 20-40							
SISTEMAS	TRATAMENTOS	COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA (%)				CLASSE TEXTURAL	DENSIDADE (g/cm ³)
		AREIA GROSSA	AREIA FINA	SILTE	ARGILA		
MATA	T0	28	13	8	51	Argila	1,28
VINHAÇA	T1	30	14	13	43	Argila	1,55
FERT. FOSFATADO	T2	30	18	13	40	Argilo-Arenoso	1,50
VIN. + FERT. FOSF.	T3	28	15	11	46	Argila	1,46

4.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DA ÁREA DE ESTUDO

Solos das regiões tropicais são naturalmente ácidos em detrimento da ação climática que promove a lixiviação das bases do material originário. Com o passar do tempo, teores de alumínio podem aumentar enquanto a fertilidade diminui. A acidez do solo também pode aumentar por meio dos cultivos ou da adubação. A análise química nos informa a situação nutricional do solo, as suas eventuais deficiências bem como seus excessos. Cada atributo, ou um conjunto de atributos pode indicar o diagnóstico de determinado solo.

A área de estudo apresenta resultados condizentes para a região onde está inserida. Por se tratar de uma área com um índice pluviométrico consideravelmente alto, os solos da região vêm sofrendo com o intemperismo químico, que favorece o desenvolvimento físico (solos profundos), e desfavorece a estrutura química, especialmente para a agricultura. Outro fator de relevância a se considerar, são as áreas de monocultura que vem sendo trabalhadas há alguns séculos levando em consideração o histórico de Pernambuco com a plantação de cana de açúcar.

A área 1 - T0, área de mata nativa, é uma área preservada que não recebe cultivo. Apesar disso, se trata de uma área quimicamente empobrecida por uma conjuntura de fatores que estão relacionados a sua localização. Nos resultados descritos na Tabela 9, é possível verificar o grau de acidez do solo e a sua deficiência de bases. O pH da área está concentrado em uma média de 4,1 para a camada de 0-20 e 4,6 para a camada de 20-40. Segundo EMBRAPA (2015), quando o pH do solo está situado entre 4 e 5, indica a presença de alumínio. Os resultados obtidos para a presença de alumínio condizem com a citada referência.

É possível observar o alto teor de alumínio presente em T0. A presença de alumínio em solo de áreas agrícolas pode inibir o crescimento das raízes, bem como exercer influência na disponibilidade de outros nutrientes (EMBRAPA, 2015). Resultados obtidos no estudo de Salvador *et al.* (2000) para os nutrientes em goiabeiras, indicou que a alta concentração de alumínio reduziu a absorção de P, Ca, Mg, S, Fe e Mn. Resultados semelhantes foram descritos por Lima *et al.* (2007), em seu ensaio que indicou fitotoxicidade do alumínio em mamoneira, e que essa toxicidade foi amenizada pela adição de matéria orgânica.

Para cana de açúcar a toxicidade do alumínio não se difere. Pesquisas recentes investigam a adição de alguns elementos para a redução da toxicidade do alumínio em cana de açúcar, como é o caso do estudo conduzido por Sousa Júnior *et al.* (2017) que obteve resultados positivos com adição de silício para redução de toxicidade, e no trabalho de Sousa (2022),

indicando que o boro atenuou o efeito da toxicidade do alumínio no crescimento da cana de açúcar. Essas pesquisas indicam a preocupação com o elemento prejudicial ao desenvolvimento da planta. Outro resultado que indica a toxidez do alumínio é a saturação por alumínio (m) representada em porcentagem. Villar (2007) indica que os valores de m% são considerados baixos quando <20, altos quando estão entre 20-60, e muito altos quando estão >60. T0 apresenta valores médios de saturação por alumínio de 61,75% para a camada de 0-20 e de 52,25 para a camada de 20-40, apresentando, portanto, valores muito altos. Porém, por se tratar de uma área de mata, a mesma possui um equilíbrio natural do ecossistema, onde a vegetação ali presente não apresenta os efeitos tóxicos do alumínio.

A capacidade de troca iônica de um solo possui efeito na liberação de nutrientes e, por esse motivo, favorece a manutenção da fertilidade do solo. A Capacidade de Troca Catiônica (CTC) refere-se aos íons positivos (Ca, Mg, K, H, Al), caso a maior parte da CTC esteja relacionada aos cátions essenciais (Ca, Mg, K), o solo pode ser considerado bom para nutrição das plantas. Caso esteja relacionada aos cátions com potencial tóxico (H, Al), o solo pode ser considerado pobre (EMBRAPA, 2010). As concentrações das bases indicam o grau de intemperização dos solos, de modo que quanto maior o grau de intemperização, menores são os teores de bases trocáveis. EMBRAPA (2015) destaca que para solos intemperizados boa parte da CTC vem da matéria orgânica, que é o caso para T0, que possui CTC média de 12,85 para a camada de 0-20, e 8,37 para a camada de 20-40 e MOS de 3,62% para 0-20 e 1,99% para 20-40.

Além da CTC, são considerados outros parâmetros para avaliar a fertilidade de um determinado solo. São eles: A soma de bases e a saturação por bases (V). A soma de bases é a junção dos cátions trocáveis (Ca, Mg, K) com exceção dos íons H e Al. E a V é relativa à proporção da CTC ocupada pelas bases, ou seja, esse parâmetro se refere a quantos por cento de cargas negativas estão ocupados por Ca, Mg, K, em comparação aos ocupados por H e Al (EMBRAPA, 2015; VILLAR, 2007). Os resultados para a V são excelentes indicativos para a fertilidade do solo e ela é utilizada, inclusive, como complemento da nomenclatura na classificação de solos em:

Solos Eutróficos (férteis) = $V \geq 50\%$

Solos Distróficos (pouco férteis) = $V < 50\%$

T0 apresenta baixas concentrações médias de bases. Para 0-20: Ca: 0,31; Mg: 0,80; Na: 0,04; K: 0,04. E em 20-40: Ca: 0,33; Mg: 0,75; Na: 0,28; K: 0,01. E V% de 9,75 para 0-20 e 13,50 para 20-40. Esses resultados apontam o grau de intemperização para a área, bem como destaca o caráter distrófico do solo.

Os resultados obtidos para T0 são parâmetros na comparação de eficácia dos demais tratamentos, pois, considera-se que, caso não ocorresse as alterações de uso da terra ao longo dos anos, esses solos se encontrariam com resultados semelhantes a T0. A Tabela 9, expõe a caracterização química das áreas de tratamento, bem como os resultados da análise estatística das citadas áreas.

Tabela 9 - Resultados das análises estatísticas para os atributos químicos do solo sob diferentes sistemas de manejo

CAMADA 0-20														
SISTEMAS	TRATAMENTO	pH	Ca	Mg	Na	K	Al	H	S	CTC	C	MOS	V	m
		H ₂ O	----- <i>cmol/dm³</i> -----							----- <i>g/kg</i> -----		----- % -----		
MATA	T0	4,10 C	0,31 C	0,80 B	0,04 A	0,04 B	1,93 A	9,69 A	1,22 C	12,85 A	21,02 A	3,62 A	9,75 C	61,75 A
VINHAÇA	T1	6,40 A	5,40 A	1,26 A	0,04 A	0,39 A	0,01 C	3,48 C	7,11 A	10,62 B	16,03 B	2,76 B	68,00 A	0,25 C
FERT. FOSFATADO	T2	5,05 B	1,50 BC	1,07 AB	0,02 B	0,04 B	0,66 B	5,57 B	2,7 BC	8,92 B	12,35 B	2,13 B	31,75 B	21,87 B
VIN. + FERT. FOSF.	T3	5,71 AB	2,78 B	0,95 AB	0,02 B	0,45 A	0,28 BC	4,4 BC	4,22 B	8,92 B	11,71 B	2,01 B	46,75 B	8,62 BC
<i>COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)</i>		12,34	41,21	24,94	32,59	91,8	45,93	26,25	30,13	13,45	21,84	21,88	35,39	44,70
CAMADA 20-40														
SISTEMAS	TRATAMENTO	pH	Ca	Mg	Na	K	Al	H	S	CTC	C	MOS	V	m
		H ₂ O	----- <i>cmol/dm³</i> -----							----- <i>g/kg</i> -----		----- % -----		
MATA	T0	4,62 B	0,33 C	0,75 B	0,28 A	0,01 B	1,24 A	6,00 A	1,12 C	8,37 A	11,59 A	1,99 A	13,50 C	52,25 A
VINHAÇA	T1	6,07 A	2,53 A	1,16 A	0,27 A	0,37 A	0,11 C	3,07 C	4,12 A	7,31 A	8,54 B	1,47 B	56,87 A	3,62 C
FERT. FOSFATADO	T2	4,75 B	0,80 BC	0,77 B	0,01 A	0,02 B	0,98 AB	4,74 B	1,60 BC	7,35 A	9,37 AB	1,61 AB	22,62 BC	37,75 AB
VIN. + FERT. FOSF.	T3	5,10 B	1,30 B	1,01 AB	0,02 A	0,25 A	0,66 BC	4,04 BC	2,61 B	7,31 A	7,36 B	1,26 B	35,75 B	22,00 BC
<i>COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)</i>		9,77	52,92	23,02	41,92	85,35	55,13	19,42	34,69	12,68	20,16	20,17	34,5	47,00

* Letras maiúsculas diferentes na mesma coluna indicam diferença estatística pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$), letras maiúsculas idênticas na mesma coluna não apresentam diferenças significativas entre si (resultados referentes a mesma profundidade) | Siglas: pH - potencial hidrogeniônico; Ca - Cálcio; Mg - Magnésio; Na - Sódio; K - Potássio; Al - Alumínio; H - Hidrogênio; S - Enxofre; CTC - Capacidade de Troca de Cátions; C - Carbono; MOS - Matéria Orgânica do Solo; V - Saturação por bases; m - Saturação por alumínio

Como foi possível observar para os dados de T0, o uso de fertilizantes em áreas agrícolas se faz necessário pois se trata de uma relação indissociável, visto que boa parte dos nutrientes são perdidos via lixiviação, os mesmos precisam ser repostos para garantir o desenvolvimento da planta. Lopes e Guilherme (2007) destacam que a cada tonelada de fertilizante mineral aplicado em um hectare equivale à produção de quatro novos hectares sem adubação. A fertilização é uma questão de segurança alimentar no Brasil e no mundo, e a vinhaça, como fonte de fertilização orgânica, apresenta resultados positivos quando comparados com as demais áreas de tratamento.

A área 02 - T1, cultivada com cana de açúcar há mais de 50 anos e recebendo fertilização de vinhaça há mais de 10 anos, se sobressai quando comparada com as demais áreas de tratamento (T2 e T3), e apresenta maiores valores de pH para ambas profundidades, maiores índices de bases trocáveis, menores teores para Al e m%, além de apresentar um caráter eutrófico com $V = 68\%$ para 0-20, e $V = 56,87\%$ para 20-40. Esses fatores também foram observados no trabalho de Tavares (2016) em seu ensaio conduzido em um Argissolo da zona da mata pernambucana, que indicou o destaque de áreas tratadas com vinhaça em relação a áreas que não receberam vinhaça, bem como nos estudos de Canellas *et al.* (2003), Barros *et al.* (2010) e Altoé (2021) que, de maneira geral, indicaram que adição de vinhaça alterou as propriedades do solo proporcionando melhoria na fertilidade do solo.

