



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

JAILSON MARQUES DA SILVA JÚNIOR

EFEITO DA APLICAÇÃO DA VINHAÇA EM ATRIBUTOS
FÍSICOS E BIOLÓGICOS DO SOLO EM ÁREA DE CANA-DE-
AÇUCAR NA ZONA DA MATA NORTE DO ESTADO DE
PERNAMBUCO

RECIFE - PE

AGOSTO/2023

JAILSON MARQUES DA SILVA JÚNIOR

EFEITO DA APLICAÇÃO DA VINHAÇA EM ATRIBUTOS
FÍSICOS E BIOLÓGICOS DO SOLO EM ÁREA DE CANA-DE-
AÇÚCAR NA ZONA DA MATA NORTE DO ESTADO DE
PERNAMBUCO.

Projeto submetido ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Ambiental da Universidade
Federal Rural de Pernambuco, para obtenção do
título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Área de Concentração: Tecnologia e Gestão do
Meio Ambiente

Linha de Pesquisa: Gestão Ambiental e de
Recursos Hídricos

Orientador: Marcus Metri Corrêa

RECIFE – PE

AGOSTO/2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S586e da Silva Júnior, Jailson Marques da Silva Júnior
EFEITO DA APLICAÇÃO DA VINHAÇA EM ATRIBUTOS FÍSICOS E BIOLÓGICOS DO SOLO EM ÁREA DE
CANA-DE-AÇUCAR NA ZONA DA MATA NORTE DO ESTADO DE PERNAMBUCO / Jailson Marques da Silva
Júnior da Silva Júnior. - 2023.
49 f. : il.

Orientador: Marcus Metri Correa.
Inclui referências.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Ambiental, Recife, 2023.

1. Vinhaça. 2. Cana-de-açúcar. 3. Atividade Microbiana. 4. Física do solo. 5. Saccharum. I. Correa, Marcus Metri,
orient. II. Título

CDD 620.8

JAILSON MARQUES DA SILVA JÚNIOR

EFEITO DA APLICAÇÃO DA VINHAÇA EM ATRIBUTOS FÍSICOS E
MICROBIOLÓGICOS DO SOLO EM ÁREA DE CANA-DE-AÇÚCAR NA ZONA DA
MATA NORTE DO ESTADO DE PERNAMBUCO.

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da
Universidade Federal Rural de Pernambuco, para obtenção do título de Mestre em Engenharia
Ambiental, na Área de Concentração: Tecnologia e Gestão do Meio Ambiente.

29 de agosto de 2023

Prof. Dr. Marcus Metri Corrêa

Presidente da Banca e Orientador.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Raline Ferreira de Melo.

Universidade Federal Rural de Pernambuco

Pós Doc. Juscélia da Silva Ferreira.

Universidade Federal Rural de Pernambuco.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, não poderia ser diferente e dedicar toda a minha vitória a eles, meus pais. Jailson e Cristiane jamais se omitiram quando o assunto era me ajudar a alcançar meus sonhos, mesmo que fosse um caminho longo e pedregoso, sempre ao meu lado. Obrigado por tudo. Amo vocês.

Agradeço a Deus por ter me mantido na trilha certa durante essa jornada com saúde e forças para chegar até o final.

Minha esposa, namorada e parceira Alice, que me fez enxergar a vida de um modo diferente. Me fez enxergar os objetivos da minha vida como etapas e não como barreiras e que me fez acreditar que poderia vencer todos eles. Só tenho a agradecer por todo o teu amor, paciência e apoio em todos os momentos.

Ao meu orientador, o Prof. Dr. Marcus Metri Corrêa, que, apesar das dificuldades ocasionadas pela excepcionalidade de um curso de pós graduação em meio a uma pandemia, sempre esteve presente me auxiliando, orientando dando suporte no que necessário.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental pela oportunidade de fazer parte da história deles.

À FACEPE a agência fomentadora do meu projeto pela concessão da bolsa de estudos, fundamental para execução do meu projeto.

A Usina Cruangi nas pessoas de Geral e Guilherme que apesar das dificuldades logísticas me receberam em suas terras e aceitou esse trabalho de colaboração mútua,

Meus amigos de jornada, que fiz durante todo o curso e nas necessidades que o projeto demandou, pessoas que conheci no Laboratório de Física do Solo – UFRPE e no Departamento de Energia Nuclear - UFPE, precisando de ajuda e um parceiro podem contar comigo.

A Edvaldo José de Lima, um chefe, incentivador e amigo. Obrigado pelo carinho que o senhor e sua família têm por mim, a recíproca é verdadeira.

Obrigado a todos vocês!

,

*“Aí, maloqueiro, aí, maloqueira
Levanta essa cabeça
Enxuga essas lágrimas, certo? (Você memo)
Respira fundo e volta pro ringue (vai)
Cê vai sair dessa prisão
Cê vai atrás desse diploma
Com a fúria da beleza do Sol, entendeu?
Faz isso por nós
Faz essa por nós (vai)
Te vejo no pódio.”
AmarElo, Emicida.*

SILVA JÚNIOR, J. M. **Efeito da aplicação da vinhaça em atributos físicos e biológicos do solo em área de cana-de-açúcar na zona da mata norte do estado de Pernambuco.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2023.

RESUMO

A vinhaça é o resíduo da fermentação do melaço para a produção de álcool das usinas de cana-de-açúcar. A utilização e o tratamento adequados da vinhaça têm recebido atenção crescente. Dentre as alternativas consideradas para o reaproveitamento da vinhaça, a irrigação da cana-de-açúcar é a solução mais comum. No entanto, apenas algumas pesquisas foram realizadas considerando o impacto sobre a física do solo, e na atividade microbiana do solo pela aplicação da vinhaça por longo tempo em áreas agrícolas. Neste sentido, para avaliar o impacto cumulativo decorrente da aplicação de vinhaça por longo período de tempo, diferentes tratamentos foram avaliados: (1) solos de mata, (2) solo explorado com cana-de-açúcar e irrigado com vinhaça por 20 anos, (3) solo explorado com cana e nunca irrigado com vinhaça. Amostras de solo foram coletadas nos diversos tratamentos, nas camadas de 0-10cm, 10-20cm e 20-30cm e determinados a matéria orgânica, carbono, densidade, porosidade, análise granulométrica, bem como a atividade da comunidade microbiana. Os resultados permitiram verificar se houve alterações significativas nas propriedades: físicas, teores de carbono e matéria orgânica e atividade microbiana dos solos, se existiu risco ecológico, com os possíveis benefícios na prática da fertirrigação com vinhaça, e se exigiu o monitoramento periódico dos parâmetros de qualidade do solo para garantir uma irrigação segura e de longo prazo.

Palavras-chave: Vinhaça, Cana-de-açúcar, Física do solo, fertirrigação, *Saccharum*, Atividade microbiana

SILVA JÚNIOR, J. M. Effect of vinasse application on physical and biological soil attributes in the sugarcane area in the northern forest zone of the state of Pernambuco.

Dissertation (Master in Environmental Engineering) – Federal Rural University of Pernambuco, Recife, 2023.

ABSTRACT

Vinasse is the exclusion of the fermentation of molasses for the production of alcohol from sugar cane mills. The use and proper treatment of vinasse have received increasing attention. Among the alternatives considered for the reuse of vinasse, the transparency of sugar cane is the most common solution. However, only some research has been carried out considering the impact on soil physics and soil microbial activity of long-term application of vinasse in agricultural areas. In this sense, to evaluate the cumulative impact resulting from the application of vinasse over a long period of time, different treatments were evaluated: (1) forest soils, (2) soil exploited with sugar cane and irrigated with vinasse for 20 years, (3) soil exploited with sugarcane and never irrigated with vinasse. Soil samples were collected in different treatments, in the 0-10cm, 10-20cm and 20-30cm layers and specific organic matter, carbon, density, porosity, particle size analysis, as well as the activity of the microbial community. The results made it possible to verify whether there were significant changes in the properties: physical, carbon and organic matter contents and microbial activity of the soils, whether there is an ecological risk, with the possible benefits in the practice of fertigation with vinasse, and whether the provisions for periodic monitoring of parameters of vinasse soil quality to ensure safe and long-term supervision.

Keywords: Vinasse, Sugarcane, Soil physics, fertigation, Saccharum, Microbial activity

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização da Zona da Mata Norte do estado de Pernambuco	21
Figura 2: Visão de satélite da área de estudo	22
Figura 3: Amostras para leituras da fração de argila na análise granulométrica.....	24
Figura 4: Leitura do branco com densímetro de Bouyoucos	24
Figura 5: Bancada para determinar densidade da partícula.....	25
Figura 6: Ensaio em mesa de tensão para determinação da distribuição de tamanho de poros	26
Figura 7: Amostras na mesa de tensão equilibrada a 6kPa	28
Figura 8: Amostras filtradas após agitação para determinação do (CBMS)	31
Figura 9: Potes com as amostras para incubação na determinação da respiração basal do solo	32
Figura 10: Amostras para leitura da respiração basal do solo.....	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Frações granulométricas nos tratamentos analisados.....	35
Tabela 2: Densidade do solo dos tratamentos estudados nas camadas 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 30.....	35
Tabela 3: Porosidade total e distribuição do tamanho de poros nos tratamentos estudados....	36
Tabela 4: Densidade da partícula dos tratamentos estudados nas camadas 0 a 10, 10 a 20 e 20.....	38
Tabela 5: Teores de Carbono Orgânico Total e Matéria Orgânica dos tratamentos estudados.....	38
Tabela 6: Respiração basal do solo(C-CO ₂), Carbono da biomassa microbiana do solo (CBMS), Quociente Metabólico (qCO ₂) e Quociente Microbiano (qMic).....	46

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS.....	14
2.1. Objetivo Geral.....	14
2.2. Objetivos Específicos	14
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	15
3.1. A cultura da cana-de-açúcar.....	15
3.2. O subproduto vinhaça	16
3.3. O solo sob aplicação de vinhaça	18
3.4. Impacto da vinhaça sob o carbono da microbiota do solo	18
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	21
4.1. Análises Físicas do Solo	23
4.1.1. Análise Granulométrica.....	23
4.1.2. Densidade do solo (Ds)	25
4.1.3. Densidade de Partícula (Dp).....	25
4.1.4. Porosidade Total	25
4.1.5. Distribuição de tamanho de poros	26
4.2. Análises biológicas do solo.....	28
4.2.1. Carbono Orgânico Total (COT).....	28
4.2.2. Matéria Orgânica (M.O)	29
4.2.3. Carbono da biomassa microbiana do solo (C-BMS).....	29
4.2.4. Respiração basal do solo.....	31
4.2.5. Quociente Metabólico (qCO ₂).....	33
4.2.6. Quociente Microbiano (qMic).....	34
4.3 Análises Estatísticas.....	34
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
5.1. Análise Granulométrica (Areia, silte e argila)	35
5.2. Densidade do Solo (Ds)	35
5.3. Porosidade Total e Distribuição do Tamanho dos Poros.....	36

5.4.	Densidade de Partícula (Dp)	38
5.5.	Carbono Orgânico Total (COT) e Matéria Orgânica (M.O)	38
5.6.	Respiração basal do solo (C-CO ₂), Carbono da biomassa microbiana do solo (C-BMS), Quociente Metabólico (qCO ₂) e Quociente Microbiano (qMic).....	39
6.	CONCLUSÕES.....	42
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43

1. INTRODUÇÃO

O Brasil se destaca como o maior produtor mundial de cana-de-açúcar. No plano da produção, é estimada para o setor sucroenergético, na safra 2023/24, uma produção de 637,1 milhões de toneladas, em uma área plantada de 8,6 milhões de hectares, com produtividade média de 75,77 t/ha (CONAB, 2023). Na região Nordeste, Pernambuco segue como o segundo estado produtor de cana-de-açúcar (CONAB, 2023), tornando a cadeia de produção da indústria sucroenergética um dos principais setores do agronegócio pernambucano, gerando empregos diretos e indiretos e trazendo também grande contribuição social (Simões Neto et al., 2012).

Apesar dos benefícios socioeconômicos, grandes quantidades de efluentes e resíduos são gerados durante o processo de produção do açúcar e álcool. A vinhaça é o principal subproduto. Como resíduo líquido, ela geralmente apresenta coloração marrom-escura, com alto teor orgânico (DQO), alta demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e baixo pH, caracterizando-a como resíduo de alto poder poluente (Su et al. 2012). Contudo, a vinhaça é considerada um efluente de alto valor fertilizante. Ela é rica em potássio, cálcio, sódio e nitrogênio e apresenta baixo teor de fósforo. Estas características químicas, aliada a legislação brasileira, que proíbe o despejo da vinhaça nos corpos d'água, fez com que a indústria sucroenergética procurasse oferecer um destino mais apropriado para esse efluente.

Nas últimas décadas, pesquisadores propuseram muitos tratamentos para a vinhaça, como digestão anaeróbia (Moraes et al., 2015), produção de proteína para alimentação animal (Coca et al., 2015), concentração por evaporação (Navarro et al., 2000) e irrigação (Christofolletti et al., 2013). De todas as alternativas propostas de reaproveitamento da vinhaça no mundo, a irrigação é a mais comum, pois requer baixo investimento inicial, baixo custo de manutenção, rápida aplicação, não requer tecnologias complexas e aumenta a produtividade da cultura. Essa prática tem substituído total ou parcialmente o uso de fertilizantes químicos, principalmente aqueles que contêm N, K, Ca, Mg, S e matéria orgânica suficientes para o crescimento e desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar (Su et al., 2012).

A irrigação com vinhaça tem sido amplamente estudada e aplicada em muitos países, como China, Brasil e Argentina. Muitos estudos têm investigado os efeitos da aplicação da vinhaça no crescimento, desenvolvimento e produção da cana-de-açúcar e nas propriedades físicas, biológicas e químicas do solo. Foi demonstrado, por exemplo, que a matéria orgânica, o conteúdo de ácidos húmicos e a atividade das enzimas catalase e da polifenoloxidase aumentaram nas lavouras de cana-de-açúcar quando tratadas com vinhaça por um ano (Su et al.

2009). As populações de actinomicetos e a biomassa C e N aumentaram nos solos após a aplicação da vinhaça por seis meses (Yang et al. 2013). No entanto, poucos pesquisadores consideraram o impacto na fertilidade do solo e na diversidade microbiana do solo com a aplicação de vinhaça em longo prazo nos canaviais. Além disso, a vinhaça também contém alguns oligoelementos e, portanto, é necessário investigar o risco ecológico de metais pesados no solo durante a irrigação de longa duração com vinhaça.

Diante do exposto, este trabalho de pesquisa procurou avaliar o impacto da irrigação de longo prazo em canaviais com vinhaça sob diversos aspectos de qualidade do solo, procurando dar subsídios para orientar o manejo adequado e o monitoramento periódico dos parâmetros de qualidade do solo em lavouras de cana-de-açúcar irrigadas com vinhaça, de forma a promover o desenvolvimento agrícola sustentável.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Investigar o impacto da vinhaça na qualidade, manejo e preservação do solo, por 20 anos em áreas cultivadas com cana-de-açúcar em solos da Zona da Mata de Pernambuco e atestar se é uma prática ambientalmente viável.