Para a melhor visualização das diferenças entre os resultados das análises em diferentes sistemas de manejo, foram elaborados gráficos (Figuras 22, 23, 24 e 25) a partir das análises obtidas, expostos a seguir:

Figura 22 - Índices de pH, Ca, Mg, Na, K, Al, H, S, CTC, C e MOS expressos em gráfico para os diferentes sistemas de manejo - Camada de 0-20

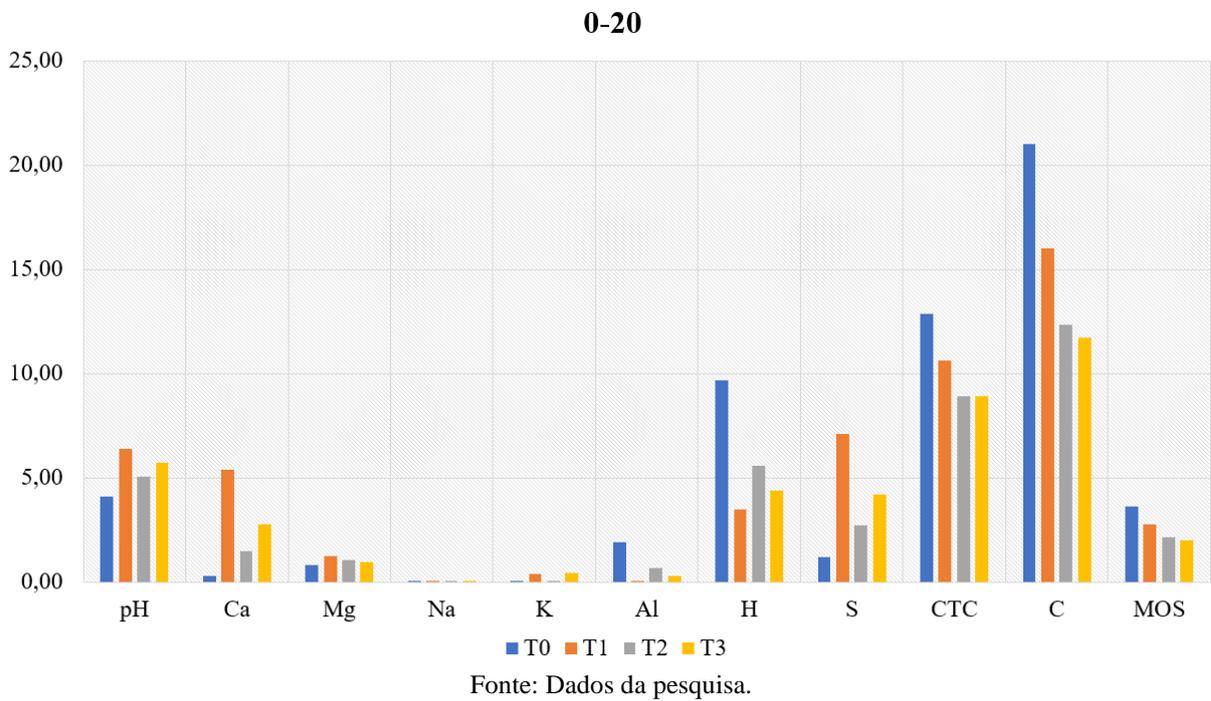


Figura 23 - Índices de pH, Ca, Mg, Na, K, Al, H, S, CTC, C e MOS expressos em gráfico para os diferentes sistemas de manejo - Camada de 20-40

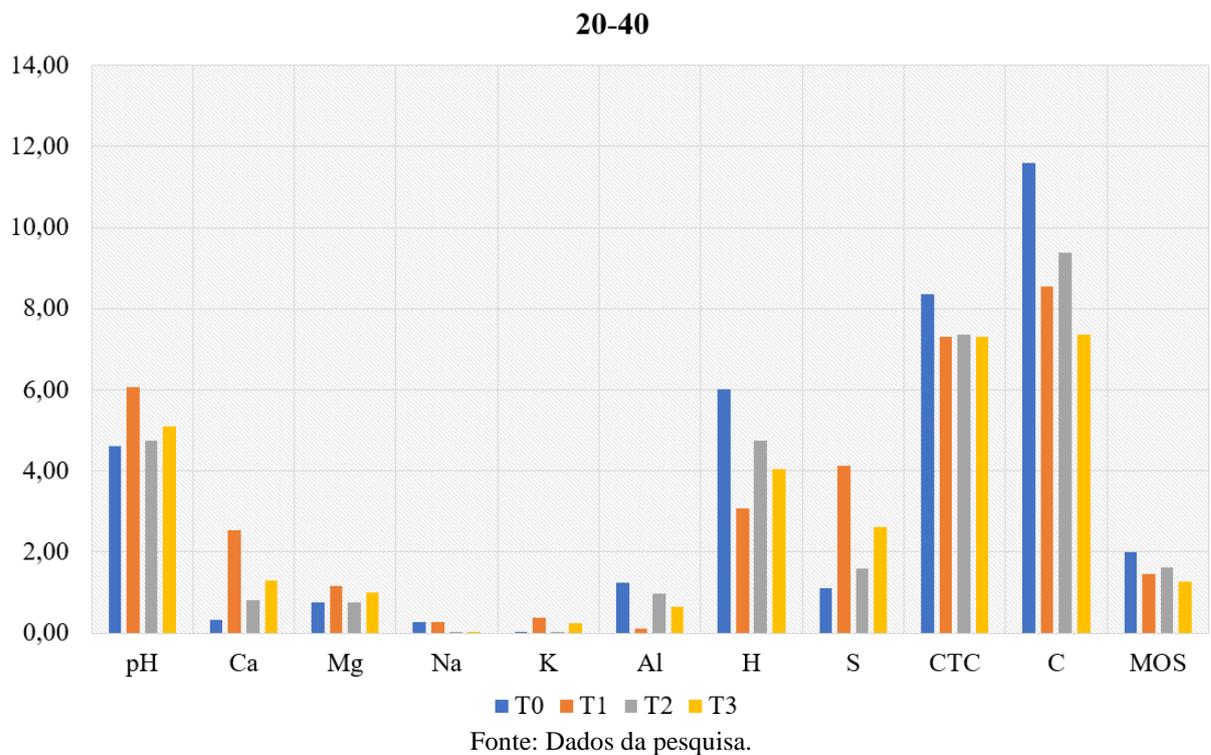


Figura 24 - Valores de V e m expressos em gráfico para os diferentes sistemas de manejo - Camada de 0-20

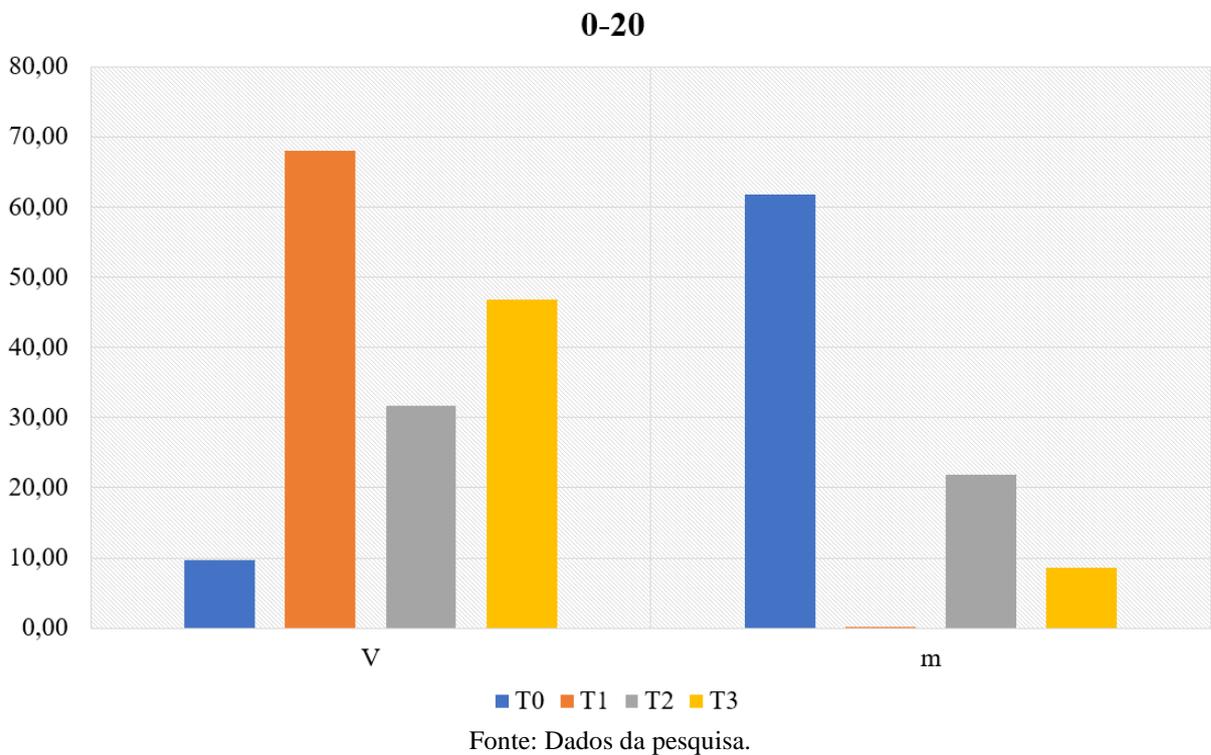
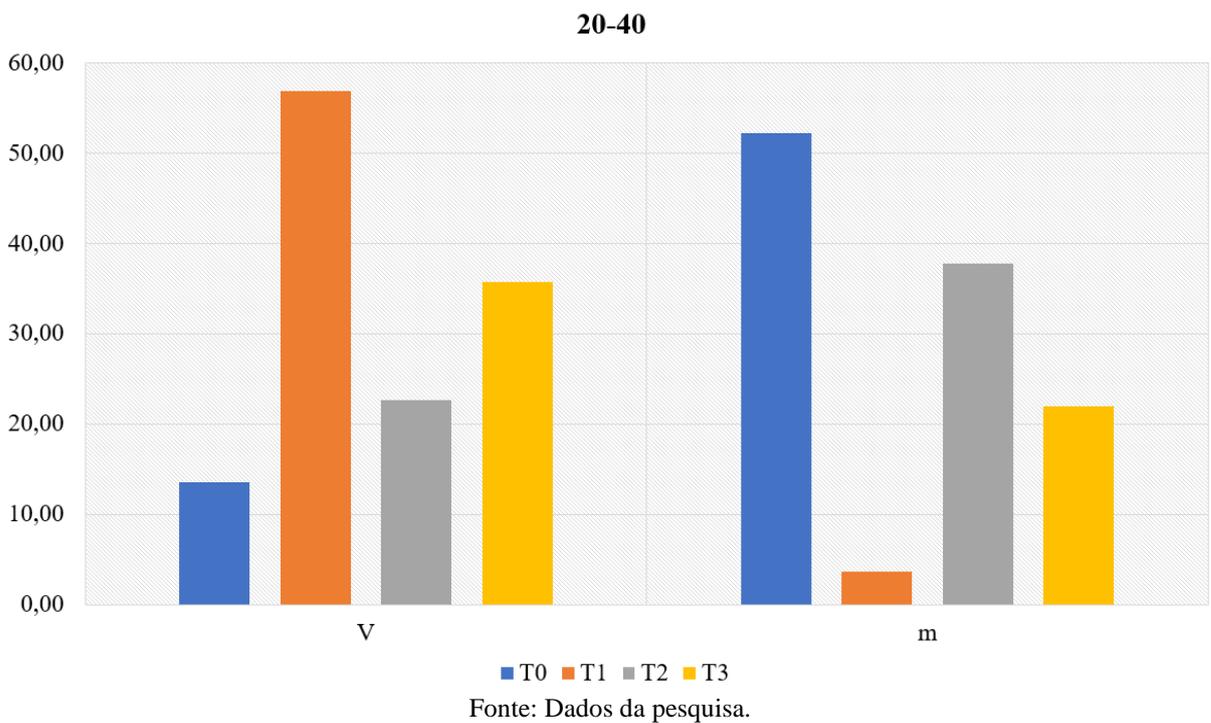


Figura 25 - Valores de V e m expressos em gráfico para os diferentes sistemas de manejo - Camada de 20-40



Na observação dos gráficos é possível visualizar inicialmente que o eixo Y (vertical) para as camadas de 20-40 são menores em resposta aos menores valores adquiridos para esta camada. É natural que as camadas mais inferiores do solo estejam com valores mais estáveis, visto que os fenômenos ocorrem principalmente nas camadas superiores, inclusive ao que diz respeito a ação dos sistemas de manejo adotados para cada área.

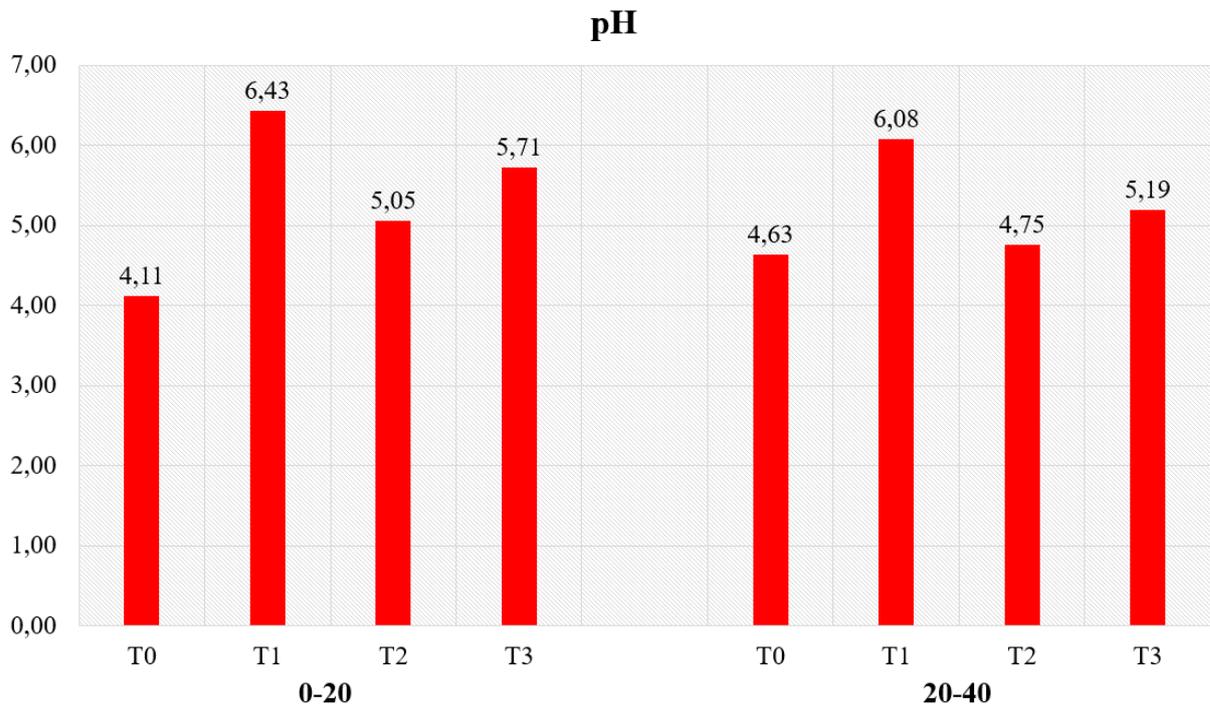
4.3 EFEITO DOS DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO NO ELEMENTO P

Como explanado anteriormente, os solos das regiões de clima tropical possuem alta intemperização que favorece o empobrecimento químico, causando a baixa fertilidade nos solos. Porém, além das deficiências naturais, o macronutriente P apresenta, ainda, especificidades quanto a sua dinâmica no solo.

A retenção do P no solo ocorre, principalmente, pela adsorção do P em solução com formas iônicas de Fe e Al, presentes em grandes quantidades em solos tropicais intemperizados (NOVAIS; SMYTH; NUNES, 2007). Esse fato limita a produtividade agrícola nessas localidades, pois, com o passar do tempo o processo vai se intensificando, como foi bem observado nos resultados obtidos para T0, e necessita de grandes quantidades de fertilizantes.

Alguns elementos da análise química nos permitem interpretar a situação do solo para entender a dinâmica do P no solo, um deles é o pH. Estando equilibrado (entre 6 e 7), as cargas superficiais das partículas que compõem o pH do solo aumentam a repulsão entre o fosfato e a superfície adsorvente diminuindo o potencial de adsorção deste elemento. Desse modo, níveis mais baixos de pH favorecem esse tipo de reação que promove a fixação do P. Na Figura 26, podemos observar isoladamente os valores do pH para os diferentes sistemas de manejo em ambas profundidades.

Figura 26 - Valores de pH para as profundidades de 0-20 e 20-40 para os diferentes sistemas de manejo

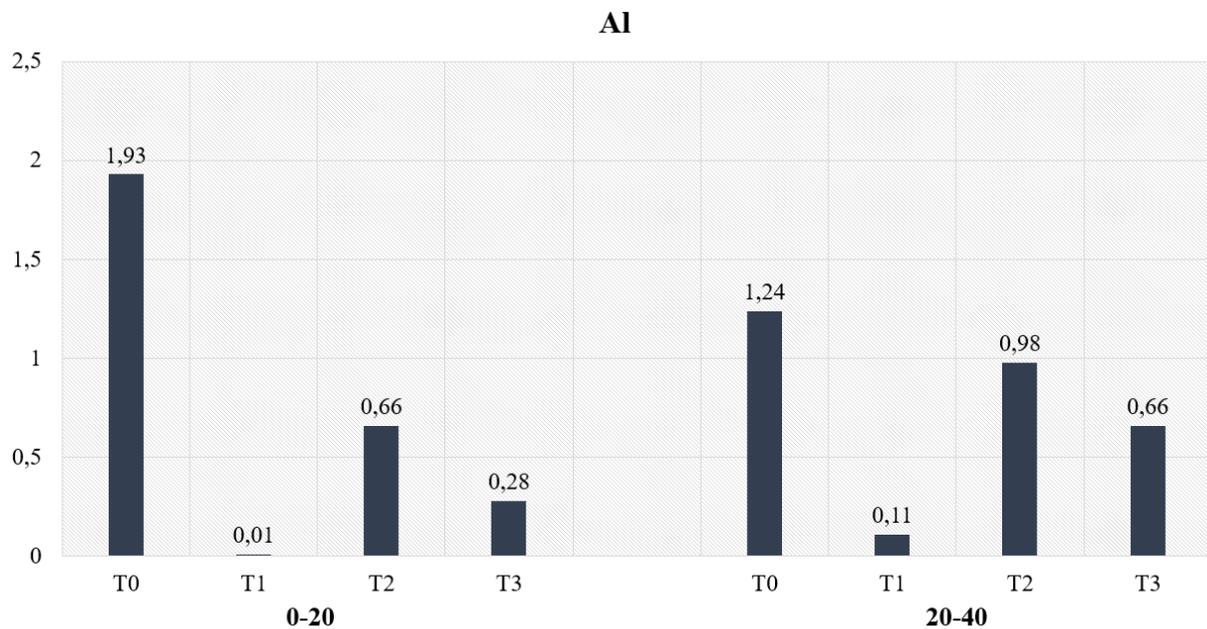


Fonte: Dados da pesquisa

Os dados observados na Figura 26 apresentam melhores níveis de pH na manutenção do P em solução para T1, tendo em vista que os níveis mais baixos de pH promovem a adsorção do P. Maia e Ribeiro (2004) realizando estudos em um Argissolo Amarelo no município de Coruripe – Alagoas, verificaram que os solos tratados com vinhaça tiveram seus níveis de pH elevados, conferindo com os resultados obtidos.

Outro elemento que é ideal que esteja em níveis menores no solo é o Al, pois além de ser tóxico para o cultivo agrícola, também é um elemento que promove a adsorção do P. Os valores obtidos para o Al estão ilustrados na Figura 27, onde podemos observar menores índices de Al para T1 e para T3, que também é uma área que recebe vinhaça.

Figura 27 - Valores de Al para as profundidades de 0-20 e 20-40 para os diferentes sistemas de manejo



Fonte: Dados da pesquisa

Em sistemas naturais, onde não ocorre a adição de fertilizantes fosfatados, como é o caso de T0, a disponibilidade de P está relacionada à ciclagem de formas orgânicas do P (SANTOS; GATIBONI; KAMINSKI, 2008). Em solos mais intemperizados, em especial para áreas de monocultura, a disponibilidade do P depende das fertilizações realizadas. A vinhaça utilizada na Usina Trapiche, que é uma forma de fertilização orgânica, é advinda do melaço, a análise da vinhaça foi disponibilizada pela usina e está disposta na Tabela 10.