2.2. Objetivos Específicos

- Avaliar os efeitos do uso da vinhaça sobre a densidade do solo, densidade da partícula, porosidade total e estabilidade de agregados;
- Avaliar o impacto da vinhaça no aporte da matéria orgânica do solo;
- Avaliar os efeitos do uso da vinhaça o carbono total, carbono da biomassa microbiana e respiração basal do solo

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. A cultura da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é uma das culturas mais importantes em todo o mundo, sendo amplamente cultivada por sua alta produtividade e versatilidade no uso de seus produtos. Ela pertence à família Poaceae e é considerada uma cultura semi-perene. As principais características da planta incluem colmos cilíndricos compostos por nós e entrenós, folhas alternadas presas aos nós, divididas em lâminas superiores e bainhas inferiores, e um sistema radicular fasciculado (Topa et al., 2010).

A origem da cana-de-açúcar é frequentemente associada às regiões quentes e tropicais da Ásia, com a Índia sendo reconhecida como a primeira região a utilizar a planta para a produção de açúcar. No entanto, existem várias hipóteses sobre sua origem exata e sua expansão para outras regiões com características climáticas semelhantes (Ripoli et al., 2007).

O melhoramento genético da cana-de-açúcar tem sido uma área de pesquisa ativa com o objetivo de aumentar sua produtividade e resistência a pragas e doenças. Diversas técnicas de melhoramento têm sido exploradas, incluindo a seleção de variedades promissoras, o desenvolvimento de híbridos, a utilização de marcadores moleculares e a biotecnologia para introdução de características desejáveis (Oliveira et al., 2016).

A cana-de-açúcar é uma das principais matérias-primas para a produção de etanol, um biocombustível amplamente utilizado como alternativa ao petróleo. O Brasil é um dos principais produtores de etanol a partir da cana-de-açúcar, e a produção desse biocombustível tem contribuído significativamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a sustentabilidade energética (Goldemberg et al., 2018).

O cultivo extensivo de cana-de-açúcar pode ter impactos significativos no meio ambiente, como a perda de biodiversidade, degradação do solo e uso intensivo de recursos hídricos. Por outro lado, práticas sustentáveis de manejo, como a colheita mecanizada e a utilização de subprodutos para a geração de energia, têm sido estudadas como forma de minimizar os impactos ambientais (Filoso et al., 2017).

A cana-de-açúcar continua desempenhando um papel crucial na economia global, fornecendo matérias-primas para a produção de açúcar, etanol e outros produtos derivados. O desenvolvimento contínuo de tecnologias e práticas sustentáveis é fundamental para garantir a competitividade da cultura e mitigar os impactos ambientais.

3.2. O subproduto vinhaça

A vinhaça, de acordo com Moraes, Zaiat e Bonomi (2015), é subproduto da destilação de biomassa para a produção de etanol, a partir de culturas de açúcar (beterraba e cana), culturas de amido (milho, trigo, arroz e mandioca) e material celulósico (resíduos de colheita, bagaço e madeira), e o que mais se destaca em quantidade é a capacidade poluidora, sendo também conhecida como vinhoto, restilo, calda ou garapão. Este resíduo aumenta proporcionalmente com o aumento da produção de etanol no mundo.

Para Freire e Cortez (2000), a vinhaça é definida como líquido de cor parda clara, que escurece em razão da oxidação, resultante do processo de fermentação, pH variando de 3,7 a 5, elevada corrosividade e índices de DBO (demanda biológica de oxigênio) e DQO (demanda química de oxigênio), com alta temperatura na saída dos destiladores. Para Rafaldini et al. (2006) devido à sua elevada carga de matéria orgânica, auxilia na proliferação de vetores de doenças e gera forte odor na sua decomposição.

Ludovice (1997) define a vinhaça como efluente composto de 93% de água e 7% de sólidos; desses sólidos, cerca de 75% são matéria orgânica, formada de ácidos orgânicos e, em menor quantidade, por cátions como o K^+ , Ca^{+2} e Mg^{+2} e sua graduação alcoólica não é superior a 0,03°GL. Silva, Griebeler e Borges (2007) e Rossetto (1987) relatam que dos efluentes líquidos da indústria sucroenergética, a vinhaça é a que possui maior carga poluidora, apresentando DBO variando de 20.000 a 35.000 mg L⁻¹, onde a quantidade despejada pelas usinas varia de 10 a 16 litros de vinhaça por litro de etanol, dependendo das condições de produção e sai dos aparelhos de destilação com temperaturas médias variando de 85 a 90 °C.

Quando descartado nos corpos hídricos, sem tratamento, este efluente pode ocasionar sérios problemas ambientais (Satyawali; Balakrishanan, 2008). Entretanto, durante décadas a vinhaça foi descartada diretamente em mananciais superficiais, principalmente nos rios e ribeirões próximos das usinas destiladoras, onde dizimou boa parte da microbiota formadora do plâncton (Almeida, 1952; Ferreira, 2009). Sua força poluente, cerca de cem vezes superior à do esgoto doméstico, é decorrente da riqueza em matéria orgânica, nitrogênio, fósforo e potássio e, portanto, os efeitos negativos da vinhaça em corpos hídricos ocorrem, em sua maioria, como consequências da desoxigenação das águas, devido às suas elevadas demandas química (DQO) e bioquímica (DBO) de oxigênio (Silva; Griebeler; Borges, 2007). Além disso, em sua composição podem estar presentes substâncias fitotóxicas, antibacterianas e compostos recalcitrantes, tais como fenóis, polifenóis, metais pesados, entre outras substâncias que podem

ter efeitos negativos sobre os micro-organismos que habitam os locais de disposição (Espanha-Gamboa et al., 2001).

Até o final da década de 70, a vinhaça era lançada diretamente em corpos d'água, o que trazia impactos negativos, tanto para a comunidade aquática desses habitats, quanto para os seres humanos que sofriam com a deterioração da qualidade da água para usos diretos e indiretos. (Lomanto Santa Cruz et al., 2013).

Advinda da grande preocupação quanto aos impactos do uso da vinhaça no ambiente, foi instituída em 28 de fevereiro de 1967, o Decreto Lei nº 303 que proibiu a disposição da vinhaça nos rios, lagos e cursos de água. Posteriormente, a Portaria nº 323 de 29 de novembro de 1978, publicada pela Secretaria Especial do Meio Ambiente (SEMA) e vinculada ao Ministério do Interior, também proibiu o lançamento direto ou indireto de vinhaça em qualquer coleção hídrica, pelas destilarias de álcool, a partir da safra 1979/1980.

Com a proibição, outros destinos tiveram que ser encontrados para a disposição da vinhaça. Inicialmente se utilizaram das áreas de sacrifício que, segundo Andrade (2009), eram áreas ditas de inundação, onde se formavam extensos alagados para permitir sua infiltração no terreno, sem nenhum controle. No entanto, esse novo método de disposição também era improdutivo e ambientalmente impróprio, uma vez que indisponibilizava o solo para usos futuros além de causar a poluição das águas subterrâneas. Moraes, Zaiat e Bonomi (2015) relatam que a aplicação indiscriminada da vinhaça no solo intensifica a salinização, a lixiviação de metais, emissões de gases de efeito estufa e contaminação de águas subterrâneas.

Com a proibição do lançamento nos cursos de água, a perda contínua das áreas de sacrifício (já que se tornavam inutilizáveis para a agricultura) e o crescente volume de vinhaça produzido, outra forma de disposição passou a ser prontamente utilizado a partir da década de 70: a fertirrigação. A prática da fertirrigação, mesmo sendo bem sucedida do ponto de vista agrônomo e econômico, requer alguns cuidados, pois as quantidades de vinhaça depositadas no solo não devem ultrapassar a capacidade de retenção de íons que este possui; as dosagens devem ser mensuradas de acordo com as características de cada solo. Por essa razão foi elaborada a Norma Técnica P4.231 (CETESB-Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2015), que estabelece os critérios e os procedimentos para uma aplicação segura da vinhaça ao solo.

Contudo, o alerta de inúmeros estudos em relação ao uso da vinhaça na fertirrigação ainda reflete discordância entre os benefícios e os impactos provocados por este uso, o que inviabiliza a aplicação do resíduo ao solo como uma prática plenamente segura, devido às desvantagens que apresenta. (Lomanto Santa Cruz et al., 2013).

3.3. O solo sob aplicação de vinhaça

. A vinhaça possui uma grande quantidade de sais e nutrientes, incluindo potássio, e quando aplicada em quantidades excessivas, pode levar ao aumento da concentração de íons na solução do solo. Isso pode afetar a agregação do solo e causar dispersão de partículas argilosas, resultando em uma maior proporção de partículas finas no solo e, conseqüentemente, aumento da quantidade de silte e argila (Alves et al., 2018). Esse processo pode diminuir a capacidade de infiltração de água no solo e aumentar o risco de erosão.

A porosidade do solo refere-se ao espaço vazio entre as partículas do solo e é crucial para a circulação de água, ar e gases no perfil do solo. A aplicação de vinhaça pode afetar a porosidade do solo de várias maneiras. Em solos argilosos, como mencionado anteriormente, a dispersão das partículas argilosas pode levar à redução da porosidade total do solo (Alves et al., 2018). Por outro lado, em solos arenosos, a alta concentração de nutrientes na vinhaça pode estimular o crescimento das raízes das plantas, promovendo o desenvolvimento de poros radiculares, o que pode aumentar a porosidade do solo (Silva et al., 2007). No entanto, esse aumento da porosidade pode levar a um maior risco de lixiviação de nutrientes e contaminação de águas subterrâneas.

Em relação a granulometria do solo refere-se à distribuição das diferentes frações de tamanho de partículas no solo, incluindo areia, silte e argila. A aplicação de vinhaça pode influenciar a granulometria do solo, especialmente em solos argilosos. A dispersão das partículas argilosas pode resultar em um aumento da proporção de silte e argila, afetando a composição do solo (Alves et al., 2018). Essa alteração na granulometria pode ter implicações para a retenção de água, a aeração do solo e a disponibilidade de nutrientes para as plantas.

3.4. Impacto da vinhaça sob o carbono da microbiota do solo

Estudos têm demonstrado que a aplicação de vinhaça no solo pode ter efeitos variados no carbono total do solo. Alguns estudos sugerem que a aplicação de vinhaça pode levar a um

aumento no teor de carbono total do solo, especialmente em sistemas agrícolas onde a vinhaça é utilizada de forma consistente e em altas doses (Silva et al , 2007). Esse aumento pode ser atribuído ao fornecimento de matéria orgânica à medida que a vinhaça é decomposta e ao estímulo à atividade microbiana no solo.

A aplicação de vinhaça também pode influenciar o carbono da biomassa microbiana do solo. Alguns estudos relatam um aumento na biomassa microbiana com a aplicação de vinhaça, o que pode ser resultado do aporte de nutrientes e substratos orgânicos que favorecem o crescimento e atividade dos microrganismos (Alves et al., 2018). Uma maior biomassa microbiana pode ter efeitos positivos na ciclagem de nutrientes e na disponibilidade de carbono para as plantas.

O carbono mineralizável representa a fração de matéria orgânica do solo que está sujeita à decomposição e mineralização pelos microrganismos, tornando-se disponível como fonte de nutrientes para as plantas. Alguns estudos indicam que a aplicação de vinhaça pode aumentar a taxa de mineralização do carbono orgânico do solo, acelerando a liberação de nutrientes como o nitrogênio e, em certos casos, do próprio carbono (Nunes et al., 2017). Isso pode ter efeitos positivos na nutrição das plantas, mas também pode aumentar a suscetibilidade do solo à perda de carbono pela volatilização de CO₂.

A aplicação de vinhaça no solo pode ter impactos significativos na dinâmica do carbono, afetando o carbono total do solo, o carbono da biomassa microbiana e o carbono mineralizável. (Moreira-de-Sousa, Cristina 2018) Enquanto alguns estudos sugerem um aumento no teor de carbono total do solo e na biomassa microbiana, outros apontam para uma maior taxa de mineralização do carbono orgânico do solo (Melissa et al, 2006). É importante destacar que os efeitos da vinhaça no carbono do solo podem variar de acordo com as condições específicas do sistema agrícola, práticas de manejo e níveis de aplicação. Portanto, é essencial que a aplicação de vinhaça seja realizada de forma controlada e sustentável, considerando os impactos na qualidade do solo e no sequestro de carbono.

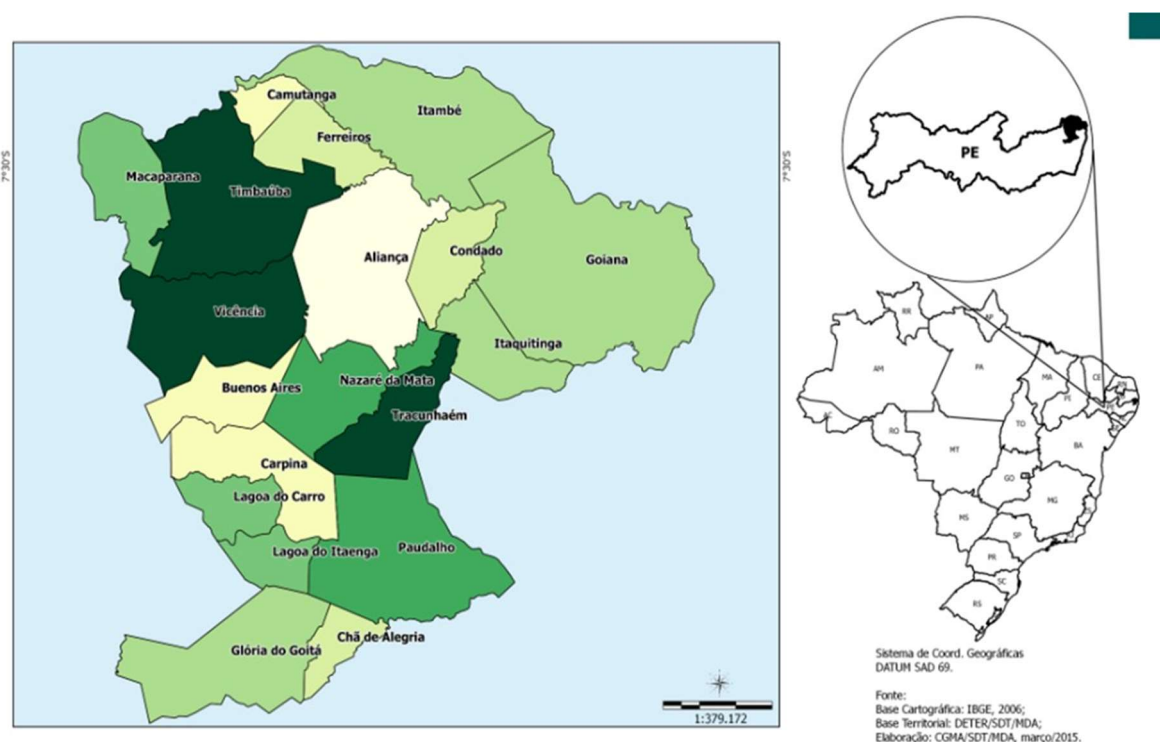
A biomassa de micro-organismos compõe a fração ativa da matéria orgânica e constituem indicadores sensíveis da qualidade biológica dos solos, obtendo-se respostas, das interferências no solo pelo uso da terra ou manejo, de maneira mais rápida do que as outras frações da matéria orgânica (GAMA-RODRIGUES et al., 2005). Deste modo, as avaliações da atividade biológica do solo por meio da respiração basal do solo, carbono da biomassa microbiana, quociente metabólico e o quociente microbiano podem revelar mudanças no

conteúdo de matéria orgânica do solo antes que elas possam ser detectadas na matéria orgânica total (JENKINSON E LADD, 1981).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho de pesquisa estudou áreas cultivadas com cana-de-açúcar na Zona da Mata Norte de Pernambuco, no município de Timbaúba. Esta região tem como característica climática altas taxas de radiação solar, de nebulosidade e de umidade relativa do ar. De acordo com a classificação de Köppen, o clima é tropical úmido (Ams'), com chuvas de outono a inverno e médias pluviométricas anuais entre 1.000 e 2.200mm. A temperatura média anual de 25 ° C. Os solos da região são bastante variáveis com predominância dos Argissolos Vermelho-Amarelo e Vermelho-Escuro.