Tabela 10 - Análise da vinhaça utilizada na usina trapiche

Parâmetros (mg/L)	Resultados
COT	14.760
DBO	4.500
N	583
P	103
K	4.608
Ca	1.323
Mg	496

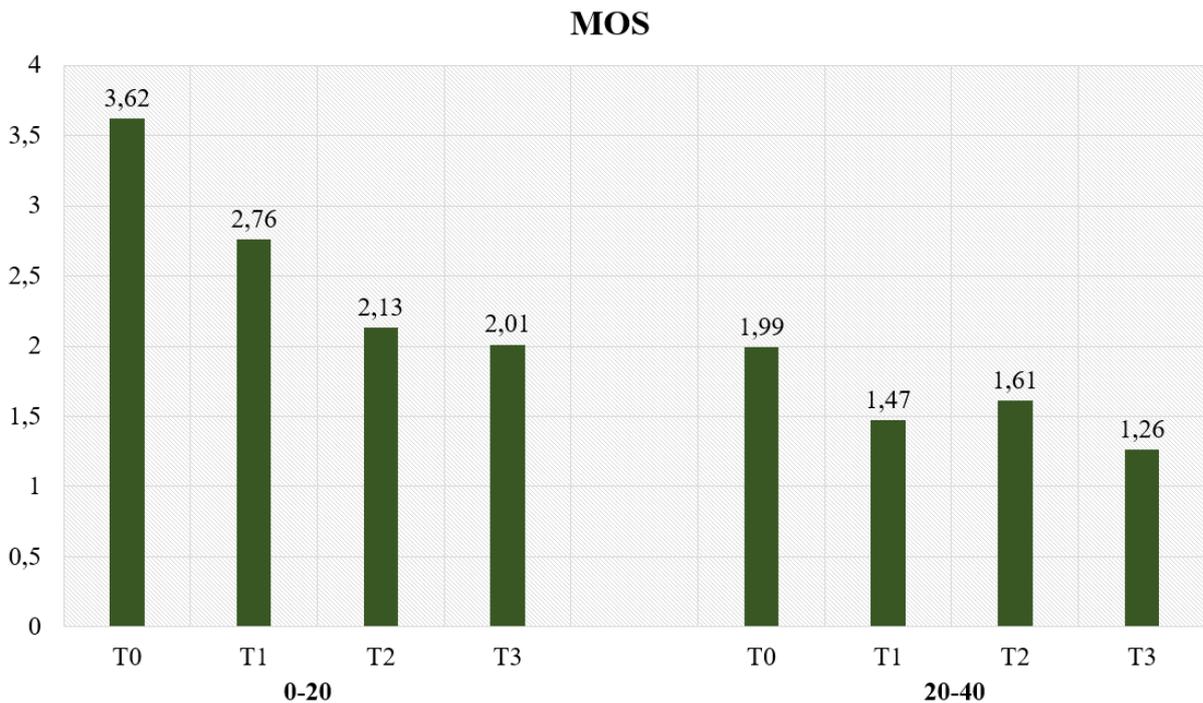
*COT - Carbono Orgânico Total; DBO - Demanda Bioquímica por Oxigênio;
N - Nitrogênio; P - Fósforo; K - Potássio; Ca - Cálcio; Mg - Magnésio.*

Fonte: Dados fornecidos pela Usina Trapiche | Data da análise: 11/10/2021.

Pode-se verificar na Tabela 6 que a vinhaça possui altos níveis de matéria orgânica, embora mantenha o pH entre 6-7, de modo que tem potencial de ajudar a aumentar a labilidade do P no solo (VILLAR, 2007). Em estudo conduzido por Melo e Mendonça (2019) em um Latossolo Vermelho de textura argilosa, verificou-se que a labilidade de P aumentou conforme a presença de maiores teores de matéria orgânica, provavelmente por um aporte de P via matéria orgânica ou por interação desta com formas de P no solo de baixa labilidade.

Na Figura 28 pode-se observar a diferença dos teores da MOS nos diferentes sistemas de manejo. Vale destacar, que é natural menores valores da MOS nas camadas inferiores, visto que a camada superior é a que recebe direta influência do ambiente, em especial para T0, área de mata, e para T1, que recebe vinhaça.

Figura 28 - Valores de MOS para as profundidades de 0-20 e 20-40 para os diferentes sistemas de manejo



Fonte: Dados da pesquisa

Por meio dos seus teores de matéria orgânica, quando incorporada ao solo, a vinhaça promove o aumento da atividade biológica, fato que estabiliza o pH do solo devido à proliferação bacteriana (SILVA; GRIEBELER; BORGES, 2007). Esse processo decerto cria subsídio para manter o P disponível por mais tempo na solução do solo. Os resultados para o P

inorgânico prontamente lábil (P-Mehlich-1), moderadamente lábil (P-bic) e o resistentemente lábil (P-hid) estão dispostos na Tabela 11, juntamente com os resultados da análise estatística.

Tabela 11 - Teores de fósforo no solo com diferentes graus de labilidade sob diferentes sistemas de manejo

CAMADA 0-20				
SISTEMAS	TRATAMENTO	P-Mehlich-1	P-bic	P-hid
		----- mg kg ⁻¹ -----		
MATA	T0	1,4 B	1,3 B	5,02 A
VINHAÇA	T1	7,0 A	8,6 A	11,28 A
FERT. FOSFATADO	T2	4,5 AB	12,53 A	14,41 A
VINHAÇA + FERT. FOSF.	T3	1,9 B	6,9 AB	13,08 A
<i>COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)</i>		63,34	60,40	78,83
CAMADA 20-40				
SISTEMAS	TRATAMENTO	P-Mehlich-1	P-bic	P-hid
		----- mg kg ⁻¹ -----		
MATA	T0	1,00 B	2,22 A	7,32 A
VINHAÇA	T1	1,87 A	9,69 A	11,09 A
FERT. FOSFATADO	T2	1,50 AB	9,43 A	9,72 A
VINHAÇA + FERT. FOSF.	T3	1,12 B	3,96 A	8,84 A
<i>COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)</i>		32,96	94,54	56,91

* Letras maiúsculas diferentes na mesma coluna indicam diferença estatística pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$), letras maiúsculas idênticas na mesma coluna não apresentam diferenças significativas entre si (resultados referentes a mesma profundidade). P-Mehlich-1 - Fósforo lábil extraído pela solução de Mehlich-1, relacionado ao P na solução do solo; P-bic - Fósforo lábil, extraído com bicarbonato de sódio; P-hid - Fósforo moderadamente lábil, extraído com hidróxido de sódio.

Os teores de fósforo prontamente lábil a resistentemente lábil foram de forma geral, muito baixos, nas duas profundidades, como é o comum em solos brasileiros, já muito intemperizados. O valor de fósforo prontamente lábil é considerado alto quando está acima de 15 mg kg⁻¹, médio entre 10 e 15 mg kg⁻¹, e baixo, menor que 10 mg kg⁻¹ (EMBRAPA, 2000b).

Na área de mata, onde o fósforo presente é o natural do solo, isto é, onde não houve qualquer aporte externo do nutriente, os valores foram muito baixos, em qualquer das formas extraídas. No caso do P-Mehlich-1, que é a forma mais lábil, em solos de textura média e argilosa, caso dos solos estudados, fósforo extraído por Mehlich-1 está muito abaixo de 10 mg kg⁻¹, indicando a pobreza do solo neste nutriente.

Nas áreas onde houve aporte externo de fósforo, seja por aplicação de vinhaça ou de fertilizante, os teores de P-Mehlich-1 aumentaram um pouco, mas ainda na faixa considerada baixa para fósforo com este extrator. Na camada de 0-20 cm, que é a profundidade onde são aplicados os adubos, houve um pequeno acréscimo com vinhaça e fertilizante aplicados

separados, mas não quando estes são aplicados juntos, sugerindo que a vinhaça pode estar interferindo negativamente na solubilidade do fertilizante. No caso de P-bic e P-hid, fósforo moderadamente lábil e resistentemente lábil, houve uma tendência de aumento e apresentaram valores compatíveis com as faixas mais baixas encontradas em outros estudos, que apresentaram P-bic entre de 0,8 e 114 mg kg⁻¹ de P e P-hid entre 1,5 a 212 mg kg⁻¹ de P, determinados em diversas classes de solo de Pernambuco (ARAÚJO; SALCEDO, 1997; SILVEIRA; ARAÚJO; SAMPAIO, 2006). Como a vinhaça e o fertilizante fosfatado geram um aporte de fósforo para o solo, é possível que parte do acúmulo deste aporte no solo esteja ocorrendo nas formas orgânicas obtidas com estes extratores, que não foram determinadas neste estudo.

Os resultados da análise estatística apresentaram significância para o P-Mehlich-1 para T1 e T2 em ambas as camadas, o que indica um efeito da vinhaça semelhante ao do fertilizante, seja pelo aporte de P ao solo ou por ter um efeito na liberação de P fixado ao solo. Este é um resultado positivo pois tem o potencial de promover a redução do uso de fertilizantes fosfatados tendo em vista a sua vulnerabilidade na natureza.

Para a fração moderadamente lábil, na camada de 0-20 cm, T1, T2 e T3 apresentam significância. Porém na camada de 20-40 cm isto não ocorreu. Fósforo é um elemento imóvel no solo e em camadas mais profundas onde não é aplicado fertilizante, as pequenas variações nas formas de fósforo não são perceptíveis pelas análises convencionais. Para a fração moderadamente lábil, em ambas as camadas os diferentes sistemas de manejo não apresentam diferenças significativas.

Na camada de 0-20 cm, o P nos diversos níveis de labilidade, em geral, destaca-se o tratamento com fertilizante fosfatado em relação ao valor de referência (Figura 29), e na camada de 20-40 cm, os maiores valores estão no tratamento com vinhaça (Figura 30), mas muito próximo do tratamento com fertilizante, confirmando o potencial do uso da vinhaça como um complemento da fertilização fosfatada.

Figura 29 - Valores de P para a profundidade de 0-20 para os diferentes sistemas de manejo

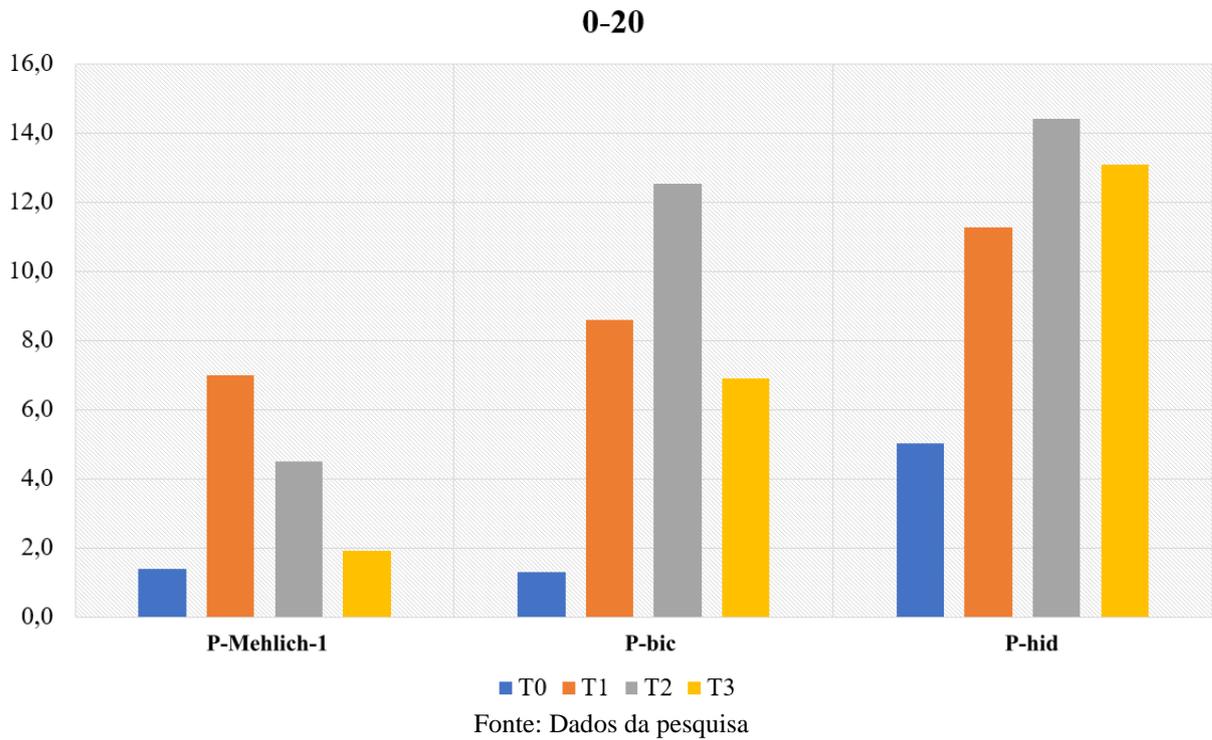
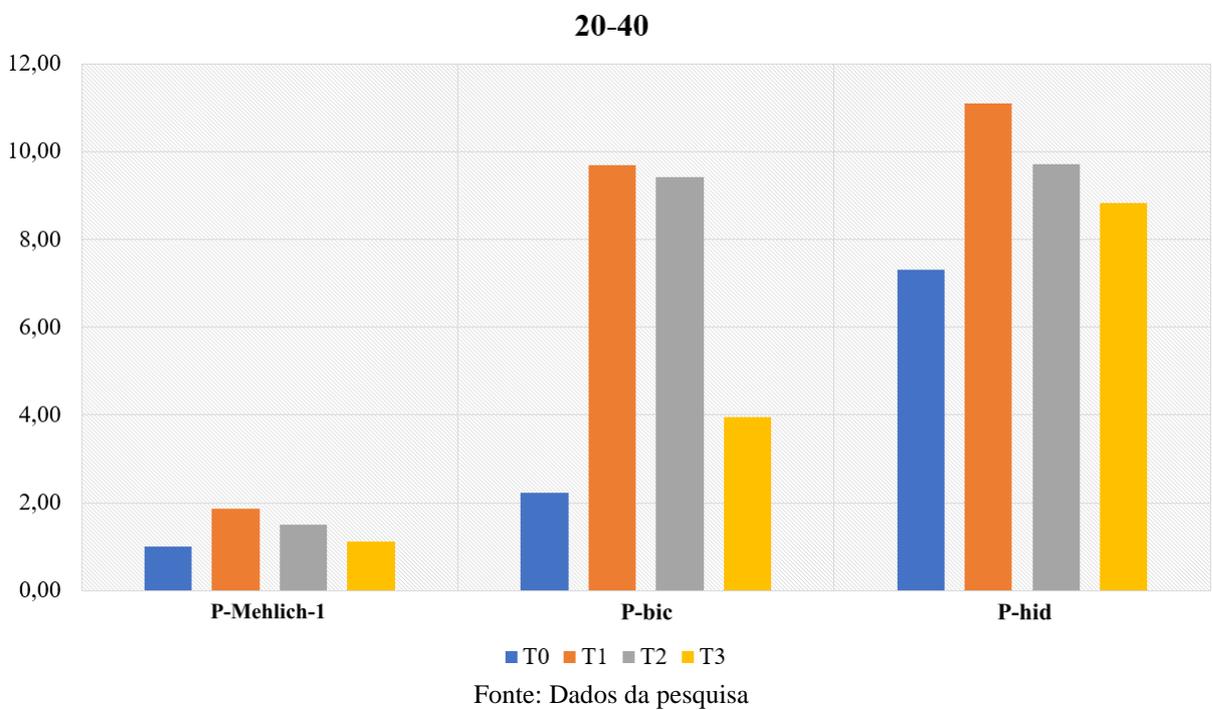


Figura 30 - Valores de P para a profundidade de 20-40 para os diferentes sistemas de manejo



5 CONCLUSÕES

- A aplicação de vinhaça proporcionou aportes de P para a fração prontamente lábil em relação ao valor de referência, sendo inclusive mais alto que no tratamento com aplicação de fertilizante. Como o aporte de P do fertilizante é maior que o da vinhaça, o aumento no P prontamente lábil advindo da vinhaça pode ter ocorrido por um efeito desta nas formas menos lábeis, liberando fósforo para a solução do solo. Esta é uma hipótese que deve ser testada em estudos posteriores.
- Os aportes de P nas diversas frações lábeis, em relação aos valores de referência foram muito pequenos, correspondendo às faixas mais baixas do encontrado em diversas classes de solo de Pernambuco. Entretanto, parte deste aporte pode estar sendo acumulado na forma orgânica, que não foi medido neste estudo.
- A área que recebe apenas o tratamento com vinhaça apresentou resultados para os atributos de fertilidade do solo similares aos do tratamento com fertilizante, sugerindo que a vinhaça tem o potencial de ser usada como um condicionador para melhoria da fertilidade do solo e diminuir custos com fertilizantes fosfatados. Além disso, incentiva sua maior utilização na agricultura, evitando o seu descarte inadequado no meio ambiente, que acarreta degradação dos recursos naturais, fato que ainda hoje ocorre apesar de existir legislação regulamentando seu descarte.

REFERÊNCIAS

- AGEITEC - Agência Embrapa de Informação Tecnológica. **Solos Indiscriminados de Mangues**. 2011. Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/territorio_mata_sul_pernambucana/arvore/CONT000gt7eon7j02wx7ha087apz2c3xd0d.html. Acesso em: novembro de 2021.
- ALLEN, B. L.; HAJEK, B. F. Mineral occurrence in soil environments. In: DIXON, J. B.; WEED, S. B. (Eds.) **Minerals in soil environments**. 2. ed. Madison: Soil science society of america. 1989.
- ALTOÉ, M. E. **Avaliação da fertilidade e efeito da aplicação de vinhaça nas propriedades químicas do solo cultivado com cana-de-açúcar**. Dissertação (mestrado em geociências e meio ambiente) UNESP - Rio Claro, SP. 2021.
- ANDRADE, M. C. Espaço e tempo na agroindústria canavieira de Pernambuco. **Estudos Avançados**. v. 15 (43), 2001.
- ARAÚJO FILHO, J. C.; ARAÚJO, M. S. B.; MARQUES, F. A.; LOPES, H.L. Solos. In: TORRES, F. S.; PFALTZGRAFF, P. A. S. (Org.). **Geodiversidade de Pernambuco**. 1ed. Recife: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2014, v., p. 109-138.
- ARAÚJO, M. S. B.; SCHAEFER, C. E. G. R.; SAMPAIO, E. V. S. B. Frações de fósforo após extrações sucessivas com resina e incubação, em Latossolos e Luvisolos do semi-árido de Pernambuco. **R. Bras. Ci. Solo**, 28:259-268, 2004.
- ARAÚJO, M. S. B.; SCHAEFER, C. E. R.; SAMPAIO, E. V. S. B. Plant Phosphorus Availability in Latosols and Luvisols from Northeastern Semi-arid Brazil. **Communications in soil science and plant analysis**, Estados Unidos, v. 34, n.3 & 4, p. 407-425, 2003.
- ARAÚJO, M. S. B.; SCHAEFER, C. E.; SAMPAIO, E. V. S. B. O processo de formação dos Espodosolos e o transporte de fósforo associado. **Revista de Geografia (Recife)**, v. 23, p. 53-64, 2006.
- ARAÚJO, M. S. B; SALCEDO, I. H. Formas preferenciais de acumulação de fósforo em solos cultivados com cana-de-açúcar na região nordeste. **R. bras. Ci. Solo**, Viçosa, 21:643-650, 1997.
- ASSENCIO, C. Crime ambiental: Usina de cana-de-açúcar é multada em R\$ 240 mil por despejo de vinhaça em afluente do Rio Piracicaba. **G1**. São Paulo, 30/06/2022. Disponível em: <<https://g1.globo.com/sp/piracicaba-regiao/noticia/2022/06/30/crime-ambiental-usina-de-cana-de-acucar-e-multada-em-r-240-mil-por-despejo-de-vinhaca-em-afluente-do-rio-piracicaba.ghtml>>
- BARROS, R. P.; VIÉGAS, P. R. A.; SILVA, T. L.; SOUZA, R. M.; BARBOSA, L.; VIÉGAS, R. A.; BARRETTO, M. C. V.; MELO, A. S. Alterações em atributos químicos de solo cultivado com cana-de-açúcar e adição de vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 40, n. 3, p. 341–346, 2010.
- BIGOTT, A. F.; HOY, J. W.; FULTZ, L. M. Soil properties, microbial communities, and sugarcane yield in paired fields with short- or long-term sugarcane cultivation histories. **Appl. Soil Ecol.** 142, 166–176. 2019.

BOWMAN, R. A.; COLE, C. V. Transformations of organic phosphorus substrates in soils as evaluated by NaHCO₃ extraction. **Soil Science**, v. 125, n. 1, p. 49-54, Jan. 1978.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. Trad. Téc. Igo Fernando Lepsch. - 3ª ed. - Porto Alegre. Ed. Bookman, 2013.

BRASIL. Casa Civil: Subchefia para Assuntos Jurídicos. **Decreto-Lei nº 303**, de 28 de fevereiro de 1967. Cria o Conselho Nacional de Controle da Poluição Ambiental e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto-lei/1965-1988/Del0303.htm

BRASIL. Casa Civil: Subchefia para Assuntos Jurídicos. **Lei nº 5.318**, de 26 de setembro de 1967. Institui a Política Nacional de Saneamento e cria o Conselho Nacional de Saneamento. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/1950-1969/L5318.htm#art13

BRASIL. **Decreto nº 76.593**, de 14 de novembro de 1975. Que institui o Programa Nacional do Álcool. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1970-1979/decreto-76593-14-novembro-1975-425253-publicacaooriginal-1-pe.html>

BRASIL. Ministério do Interior. **Portaria/GM nº 323**, de 29 de novembro de 1978. Disponível em: <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/bra14330.pdf>

BUSATO, J. G.; CANELLAS, L. P.; VELLOSO, A. C. X. Fósforo num cambissolo cultivado com cana-de-açúcar por longo tempo. I - Fracionamento Sequencial. **R. Bras. Ci. Solo**, 29:935-944, 2005.

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. **R. Bras. Ci. Solo**, 27:935-944, 2003.