Figura 1: Localização da Zona da Mata Norte do estado de Pernambuco



As áreas agrícolas onde amostras de solos coletas foram coletadas (Figura 2) estão localizadas nos Engenhos Nova Cintra e Genipapo de propriedade da Usina Cruangi e administrados pela COAF (Cooperativa do Agronegócio dos Fornecedores de Cana-de-açúcar). Há mais de 20 anos, a cultura da cana-de-açúcar é conduzida nessas áreas com aplicação de vinhaça via canhão de aspersão. O manejo da cana é seguindo as recomendações filotécnicas específicas, assim como as correções e as adubações do solo. Os espaçamentos entre linhas utilizadas é de 1,5m. Todas as operações agrícolas, durante o ciclo produtivo da cana de açúcar foram realizadas nas linhas de cultivo. A colheita da cana-de-açúcar é manual com a queima da palha.

O solo desses engenhos é o argissolo vermelho de acordo com o levantamento da Embrapa na escala 1:250.000. O lote com vinhaça mede cerca de 4,31 hectares e topografia suave-ondulada, o lote com vinhaça mede 8,18 hectares com topografia ondulada e a área de mata tem característica de topo de morro, medindo 10,69 hectares. Os pontos de repetições foram coletados de forma de triângulo com distâncias aleatórias a fim de representar de forma satisfatória toda a área de tratamento.

Figura 2: Visão de satélite da área de estudo



Fonte: SILVA JÚNIOR, J. M, 2023.

Solos naturais e sem manejo (Mata), solo irrigado com vinhaça (CV) e solo sem aplicação de vinhaça (SV). Nesses locais foram amostradas três repetições de campo. Para as análises físicas a coleta foi feita de forma aleatória em diferentes pontos e diferentes profundidades, (camadas de 0-10cm, 10-20cm e 20-30cm) para cada repetição. Para as análises microbiológicas e de carbono foram coletadas as amostras nos mesmos pontos na profundidade de (0-20cm). As amostras do solo deformadas foram coletadas utilizando um trado do tipo holandês e as amostras indeformadas com amostrador tipo uhland em anais volumétricos com dimensões de 0,05m x 0,05m.

4.1. Análises Físicas do Solo

Nas amostras de solo foram determinadas a classe textural do solo pela Análise Granulométrica, a densidade do solo (Ds), densidade de partícula (Dp), Porosidade total (Pt%) e Distribuição do tamanho de poros.

4.1.1. Análise Granulométrica

A análise granulométrica dos solos foi realizada pelo método do densímetro, onde 50 g das amostras (com polímero e o controle) sob dispersante (Calgon = Hexametáfosfato de Sódio + Carbonato de Sódio = 0,25 L) e 250 mL de água foram submetidas ao agitador tipo Wagner por 16 horas, transferida para proveta de 1L, até o volume de 0,94 L, agitando-se manualmente com haste e permanecendo em repouso por 24 horas (**Figura 3**) (Almeida, 2008). Após esse período, foram realizadas as leituras do material em suspensão com o uso do densímetro de Bouyoucos, além da leitura do branco (apenas dispersante) (**Figura 4**). A argila total foi calculada pela equação (1)

$$Argila\ total_{(\%)} = \left(\frac{Massa_{argila(g)}}{Massa_{total(g)}} \right) \times 100 \quad (1)$$

Em seguida, utilizou-se a peneira de 0,053 mm para retenção e determinação da fração areia total, colocadas na estufa à 105°C por 48 horas e pesada posteriormente. A areia total foi calculada pela equação (2).

$$Areia\ total_{(\%)} = \left(\frac{Massa_{areia(g)}}{Massa_{total(g)}} \right) \times 100 \quad (2)$$

A determinação do silte contido na amostra deu-se pela diferença entre as frações de areia e argila., usando-se a equação (3)

$$Silte_{(\%)} = 100 - (areia\ total_{(\%)} - argila\ total_{(\%)}) \quad (3)$$

Figura 3: Amostras para leituras da fração de argila na análise granulométrica



Fonte: SILVA JÚNIOR, J. M, 2023.

Figura 4: Leitura do branco com densímetro de Bouyoucos



Fonte: SILVA JÚNIOR, J. M, 2023.

4.1.2. Densidade do solo (Ds)

A densidade do solo foi determinada pelo método do cilindro volumétrico, conforme Almeida et al. (2017b), onde, de posse da massa do solo seco a 105 °C, os cálculos foram realizados via equação (3).

$$Ds_{(gcm^{-3})} = \frac{Msólidos(g)}{Vsolo(cm^3)} \quad (3)$$

Onde: D_s é a densidade do solo ($g\ cm^{-3}$); $M_{sólidos}$ é a massa de sólidos obtida pela diferença entre o peso do conjunto anel-sólidos seco a 105°C e o peso do anel (g), V_{solo} é o volume de solo, aqui assumido como volume do anel ($\pi \times r^2 \times h$), expresso em cm^3 .

4.1.3. Densidade de Partícula (Dp)

A densidade de partículas foi realizada empregando-se o método do balão volumétrico (MBV), descrito conforme EMBRAPA (1997). Prepararam-se as amostras de solo, obtendo-se a TFSA, sendo seca em estufa a 105°C por 24 horas (TFSE) e resfriamento em dessecador. O líquido penetrante usado foi o etanol (**Figura 5**).

Figura 5: Bancada para determinar densidade da partícula



Fonte: SILVA JÚNIOR, J. M, 2023.

4.1.4. Porosidade Total

A porosidade total foi determinada de forma direta, a partir do método da saturação, conforme descrito em Almeida et al. (2017a). Essa metodologia se baseia no princípio que o volume de água de saturação equivale ao volume total de poros. Dessa forma, as amostras (conjuntos anéis-amostras) foram saturadas e pesadas nessa condição. A segunda parte de coleta

de dados se refere à obtenção do peso dos conjuntos anéis-amostras secos em estufa a 105°C. Entretanto, esse último dado só foi obtido após realizados os ensaios na mesa de tensão (umidades equilibradas a 1 e 6 kPa), cujos resultados são usados para determinação da distribuição de tamanho de poros (macro, meso e microporosidade). Assim, na sequência, a porosidade total foi calculada a partir da equação (4):

$$Pt_{\%} = \left(\frac{V_{poros}(cm^3)}{V_{solo}(cm^3)} \right) \times 100 \quad (4)$$

Em que: Pt é a porosidade total (%); V_{poros} é o volume de poros (cm^3), obtido pela diferença entre a massa do conjunto amostra-anel saturado e a massa do conjunto amostra-anel seco a 105 °C, convertendo-se a massa resultante em volume pela divisão da densidade da água ($1,0 \text{ g cm}^{-3}$); V_{solo} é o volume do solo (cm^3), assumido como o volume do anel volumétrico ($\pi \times r^2 \times h$).

4.1.5. Distribuição de tamanho de poros

Os ensaios para determinação da distribuição de tamanho dos poros foram realizados utilizando-se a mesa de tensão (**Figura 6**), de acordo com metodologia descrita em Romano et al. (2002).

Figura 6: Ensaio em mesa de tensão para determinação da distribuição de tamanho de poros



Fonte: SILVA JÚNIOR, J. M, 2023.