CETESB. Norma Técnica: **Vinhaça – Critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola**. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. 3ª Ed. 2ª Versão. 2015. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2013/11/P4.231_Vinhaca-criterios-e-procedimentos-para-aplicacao-no-solo-agricola-3-ed-2-versao.pdf

CNA - Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil. **Cana-de-açúcar**. Projeto Campo Futuro. 2018. Disponível em: https://www.cnabrazil.org.br/assets/arquivos/boletins/ativos_cana_campo_futuro_novembro.pdf. Acesso em: novembro de 2020.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar - Safra 2016/17**. Acomp. safra bras. cana, v. 3 - Safra 2016/17, n. 4 - Quarto levantamento, Brasília, p. 1-77, abril 2017

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar - Safra 2017/18**. Acomp. safra bras. cana, v. 4 - Safra 2017/18, n. 4 - Quarto levantamento, Brasília, p. 1-73, abril 2018.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar - Safra 2018/19**. Acomp. safra bras. cana, v. 5 - Safra 2018/19, n. 4 - Quarto levantamento, Brasília, p. 1-75, abril de 2019.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar - Safra 2019/20**. Acomp. safra bras. cana, v. 6 - Safra 2019/20, n. 4 - Quarto levantamento, Brasília, p. 1-58 abril de 2019.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar - Safra 2020/21**. Acomp. safra bras. cana, v. 7 - Safra 2020/21, n. 4 - Quarto levantamento, Brasília, p. 1-57 maio de 2021.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar - Safra 2021/22**. Acomp. safra bras. cana, v. 8 – Safra 2021-22, n. 2- Segundo levantamento, Brasília, p. 1-62, agosto 2021.

CORBRIDGE, D. E. C. **Phosphorus: Chemistry, Biochemistry and Technology**. Ed. 6°. Ed: CRC Press. 2016.

CPRH - Agência Estadual de Meio Ambiente. **Zoneamento Sócio Ambiental da APA de Sirinhaém**. Fundação Apolônio Salles - FADURPE. 2021. Disponível em: <http://www2.cprh.pe.gov.br/wp-content/uploads/2021/01/diagnosticosantacruz.pdf>. Acesso em: dezembro de 2021.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil. **Diagnóstico do município de Sirinhaém**. Ministério de Minas e Energia - Recife. 2005.

DANIELS, J.; ROACH, B. T. Taxonomy and evolution. In: HEINZ, D. J. (Ed.) **Sugarcane improvement through breeding**. Amsterdam: Elsevier, 1987.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa do Solo. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2ª ed. Brasília, Embrapa Solos. 2006.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa do Solo. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5ª ed. Brasília, Embrapa Solos. 2018.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisas do Solo. **Manual de métodos de análise de solo**. 3ª ed. Brasília, DF. 2017.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Embrapa Cerrados - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Microrganismos e disponibilidade de Fósforo (P) nos solos: uma análise crítica**. Planaltina, DF. 2003.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Embrapa Milho e Sorgo. **Fertilidade de Solos**. Sete Lagoas - MG. 2000b.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Embrapa monitoramento por satélite. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**. Campinas, SP. 2010.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Embrapa Solos. **Levantamento de reconhecimento de baixa e média intensidade dos solos do estado de Pernambuco.** Boletim de Pesquisa nº 11. Recife – PE. 2000a.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Embrapa Tabuleiros Costeiros. **Guia prático para interpretação de resultados de análises de solos.** Aracaju, 2015.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Governo do Estado de Pernambuco. Secretaria de Produção Rural e Reforma Agrária. **Zoneamento Agroecológico de Pernambuco - ZAPE.** Pernambuco: Documentos nº 35. CD ROM, 2001.

FUESS, L. T.; RODRIGUES, I. J.; GARCIA, M. L. Fertirrigation with sugarcane vinasse: Foreseeing potential impacts on soil and water resources through vinasse characterization. **Journal of environmental science and health, Part A.** vol. 0, n. 0, 1–10. 2017.

FURTADO, C. **Formação econômica do Brasil.** Ed. 32. São Paulo. Ed: Companhia Editora Nacional. 2005.

GLOEDEN, E.; CUNHA, R. C. A.; FRACCAROLI, M. J. B.; CLEARY, R. W. The behaviour of vinasse constituents in the unsaturated and saturated zones in the Botucatu aquifer recharge area. **Water Science Technology**, v.24, n.11, p.147-157, 1991.

GLÓRIA, N. A.; ORLANDO FILHO, J.; **Aplicação de vinhaça como fertilizante,** COOPERSUCAR: São Paulo, 1983.

GUERRA, A. T.; GUERRA, A. J. T. **Novo dicionário geológico-geomorfológico.** 6 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2008. 652p.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. **BDMEP:** Banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa. Disponível em: <<https://bdmep.inmet.gov.br/#>>. Acesso em: dezembro de 2021.

IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Biocombustíveis no Brasil:** Etanol e Biodiesel. Série: Eixos do Desenvolvimento Brasileiro Nº 53. 2010.

JATOBÁ, L.; SILVA, A. F.; GOMES, A. L. L. A abordagem interdisciplinar do tema o domínio morfoclimático dos "mares de morros" em Pernambuco. **Revista Equador (UFPI),** Vol.3, nº2, p. 02 - 18, 2014.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Klimate der Erde.** Gotha: Verlag Justus Perthes. 1928. (Wall-map 150cmx200cm).

KORNDORFER, G. H. Fósforo na cultura da cana-de-açúcar. In: FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA., 2004, Piracicaba. **Anais [...]** São Pedro: POTAFOS, 2003. p. 291-305.

LANGOWSKI, E. Queima da cana: uma prática usada e abusada. **Cianorte**, 2007.

LEITE, R. C.; CORTEZ, L. A. B. E. O Etanol Combustível no Brasil. In: BRASIL. Ministério das relações exteriores – MRE (Org.). **Biocombustíveis no Brasil:** realidades e perspectivas. Brasília: Arte Impressora Gráfica LTDA, 2007.p. 60-75.

LIMA, R. L. S.; SEVERINO, L. S.; FERREIRA, G. B.; SILVA, M. I. L.; ALBUQUERQUE, R. C.; BELTRÃO, N. E. M. Crescimento da mamoneira em solo com alto teor de alumínio na presença e ausência de matéria orgânica. **Rev. bras. ol. fibros.**, Campina Grande, v.11, n.1, p.15-21, jan./abr. 2007.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. Fertilidade do solo e produtividade agrícola. In: NOVAIS, F. V.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do Solo**. Viçosa, Minas Gerais - Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2007.

MAIA, J. L. T.; RIBEIRO, M. R. Cultivo contínuo da cana-de-açúcar e modificações químicas de um Argissolo Amarelo fragipânico. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.39, n.11, p.1127-1132, nov. 2004

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2007. 631p.

MARQUES, G. M. Vinhaça: o futuro da fertilização. **Meio Ambiente - ESALQ**. Ano: 48 - Edição Nº: 66. 2015. Disponível em:
<http://www.usp.br/aun/antigo/exibir?id=7108&ed=1216&f=8>

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. (Org.). **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP 2, 2006. p. 369-375.

MARSCHNER, H. **Mineral Nutrition of Higher Plants**. 3rd Ed. Academic Press. 672p. 2011.

MEHLICH, A. **Determination of P, Ca, Mg, K, Na and NH₄**. Raleigh: North Carolina Soil Testing Division, 1953. 195 p.

MELO, F. M.; MENDONÇA, L. P. C. Avaliação da disponibilidade de fósforo em solo argiloso com diferentes teores de matéria orgânica. **Humanidades & Tecnologia em Revista (FINOM)** - ISSN: 1809-1628. Ano XIII, vol. 18. 2019.

MENDONÇA, E. S.; MATOS, E. S. **Matéria Orgânica do Solo: Métodos de Análises**. Viçosa - MG. 2005.

NOCELLI, R. C. F.; ZAMBON, V.; SILVA, O. G. M.; MORINI, M. S. C. Histórico da cana-de-açúcar no Brasil: contribuições e importância econômica. In: FONTANETTI, C. S.; BUENO, O. C. (Org.) **Cana-de-açúcar e seus impactos: uma visão acadêmica**. Bauru, SP. Ed. Canal 6. 2017.

NOVA CANA. **Usinas de açúcar e álcool no estado**: Pernambuco. Disponível em:
https://www.novacana.com/usinas_brasil/estados/pernambuco. Acesso em: 12 de Janeiro de 2021.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. Fósforo. In: NOVAIS, F. V.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do Solo**. Viçosa, Minas Gerais - Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2007.

- OLIVEIRA FILHO, J. S.; PEREIRA, M. G. Analyzing the research on phosphorus fractions and phosphorus legacy in soil: a bibliometric analysis. **J. Soils Sediments** 20, 3394–3405. 2020.
- OLIVEIRA FILHO, J. S.; PEREIRA, M. G.; AQUINO, B. F.; VIANA, T. V. A. Phosphorus forms and adsorption in a Typic Quartzipsamment cultivated with sugarcane harvested without burning. **Rev. Caatinga** 30, 343–352. 2017.
- OLIVEIRA, B. G. **Vinhaça da cana-de-açúcar: fluxos de gases de efeito estufa e comunidades de archaea presente no sedimento do canal de distribuição**. Dissertação (mestrado). ESALQ/USP. 2010.
- OLIVEIRA, J. B.; JACOMINE, P. K. T.; CAMARGO, M. N. **Classes gerais de solos do Brasil: guia auxiliar para seu reconhecimento**. 2. ed. Jaboticabal, FUNEP, 1992.
- ONU. Organização das Nações Unidas. **Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. 2015. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>
- ORLANDO FILHO, J. Sistema de aplicação de vinhaça em cana-de-açúcar. **Revista Álcool & Açúcar**. v.1, n.1, p.28-36, 1981.
- PANTANO, G.; GROSSELI, G. M.; MOZETO, A. A.; FADINI, P. S. Sustentabilidade no uso do fósforo: uma questão de segurança hídrica e alimentar. **Quim. Nova**, Vol. 39, No. 6, 732-740, 2016.
- PAULINO, J.; ZOLIN, C.; BERTONHA, A.; FREITAS, P.; FOLEGATTI, M. Estudo Exploratório do uso da vinhaça ao longo do tempo. Características da cana de açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v.15, n.3, p.244–249, 2011.
- PEDRON, F. A.; SAMUEL-ROSA, A.; DALMOLIN, S. D. Variação das características pedológicas e classificação taxonômica de Argissolos derivados de rochas sedimentares. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**. vol. 36 n.1 Viçosa. 2012.
- PRADO JÚNIOR, C. **Formação do Brasil contemporâneo**. São Paulo, Ed. Brasiliense. 1961.
- PRADO JÚNIOR, C. **História Econômica do Brasil**. Ed. 21. São Paulo, Ed: Brasiliense. 1978.
- REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. **Propriedades Físicas do Solo**. UFSM. Centro de Ciências Rurais, 2006.
- RFA - RENEWABLE FUELS ASSOCIATION. **Annual Ethanol Production** - U.S. and World Ethanol Production. Disponível em: <https://ethanolrfa.org/markets-and-statistics/annual-ethanol-production>. Acesso em: Agosto de 2022.
- RODRIGUES, N. Morte de peixes no Rio Ivinhema preocupa e é investigada pelo Imasul. **Campo grande news**. Campo grande, 08/02/2021. Disponível em: <<https://www.campograndenews.com.br/meio-ambiente/morte-de-peixes-no-rio-ivinhema-preocupa-e-e-investigada-pelo-imasul>>
- ROSSETTO, R.; DIAS, F. L. F.; VITTI, A. C. Problemas nutricionais dos solos nas novas fronteiras canavieiras. **Revista Idea News**, v.8, p.78-90, 2008.