Para obtenção da energia a ser aplicada, via mesa de tensão, aos conjuntos anéis-amostras, utilizou-se a equação (5), que foi adaptada a partir expressão matemática sugerida em Bouma (1991).

$$\Psi = \frac{4 \sigma \cos \alpha}{D a g \varnothing_{eq.poros}} \quad (5)$$

Onde: Ψ é a energia (tensão) a ser aplicada ao solo para drenar a água de uma determinada classe de poros, isto é, representa o potencial total da água no solo a ser aplicado via mesa de tensão; é a tensão superficial da água; é o ângulo de contato entre o menisco de água e a parede do poro; D_a é a densidade da água; g é a aceleração da gravidade; e $\emptyset_{eq.poros}$ é o diâmetro equivalente de uma determinada classe poros.

Atribuindo-se os valores padrões para as variáveis da equação (5), isto é, assumindo-se que $\sigma = 73,575 \times 10^{-3} \text{ N m}^{-1}$; $\alpha = 0^\circ$; $D_a = 1000 \text{ kg m}^{-3}$; $g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$, a equação (6) foi simplificada, onde a Ψ é expressa em metro de coluna de água (mca), sendo calculada em função do $\emptyset_{eq.poros}$ (μm), conforme equação (6).

$$\Psi = \frac{30}{\emptyset_{eq.poros}} \quad (6)$$

Para a definição do tamanho dos $\emptyset_{eq.poros}$ seguiu-se a classificação segundo Prevedello (1996). Assim, os macroporos foram definidos como poros que têm $\emptyset_{eq.poros} > 300 \mu\text{m}$, sendo poros que drenam água na tensão de 0,1 mca (1 kPa). Os mesoporos foram definidos como aqueles poros que possuem $\emptyset_{eq.poros}$ entre 50 μm e 300 μm , drenando água entre as tensões de 1 kPa e 6 kPa; e os microporos, que drenam água à tensão $> 6 \text{ kPa}$, são poros que possuem $\emptyset_{eq.poros} < 50 \mu\text{m}$.

Assim, a macro, meso e microporosidade foram calculadas pela relação entre o volume da classe do poro considerada e o volume do solo, conforme as equações (7), (8) e (9), respectivamente.

$$Macro\% = \left(\frac{V_{macroporos(cm^3)}}{V_{solo(cm^3)}} \right) \times 100 \quad (7)$$

$$Meso\% = \left(\frac{V_{mesoporos(cm^3)}}{V_{solo(cm^3)}} \right) \times 100 \quad (8)$$

$$Micro\% = \left(\frac{V_{microporos(cm^3)}}{V_{solo(cm^3)}} \right) \times 100 \quad (9)$$

Onde: $V_{macroporos}$ é o volume de macroporos (cm^3), obtido pela diferença entre as massas (g) dos conjuntos anéis-amstras saturados e amostra-anel equilibrado a 1 kPa; $V_{mesoporos}$ é o volume de mesoporos (cm^3), obtido pela diferença entre as massas (g) dos conjuntos anéis-amstras equilibrados a 1 kPa e amostra-anel equilibrado a 6 kPa; $V_{microporos}$ é o volume de microporos (cm^3), obtido pela diferença entre as massas (g) dos conjuntos anéis-amstras

equilibrados a 6 kPa(**Figura 7**) e amostra- anel equilibrado a 105°C; dividindo-se tais massas pela D_a ($1,0 \text{ g cm}^{-3}$), convertendo- as em volumes; e V_{solo} é o volume do solo (cm^3), assumido como o volume do anel volumétrico ($\pi \times r^2 \times h$).

Figura 7: Amostras na mesa de tensão equilibrada a 6kPa



Fonte: SILVA JÚNIOR, J. M, 2023.

4.2. Análises biológicas do solo

Nas amostras de solo foram determinados o Carbono orgânico total (COT), o Carbono da biomassa microbiana do solo (CBMS) e a Respiração basal do solo (C-CO_2). .

4.2.1. Carbono Orgânico Total (COT)

Os teores de carbono orgânico total (COT) foram determinados por via úmida, por dicromato de potássio, como proposto por EMBRAPA (2011). Os equipamentos usados foram o agitador magnético, a balança de precisão e o bloco digestor, utilizando-se as soluções: dicromato de potássio $0,167 \text{ mol.L}^{-1}$, sulfato ferroso amoniacal $0,20 \text{ mol.L}^{-1}$ e solução indicadora de ferroin.

As amostras foram moídas em almofariz e passada na peneira de 0,2 mm. Foi pesado cerca de 500,0 mg de solo por amostra que foi transferido para um tubo de digestão, e então

foram adicionados 5 mL de dicromato de potássio, 7,5 mL de ácido sulfúrico concentrado. Os tubos de digestão foram colocados no tubo digestor previamente aquecido à 170°C por 30 minutos e onde esfriaram por mais 20 minutos. Nas mesmas condições foram feitos quatro testes em branco, dois foram aquecidos juntamente com os demais tubos e os dois restantes permaneceram sem aquecimento, em temperatura ambiente.

O conteúdo de cada tubo foi transferido para erlenmeyers de 125 mL com volume completado até 50 mL com água destilada. Com a solução em temperatura ambiente, foram adicionados quatro gotas da solução indicadora e então titulou-se com a solução de sulfato ferroso amoniacal. O volume gasto na titulação foi anotado.

O carbono total da amostra foi determinado pela Equação (10) e (11).

$$COT(dag.Kg^{-1}) = \frac{(A) \times (Conc.Sulfato\ Ferroso) \times (3) \times (100)}{Massa\ da\ Amostra\ (g)} \quad (10)$$

$$A = \frac{[(Vba - Vam) \times (Vbn - Vba)]}{Vbn} + (Vba - Vam) \quad (11)$$

Onde: Vba = volume gasto na titulação do branco controle com aquecimento; Vbn = volume gasto na titulação do branco controle sem aquecimento; Vam = volume gasto na titulação da amostra.

4.2.2. Matéria Orgânica (M.O)

A proporção de matéria orgânica total foi calculada através da multiplicação do total de carbono orgânico por 1,724, admitindo-se que a matéria orgânica representa cerca de 58% do carbono orgânico (Embrapa, 1997). Sendo assim a matéria orgânica total foi determinada pela Equação (12).

$$M.O \left(\frac{dg}{kg} \right) = C \left(\frac{dg}{kg} \right) \times 1,724 \quad (12)$$

4.2.3. Carbono da biomassa microbiana do solo (C-BMS)

O carbono da biomassa microbiana foi determinado pelo método da irradiação-extração, segundo Mendonça e Matos (2005). Com cada amostra de solo contendo pelo menos 50 g, as amostras foram peneiradas, em peneira de 2 mm, e acondicionadas sob refrigeração à 4°C.

Foram utilizados um forno microondas, o agitador de tubos, o agitador horizontal, o agitador magnético, bloco digestor e erlenmeyer. As soluções utilizadas: solução extratora (solução de K₂SO₄ a 0,5 mol L⁻¹ com pH ajustado entre 6,5 – 6,8), solução de dicromato de

potássio $0,066 \text{ mol L}^{-1}$, solução de sulfato ferroso amoniacal $0,03 \text{ mol L}^{-1}$ e solução indicadora de ferroin. Verificar e substituir em todo o texto o mol.L^{-1} por mol L^{-1} .

Foram pesadas 20 g de amostra de solo em um erlenmeyer para a irradiação e outras 20 g no erlenmeyer que não foi irradiado. Posteriormente, foram adicionados 50 mL de solução extratora, tanto nos erlenmeyers irradiados quanto para os não irradiados. Os erlenmeyers foram então agitados por 30 minutos e deixados em repouso por mais 30 minutos. Após a agitação, o material sobrenadante foi filtrado e 10 mL do extrato filtrado foi transferido para um erlenmeyer de 125 mL (**Figura 8**), adicionados 2 mL da solução de dicromato de potássio e 10 mL de ácido sulfúrico. Após o resfriamento foram adicionados 50 mL de água destilada, e após novo resfriamento, foram adicionados 4 gotas de indicador ferroin. A solução foi então titulada com sulfato ferroso amoniacal $0,03 \text{ mol.L}^{-1}$

Foram feitas quatro provas em branco, sendo duas delas, contendo todos os reagentes e mais 10 mL de K_2SO_4 a 0,5 M, e duas apenas com os reagentes sem o sulfato de potássio. O carbono na biomassa microbiana foi determinado a partir das equações (12) e (14).

$$C_{Irr,Nir} = \frac{(Vb - Vam) \times (\text{conc.sulfato ferroso}) \times 3 \times 1000 \times (\text{vol.extrator})}{(\text{vol.extrato}) \times (\text{peso do solo})} \quad (13)$$

Onde:

Vb = média dos volumes gasto na titulação dos brancos;

Vam = média dos volumes gasto na titulação das amostras (triplicatas);

Conc. Sulfato Ferroso = 0,03 M;

3 = resultado da relação entre o número de mols de $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ que reagem com Fe^{++} (1/6), multiplicado pelo número de mols de $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ que reagem com C0 (3/2), multiplicado pela massa atômica do C (12);

1000 = fator de conversão de unidades;

Volume extrator = 50 mL, volume de K_2SO_4 0,5 M utilizado na extração;

Volume extrato = 10 mL, volume da alíquota do extrato titulada.

Com uso da equação 13 foi calculado:

$$C - BMS \left(\mu \frac{g}{g} \right) = \frac{C_{irr-CNi}}{Kc} \quad (14)$$

Onde:

CI: amostra irradiada;

CNI: amostra não irradiada;

$K_c = 0,33$ constante para o método de irradiação-extração de CBMS.

Figura 8: Amostras filtradas após agitação para determinação do (CBMS)



Fonte: SILVA JÚNIOR, J. M, 2023.

4.2.4. Respiração basal do solo

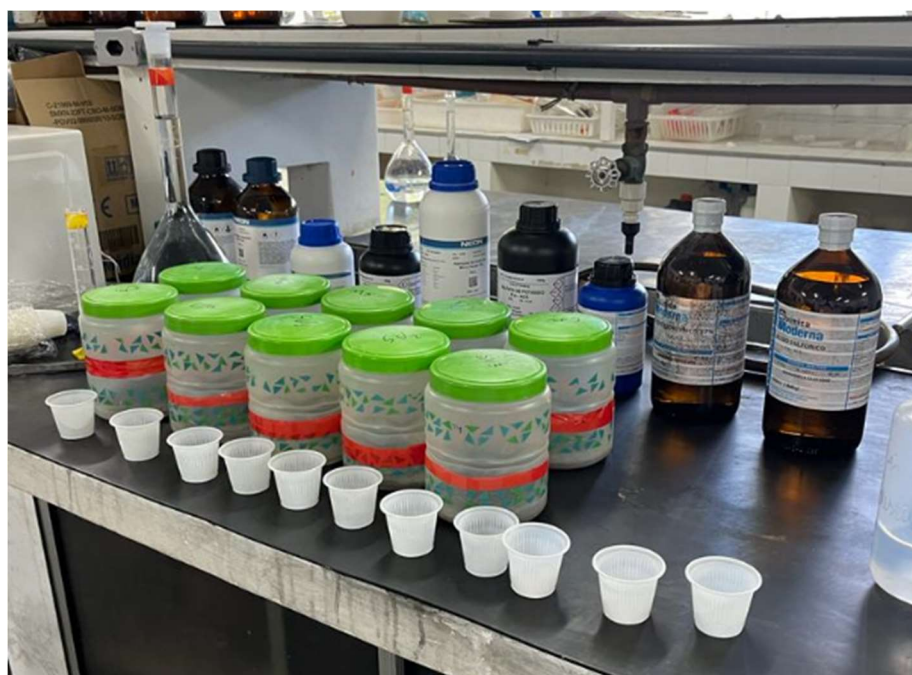
A respiração basal do solo foi determinada pelo método proposto por Mendonça e Matos (2005).

Realizou-se a secagem das amostras por 24 horas a sombra e, posteriormente, determinou-se a capacidade de campo do solo, utilizando 500g de solo para 500 mL de água.

Na realização do ensaio, 75 g de solo foram colocados em recipientes de plástico com tampa (**Figura 9**), e no interior dos mesmos foram colocados copos descartáveis com 20mL da solução de Hidróxido de Sódio 0,5M. Os recipientes foram identificados, fechados hermeticamente e mantidos em ambiente protegido da luz por 7 dias. Os potes foram abertos três vezes ao longo dos 7 dias para leitura do CO_2 evoluído e troca da solução extratora dos copos descartáveis (3º, 6º e 7º dia de incubação). Como testemunha foram utilizados potes sem solo (Branco), com os recipientes plásticos contendo apenas os 20mL da solução de Hidróxido de Sódio 0,5M para a captura do CO_2 .

Em cada período de incubação foram retirados os copos plásticos dos frascos e retirado 10mL da solução de NaOH de cada amostra e transferido para um erlenmeyer de 125mL respectivamente (**Figura 10**). Posteriormente foram adicionados 5mL de solução de Cloreto de Bário 0,05M e 3 gotas de fenolftaleína a 1%.

Figura 9: Potes com as amostras para incubação na determinação da respiração basal do solo



Fonte: SILVA JÚNIOR, J. M, 2023.

Em seguida foi titulado com solução de ácido clorídrico 0,25M, sendo registrado o volume gasto de HCl. Após a retirada do NaOH, novas soluções foram repostas para os subsequentes períodos de incubação. Efetuou-se o mesmo procedimento com pots sem adição de solo (brancos).

Os valores em, $\mu\text{g CO}_2 \cdot \text{g solo}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$, foram calculados a partir da seguinte equação (15):

$$\mu\text{g CO}_2 \cdot \text{g solo}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1} = \frac{(V_b - V_a) \times (\text{conc. HCl}) \times 22 \times 1000}{\text{peso do solo seco (g)} \times n^\circ \text{ de dias}} \quad (15)$$

Onde:

V_b – média dos volumes gasto na titulação dos brancos;

V_a – volume gasto na titulação das amostras;

Conc. HCl – 0,5 M ;

22 – massa atômica do CO_2 (44) dividido pelo número de moles de CO_2 que reagem com NaOH (2) ;

1000 – fator de conversão de unidades;

Nº de dias –três ou um, conforme o período de incubação;

O valor diário da taxa de respiração do solo foi obtido pela média das taxas dos 7 dias de incubação;

Figura 10: Amostras para leitura da respiração basal do solo



Fonte: SILVA JÚNIOR, J. M, 2023

4.2.5. Quociente Metabólico ($q\text{CO}_2$)

O quociente metabólico ($q\text{CO}_2$) foi determinado a partir da razão entre a respiração basal do solo e o carbono da biomassa microbiana (ANDERSON & DOMSCH, 1993), conforme a equação (16). Sua unidade é expressa em $\mu\text{g CO}_2 \cdot \text{g solo}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$

$$q\text{CO}_2 = \frac{\text{RBS}}{\text{C-BMS}} \quad (16)$$

em que,

RBS - Taxa de respiração basal do solo ($\mu\text{g CO}_2 \cdot \text{g solo}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$), e

C-BMS - Carbono da biomassa microbiana ($\mu\text{g CO}_2 \cdot \text{g solo}^{-1}$).

4.2.6. Quociente Microbiano (qMic)

O quociente microbiano (qMic) foi obtido pela relação entre o carbono da biomassa microbiana (CBM) e o carbono orgânico total (COT), conforme a equação (17) (ANDERSON & DOMSCH, 1993), sendo expresso em porcentagem.

$$qMic = \frac{C-BMS}{COT} \quad (17)$$

em que,

C-BMS - Carbono da biomassa microbiana $\mu g CO_2.g\ solo^{-1}$ e

COT - Carbono orgânico total ($\mu g.g\ solo^{-1}$).