- SALVADOR, J. O.; MOREIRA, A.; MALAVOLTA, E. CABRAL, C. P. Influência do alumínio no crescimento e na acumulação de nutrientes em mudas de goiabeira. **R. Bras. Ci. Solo**, 24:787-796, 2000.
- SANTOS, D. R.; GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v.38, n.2, mar-abr, 2008.
- SANTOS, D.; TIRITAN, C.; FOLONI, J.; FABRIS, L. Produtividade da cana-de-açúcar sob adubação com torta de filtro enriquecida com fosfato solúvel. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, 40 (4). 2010.
- 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. **URV**, 2012.
- SANTOS, M. A. Cetesb multa usina de cana em R\$ 125 mil. **Diário da Região**. São Paulo, 22/05/2018. Disponível em:
<<https://www.diariodaregiao.com.br/cidades/meioambiente/cetesb-multa-usina-de-cana-em-r-125-mil-1.216403>>
- SCHNEIDER, C. F.; SCHULZ, D. G; LIMA, P. R; JÚNIOR, A. C. G. Formas de gestão e aplicação de resíduos da cana-de-açúcar visando redução de impactos ambientais. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável** (Mossoró – RN), v. 7, n. 5, p. 08-17. 2012. (Edição Especial). Revisão de Literatura. ISSN 1981-8203.
- SERAFIM, R. F.; YABUKI, L. N. M.; QUELUZ, J. G. T.; GALDEANO, L. R.; GARCIA, M. L. Efeitos da aplicação de vinhaça na fertilidade do solo. **Irriga**, Botucatu, v. 26, n. 2, p. 439-459. 2021.
- SILVA, A. P. M; BONO, J. A. M.; PEREIRA, F. A. R. Aplicação de vinhaça na cultura da cana-de-açúcar: Efeito no solo e na produtividade de colmos. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v.18, n.1, p.38-43, 2014.
- SILVA, G. S. P. L.; SILVA, F. C.; ALVES, B. J. R.; TOMAZ, E.; BERTON, R. S.; MARCHIORI, L. F. S.; SILVEIRA, F. G. Efeitos da aplicação de vinhaça "in natura" ou concentrado associado ao n-fertilizante em soqueira de cana-de-açúcar e no ambiente. **Holos Environment.**, 19 (1): 1-21. 2018.
- SILVA, M. A. S.; GRIEBELER, N. P.; BORGES, L. C. Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v.11, n.1, p.108–114, 2007.
- SILVA, V. L. M. M.; GOMES, W. C.; ALSINA, O. L. S. Utilização do bagaço de cana-de-açúcar como biomassa adsorvente na adsorção de poluentes orgânicos. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**. Campina Grande, v. 2, p. 27-32, 2007.
- SILVEIRA, M. M. L.; ARAÚJO, M. S. B.; SAMPAIO, E. V. S. B. Distribuição de fósforo em diferentes ordens de solo do semi-árido da Paraíba e de Pernambuco. **R. Bras. Ci. Solo**, 30:281-291, 2006.
- SILVEIRA, R. N. C. M. **Manejo e cuidados no uso da vinhaça na fertirrigação**. Fortaleza: INOVAGRI/IFCE. 2016.

SINGER, P. I. **Desenvolvimento econômico e evolução Urbana: Análise da evolução econômica de São Paulo, Blumenau, Porto Alegre, Belo Horizonte e Recife.** São Paulo, Ed. Nacional. 1977.

SOUSA JUNIOR, G. S.; FERREIRA JÚNIOR, D. C.; CHICONATO, D. A.; ALVES, R. C. Silício atenua toxicidade do alumínio em plantas jovens de cana-de-açúcar: teores de clorofilas e crescimento foliar. **Holos Environment**, [S. l.], v. 17, n. 1, 2017.

SOUSA, F. B. F. **Plantas de cana-de-açúcar suplementadas com boro tem maior tolerância ao efeito tóxico do alumínio.** Tese (doutorado em ciência do solo). Faculdade de ciências agrárias e veterinárias - Unesp - Campus Jaboticabal. 2022.

TAVARES, V. N. **Atributos Físicos, Químicos e Estoque de Carbono em Argissolo sob diferentes manejos na Zona da Mata de Pernambuco.** 2016, Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) DTR - UFRPE.

TAVARES, V. N.; SILVA, I. J. S.; SANTOS, M. A. F.; NISHIWAKI, A. A. M.; ARAÚJO, M. S. B. O Papel dos trabalhadores do campo nos aspectos ambientais das indústrias sucroalcooleiras. **Revista Brasileira de Meio Ambiente.** v.2, n.1, 2018.

TIBAU, A. O. **Matéria orgânica e fertilidade do solo.** São Paulo. Ed. Nobel. 1978.

UFMS - Universidade Federal de Santa Maria. Glossário de Botânica. Adaptado de: ANDREATA, H. P.; TRAVASSOS, O. P. **Chaves para determinar as famílias de: pteridophyta gymnospermae angiospermae.** Rio de Janeiro: Ed. Universitária Santa Úrsula, 1994. 134p. Disponível em: <<http://w3.ufsm.br/herb/glossario.pdf>>. Acesso em: setembro de 2021.

USDA - UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Foreign Agricultural Service. **Sugar: World Markets and Trade.** Nov. 2021. Disponível em: <https://www.fas.usda.gov/data/sugar-world-markets-and-trade>

Usina responsável por vazamento em rios de Jaciara é autuada por órgão ambiental. **Circuito Mato Grosso.** Cuiabá, 29/07/2018. Disponível em: <<http://circuitomt.com.br/editorias/cidades/132171-usina-responsavel-por-vazamento-em-rios-de-jaciara-e-autuada-por-orgao-ambiental-.html>>

VILAR, C. C.; VILAR, F. C. M. Comportamento do fósforo em solo e planta. **Campo Digital: Rev. Ciências Exatas e da Terra e Ciências Agrárias.** v. 8, n. 2. p. 37-44. 2013.

VILLAR, M. L. P. **Manual de interpretação de análise de plantas e solos e recomendação de adubação.** Cuiabá: EMPAER-MT, 2007. (EMPAER-MT, Série Documentos, 35).

VITTI, G. C., MAZZA, J. A. **Planejamento, estratégias de manejo e nutrição da cultura de cana-de-açúcar.** Piracicaba: POTAFOS, 2002. 16 p. (Encarte técnico/Informações Agronômicas, 97).

YEOMANS, J.C & BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of carbon in soil. *Commun. in Soil Sci.Plant Anal.*, 19:1467-1476, 1988.

APÊNDICE A - CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO SOLO NOS PONTOS DE COLETA SOB DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO

PONTOS DE COLETA	H_2O		$cmol/dm^3$														g/kg		$\%$								
	pH		Ca		Mg		Na		K		Al		H		S		CTC		C		MOS		V		m		
	0-20	20-40	0-20	20-40	0-20	20-40	0-20	20-40	0-20	20-40	0-20	20-40	0-20	20-40	0-20	20-40	0-20	20-40	0-20	20-40	0-20	20-40	0-20	20-40	0-20	20-40	
ÁREA 01 - (T0) - MATA NATIVA	P1	4,10	4,90	0,50	0,40	1,00	0,70	0,08	0,05	0,08	0,02	1,80	0,90	9,50	5,28	1,70	1,20	13,00	7,40	28,7	10,6	4,95	1,83	13	16	52	43
	P2	3,90	4,80	0,35	0,25	0,65	0,70	0,06	0,03	0,06	0,01	2,10	1,15	11,67	5,20	1,10	1,00	14,90	7,30	22,5	9,7	3,87	1,68	8	13	65	54
	P3	4,00	4,60	0,30	0,40	0,80	0,60	0,04	0,03	0,04	0,02	2,00	1,25	10,29	6,33	1,20	1,10	13,50	8,60	25,7	11,5	4,43	1,98	9	12	63	54
	P4	4,20	4,70	0,30	0,40	0,70	1,00	0,05	0,04	0,03	0,02	2,00	1,50	9,38	6,91	1,10	1,50	12,50	9,90	21,2	15,7	3,66	2,71	9	15	65	51
	P5	4,20	4,40	0,25	0,35	0,75	0,65	0,02	0,01	0,03	0,02	2,00	1,50	8,39	6,83	1,10	1,00	11,40	9,40	17,5	13,5	3,01	2,32	9	11	66	59
	P6	4,00	4,50	0,25	0,30	0,75	0,70	0,04	0,02	0,04	0,02	2,10	1,25	10,68	6,50	1,10	1,00	13,90	8,80	23,8	13,0	4,11	2,24	8	12	66	55
	P7	4,30	4,80	0,25	0,30	0,95	0,90	0,03	0,03	0,03	0,01	1,35	1,00	6,65	4,85	1,30	1,20	9,30	7,10	16,3	8,1	2,82	1,40	14	17	52	45
	P8	4,20	4,30	0,30	0,25	0,80	0,75	0,03	0,02	0,04	0,02	2,15	1,40	10,96	6,10	1,20	1,00	14,30	8,50	12,5	10,6	2,15	1,83	8	12	65	57
ÁREA 02 - (T1) - VINHAÇA	P9	6,10	6,60	5,00	4,00	1,50	1,90	0,06	0,06	0,14	0,03	0,00	0,00	3,71	2,55	6,70	6,00	10,40	8,50	12,5	5,6	2,15	0,97	64	70	0	0
	P10	5,30	4,80	3,60	1,25	1,80	1,00	0,04	0,02	0,46	0,19	0,10	0,80	6,17	4,64	5,90	2,50	12,20	7,90	16,8	10,6	2,90	1,83	48	31	2	25
	P11	7,00	6,50	5,65	3,15	1,10	1,10	0,04	0,02	0,22	0,40	0,00	0,00	2,14	3,38	7,00	4,70	9,20	8,10	14,6	8,4	2,52	1,44	77	58	0	0
	P12	6,20	6,80	5,50	3,50	1,60	0,85	0,05	0,02	0,49	0,45	0,00	0,00	3,54	2,55	7,60	4,80	11,20	7,40	17,8	10,7	3,08	1,85	68	65	0	0
	P13	5,80	6,30	4,50	2,25	0,90	0,90	0,04	0,03	0,70	0,60	0,00	0,00	4,70	1,81	6,10	3,80	10,80	5,60	15,7	6,9	2,71	1,18	57	68	0	0
	P14	7,60	5,90	6,80	1,70	0,80	1,40	0,04	0,02	0,25	0,38	0,00	0,00	0,90	2,30	7,90	3,50	8,80	5,80	14,2	7,5	2,45	1,29	90	60	0	0
	P15	6,90	6,20	4,80	2,75	1,55	1,00	0,05	0,03	0,47	0,50	0,00	0,00	3,71	2,47	6,90	4,30	10,60	6,80	15,5	7,5	2,67	1,29	65	63	0	0
	P16	6,50	5,50	7,50	1,70	0,85	1,20	0,07	0,02	0,42	0,43	0,00	0,15	2,97	4,88	8,80	3,40	11,80	8,40	21,2	11,2	3,66	1,94	75	40	0	4
ÁREA 03 - (T2) - FERTILIZANTE	P17	6,80	5,70	3,50	1,75	1,50	1,00	0,02	0,02	0,04	0,02	0,00	0,05	1,65	3,57	5,10	2,80	6,70	6,40	9,6	7,5	1,66	1,29	75	44	0	2
	P18	4,80	4,50	0,90	0,50	1,10	0,50	0,02	0,01	0,07	0,03	0,70	1,10	4,66	4,84	2,10	1,00	7,50	7,00	11,6	9,6	2,00	1,66	28	15	25	51
	P19	5,20	4,50	2,40	0,65	1,20	0,80	0,02	0,01	0,06	0,04	0,25	1,40	5,85	5,36	3,70	1,50	9,80	8,30	14,0	10,6	2,41	1,83	38	18	6	48
	P20	4,50	4,30	0,85	0,40	1,00	0,80	0,02	0,01	0,05	0,03	1,30	1,70	6,86	5,80	1,90	1,20	10,10	8,70	15,0	10,6	2,58	1,83	19	14	40	58
	P21	4,70	4,70	1,15	0,70	1,00	0,70	0,02	0,02	0,04	0,02	0,70	1,00	6,56	5,02	2,20	1,40	9,50	7,50	12,2	8,7	2,11	1,51	23	19	24	41
	P22	4,70	4,80	0,70	0,70	0,80	0,80	0,02	0,02	0,02	0,05	1,15	0,90	7,01	4,54	1,70	1,60	9,80	7,00	13,7	9,4	2,37	1,61	17	22	41	36
	P23	4,80	4,70	1,25	1,00	1,00	0,70	0,03	0,02	0,04	0,02	0,70	0,95	5,32	4,41	2,30	1,70	8,30	7,10	10,2	10,4	1,76	1,79	28	25	23	35
	P24	4,90	4,80	1,50	0,70	1,00	0,90	0,03	0,02	0,03	0,02	0,50	0,75	6,67	4,44	2,60	1,60	9,70	6,80	12,5	8,2	2,15	1,42	26	24	16	31
ÁREA 04 - (T3) - VINHAÇA + FERTILIZANTE	P25	4,60	4,50	0,90	0,60	1,00	0,85	0,02	0,02	0,16	0,08	1,25	1,60	5,02	4,75	2,10	1,60	8,40	7,90	11,2	6,9	1,94	1,18	25	20	38	51
	P26	5,50	4,90	2,75	1,10	1,00	1,05	0,03	0,02	0,27	0,13	0,15	0,70	5,21	4,57	4,10	2,30	9,40	7,60	12,5	7,5	2,15	1,29	43	30	4	23
	P27	4,80	4,70	1,40	0,75	1,00	1,00	0,02	0,02	0,11	0,05	0,50	1,15	5,27	4,04	2,50	1,80	8,30	7,00	9,4	7,5	1,61	1,29	30	26	17	39
	P28	5,90	5,00	3,00	1,00	0,60	0,75	0,03	0,02	0,34	0,20	0,00	0,50	3,54	4,28	4,00	2,00	7,50	6,80	9,9	6,2	1,70	1,08	53	29	0	20
	P29	6,30	5,50	3,50	1,40	0,70	1,10	0,03	0,02	0,39	0,26	0,00	0,15	3,05	2,57	4,60	2,80	7,70	5,50	10,6	5,2	1,83	0,90	60	51	0	5
	P30	5,30	5,00	1,90	0,85	1,10	1,10	0,03	0,02	0,25	0,15	0,35	1,10	5,67	4,42	3,30	2,10	9,30	7,60	10,9	8,1	1,87	1,40	35	28	10	34
	P31	6,60	5,50	4,00	1,75	0,90	1,00	0,03	0,03	0,90	0,48	0,00	0,15	3,62	4,71	5,80	3,30	9,50	8,10	12,1	6,9	2,09	1,18	62	40	0	4
	P32	6,70	6,40	4,85	3,00	1,30	1,25	0,03	0,03	1,20	0,70	0,00	0,00	3,87	3,05	7,40	5,00	11,30	8,00	17,1	10,6	2,95	1,83	66	62	0	0

pH - potencial hidrogeniônico; Ca - Cálcio; Mg - Magnésio; Na - Sódio; K - Potássio; Al - Alumínio; H - Hidrogênio; S - Enxofre; CTC - Capacidade de Troca de Cátions; C - Carbono; MOS - Matéria Orgânica do Solo; V - Saturação por bases; m - Saturação por alumínio

**APÊNDICE B - QUANTIFICAÇÃO DE P E OS DIFERENTES GRAUS DE
LABILIDADE NO SOLO NOS PONTOS DE COLETA SOB DIFERENTES
SISTEMAS DE MANEJO**

	PONTOS DE COLETA	<i>mg kg⁻¹</i>					
		P- Mehlich-1		P-bic		P-hid	
		0-20	20-40	0-20	20-40	0-20	20-40
ÁREA 01 - (T0) - MATA NATIVA	P1	1	1	1,99	3,18	4,48	7,70
	P2	1	1	1,23	3,78	3,17	3,07
	P3	1	1	0,97	1,91	5,79	7,80
	P4	1	1	0,89	1,14	5,89	9,51
	P5	2	1	1,23	1,65	5,28	8,40
	P6	2	1	2,08	1,74	3,47	7,30
	P7	1	1	0,72	2,42	5,69	5,08
	P8	2	1	1,65	1,99	6,39	9,71
ÁREA 02 - (T1) - VINHAÇA	P9	5	3	6,3	22,56	15,35	24,71
	P10	3	2	8,53	14,14	4,28	8,20
	P11	10	2	7,85	6,69	15,85	5,89
	P12	7	2	16,36	3,5	4,98	17,46
	P13	4	2	5,82	4,08	4,68	11,93
	P14	11	2	14,14	5,34	32,46	7,60
	P15	8	1	6,01	3,79	6,29	6,69
	P16	8	1	3,79	17,43	6,39	6,29
ÁREA 03 - (T2) - FERTILIZANTE	P17	4	2	6,59	4,56	4,58	19,58
	P18	2	1	20,14	31,07	26,82	6,89
	P19	5	2	10,17	6,69	31,75	6,79
	P20	3	2	6,88	5,63	5,48	5,28
	P21	13	2	23,43	4,37	24,51	5,99
	P22	4	1	19,27	4,18	6,29	4,88
	P23	2	1	8,34	6,3	6,59	15,45
	P24	3	1	5,43	12,69	9,31	12,93
ÁREA 04 - (T3) - VINHAÇA + FERTILIZANTE	P25	1	1	3,69	1,48	9,91	5,99
	P26	2	1	10,59	6,76	11,12	6,59
	P27	1	1	5,91	4,72	6,89	16,36
	P28	2	1	5,48	2,33	20,99	11,32
	P29	2	1	6,42	3,35	17,06	6,69
	P30	1	1	6,76	1,91	5,89	1,96
	P31	3	2	4,85	4,03	3,77	16,96
	P32	3	1	11,35	7,10	29,04	4,88

P-Mehlich-1 - Fósforo lábil extraído pela solução de Mehlich-1, relacionado ao P na solução do solo; P-bic - Fósforo lábil, extraído com bicarbonato de sódio; P-hid - Fósforo moderadamente lábil, extraído com hidróxido de sódio.

**APÊNDICE C - CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO NOS PONTOS DE
COLETA SOB DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO**

PONTOS DE COLETA	COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA (%)								CLASSE TEXTURAL*		DENSIDADE (g/cm ³)		
	AREIA GROSSA		AREIA FINA		SILTE		ARGILA		0-20 20-40		0-20 20-40		
	0-20	20-40	0-20	20-40	0-20	20-40	0-20	20-40	0-20	20-40	0-20	20-40	
ÁREA 01 - (T0) - MATA NATIVA	P1	37	35	13	11	14	10	36	44	GA	GA	1,17	1,33
	P2	34	20	15	13	5	1	46	66	GA	MG	1,11	1,32
	P3	27	29	17	13	10	6	46	52	G	G	1,16	1,28
	P4	27	23	14	13	11	8	48	56	G	G	1,21	1,17
	P5	40	35	14	12	6	5	40	48	GA	GA	1,23	1,27
	P6	34	30	13	11	20	13	33	46	FGA	G	1,15	1,17
	P7	33	25	14	18	11	6	42	51	GA	G	1,28	1,35
	P8	32	29	11	12	17	12	40	47	FG	G	1,23	1,35
ÁREA 02 - (T1) - VINHAÇA	P9	35	29	22	20	18	23	25	28	FGA	FGA	1,83	1,75
	P10	35	27	15	13	14	7	36	53	GA	G	1,58	1,46
	P11	49	36	17	17	11	5	23	42	FGA	GA	1,69	1,66
	P12	31	21	17	12	16	15	36	52	GA	G	1,53	1,48
	P13	40	34	14	11	12	13	34	42	FGA	GA	1,51	1,43
	P14	46	32	20	13	13	13	21	42	FGA	GA	1,51	1,54
	P15	35	31	18	12	26	9	21	48	FGA	G	1,77	1,60
	P16	34	28	19	16	16	16	31	40	FGA	FG	1,56	1,50
ÁREA 03 - (T2) - FERTILIZANTE	P17	46	33	21	17	18	18	15	32	FA	FGA	1,83	1,67
	P18	26	25	19	16	30	19	25	40	F	FG	1,49	1,47
	P19	27	27	17	14	10	9	46	50	G	G	1,37	1,47
	P20	23	21	16	12	11	15	50	52	G	G	1,37	1,35
	P21	40	34	25	24	10	9	25	33	FGA	FGA	1,53	1,51
	P22	26	24	20	17	15	11	39	48	GA	G	1,43	1,49
	P23	38	38	22	22	13	13	27	27	FGA	FGA	1,47	1,50
	P24	37	34	23	20	9	8	31	38	FGA	GA	1,49	1,54
ÁREA 04 - (T3) - VINHAÇA + FERTILIZANTE	P25	24	27	12	12	15	11	49	50	G	G	1,36	1,36
	P26	30	35	19	15	12	11	39	39	GA	GA	1,50	1,49
	P27	31	25	14	9	13	24	42	42	GA	G	1,52	1,44
	P28	28	21	13	10	5	13	54	56	G	G	1,42	1,37
	P29	42	38	17	14	1	4	40	44	GA	GA	1,61	1,58
	P30	35	8	16	33	22	15	27	44	FGA	G	1,39	1,43
	P31	39	38	21	14	5	9	35	39	FGA	GA	1,62	1,52
	P32	34	31	16	12	15	3	35	54	FGA	G	1,53	1,48

* F - Franco; G - Argila; FGA - Franco-Argilo-Arenoso; FG - Franco-Argiloso; GA - Argilo-Arenoso; MG - Muito Argiloso