4.3 Análises Estatísticas

Os dados foram submetidos análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ($p < 0,05$). Os dados foram analisados utilizando-se o software SISVAR (Versão 5.8)

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Análise Granulométrica (Areia, silte e argila)

Ao analisar os valores da granulometria observa-se que ocorreram diferenças de acordo com o tratamento (Tabela 1). A área com vinhaça foi a que apresentou a menor porcentagem de argila total (17%), já as áreas sem vinhaça e de mata apresentaram o mesmo valor (18%). Para a fração silte, a área de mata indicou o menor percentual (24%) seguida das áreas sem vinhaça (26%) e com vinhaça (28%). Na fração areia o tratamento com vinhaça apresentou (55%), sem vinhaça (56%) e mata (58%). Mesmo diferenciando os percentuais de acordo com o tratamento, todos permaneceram na mesma classe textural (Franco-arenosa), indicando que a aplicação de vinhaça não interferiu na granulometria do solo.

Tabela 1: Frações granulométricas nos tratamentos analisados

TRATAMENTO	FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS			Classe Textural
	Areia Total	Silte	Argila	
	%			
SEM VINHAÇA	56	26	18	Franco-arenosa
COM VINHAÇA	55	28	17	
MATA	58	24	18	

5.2. Densidade do Solo (Ds)

A análise de densidade do solo (Ds) foi utilizada nessa pesquisa como um indicador de compactação do solo, podendo medir alterações na porosidade e porosidade do solo (Reinert e Reichert, 2006). Ocorreu diferença significativa entre manejo nas profundidades 10 a 20 e 20 a 30 cm (Tabela 2).

Tabela 2: Densidade do solo dos tratamentos estudados nas camadas 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 30 cm

CAMADAS	TRATAMENTO		
	SEM VINHAÇA	COM VINHAÇA	MATA
(cm)	g.cm ⁻³		
0-10	1,40 Ba	1,42 Ba	1,42 Ba
10-20	1,51 Aa	1,44 Ba	1,46 Ba
20-30	1,50 Aa	1,43 Ba	1,43 Ba

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem significativamente ($p < 0,05$) pelo Teste de Tukey. (*) Significante ($p < 0,05$).

Nos valores médios observados da Ds não houve diferença significativa na camada de 0 a 10. Nas camadas subsequentes houve diferença significativa do tratamento com vinhaça

dos demais tratamentos. A Ds apresentado pelo tratamento sem vinhaça, na camada de 10 a 20 variaram foi $1,51 \text{ g.cm}^{-3}$ e na camada de 20 a 30 foi g.cm^{-3} (sem vinhaça), o tratamento com vinhaça apresentou $1,44 \text{ g.cm}^{-3}$ na camada de 10 a 20 e $1,43 \text{ g.cm}^{-3}$ na camada de 20 a 30, e o tratamento de mata foi $1,46 \text{ g.cm}^{-3}$ na camada de 10 a 20 e $1,43 \text{ g.cm}^{-3}$. Os tratamentos com vinhaça e mata não diferenciaram-se estatisticamente em nenhuma camada.

O aumento da Ds reduz a porosidade total, a macroporosidade, a Ksat e a absorção iônica (Silva *et al.*, 2017). O que pode acarretar em maior resistência à penetração das raízes das plantas (Bengough *et al.*, 2011), fazendo com que as plantas gastem demandem mais energia para exploração em profundidade em busca de água e nutrientes (Valentine *et al.*, 2013).

5.3. Porosidade Total e Distribuição do Tamanho dos Poros

A porosidade do solo, mais especificamente, a sua distribuição por tamanho de poros, condiciona o comportamento físico-hídrico, pois os poros representam o local onde circulam a solução do solo (água e nutrientes) e o ar, sendo, portanto, o espaço em que ocorre o processo dinâmico do ar e solução (Hillel, 1970; Klein, 2012 e Libardi, 2002). Assim, o estudo da porosidade do solo é uma maneira de caracterizar e quantificar essas propriedades (Guerif, 1987).

Assim sendo, os dados da porosidade total e distribuição do tamanho dos poros obtidos nesta pesquisa, dividiram-se em 4 parte, sendo a primeira avaliando a porosidade total (Pt) e as três subsequentes a divisão dessa porosidade por tamanhos: Macroporos, mesoporos e microporos. (Tabela 3)

A porosidade total (Pt) apresentou diferença significativa apenas entre camadas no tratamento sob Mata.

Tabela 3: Porosidade total e distribuição do tamanho de poros nos tratamentos estudados

Camada	TRATAMENTO		
	SEM VINHAÇA	COM VINHAÇA	MATA
(cm)	Porosidade total %		
0-10	43,89 Aa	43,07 Aa	39,97 Aa
10-20	41,49 Aa	43,59 Aa	45,51 Ab
20-30	40,42 Aa	42,78 Aa	44,17 Aab
	Macroporosidade %		
0-10	5,10 Ba	3,84 ABa	6,47 Aa

10-20	4,79 Aa	6,09 Aa	5,34 Aa
20-30	5,45 Aa	5,43 Aa	6,26 Aa
	Mesoporosidade %		
0-10	1,24 Aa	0,86 Aa	1,20 Aa
10-20	0,92 Aa	1,04 Aa	1,09 Aa
20-30	1,00 Aa	1,32 Aa	1,64 Aa
	Microporosidade %		
0-10	37,55 Aa	31,89 Aa	32,29 Aa
10-20	35,78 Aa	36,45 Aa	39,07 Aa
20-30	33,95 Aa	36,02 Aa	36,96 Aa

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem significativamente ($p < 0,05$) pelo Teste de Tukey. (*) Significante ($p < 0,05$).

Esses resultados sugerem que, no caso do tipo de solos de textura franco-arenosa os valores da porosidade total, não esclarecem, mais adequadamente os efeitos dos tratamentos nas áreas avaliadas, necessitando a inclusão de estudos incluindo outros atributos que venham contribuir na elucidação das modificações nas condições estruturais do solo.

A faixa crítica para PT encontrada por Cunha *et al.* (2011), para solos com textura franco-arenosa é de 44 a 50%. O tratamento com mata encontra-se dentro dessa faixa nas camadas mais profundas, já os valores nos tratamentos sem vinhaça e com vinhaça estão um pouco abaixo dessa faixa. Isso pode ser em parte justificado pelo manejo intenso praticado nas áreas com monocultura de cana-de-açúcar ao longo do tempo, bem como pela idade do canavial, que passa por subsolagem, aração e abertura de sulcos na renovação do plantio e a cada safra de manejo do canavial, ocorre a redução do volume da porosidade total.

A matéria orgânica do solo atua como agente cimentante e condicionante da estrutura granular do solo, que favorece a macroporosidade e principalmente interagregados (Caetano *et al.*, 2013; Vasconcelos *et al.*, 2014; Cherubin *et al.*, 2015). O que explica o por que do tratamento de mata encontrar-se dentro da faixa de crítica e o tratamento com vinhaça ter uma Pt total maior que o tratamento sem vinhaça, já que a vinhaça aporta matéria orgânica ao solo.

De acordo com Klein e Libardi (2002), a compactação do solo acarreta na redução dos espaços porosos, principalmente dos macroporos, que afeta as propriedades físico-hídricas e a transformação de macroporos em microporos é decorrente dessa compactação (Silva *et al.* 1986). Os microporos apresentam fundamental importância no armazenamento e retenção de água no solo, proporciona o fluxo de água quanto na vertical como na horizontal.

5.4. Densidade de Partícula (Dp)

Houve diferença significativa para densidade de partícula (Dp) entre camadas apenas no tratamento sem vinhaça, com 2,80, 2,89 e 2,87 g.cm⁻³ nas camadas 0-10, 10-20 e 20-30 cm, respectivamente (Tabela 4). Tais resultados corroboram o encontrado por Albuquerque *et al.* (2015), onde em sua pesquisa em área de mata e áreas com outros cultivos, numa camada de 0-30 cm, a Dp dos solos sob floresta foi menor comparada a outras formas de manejo.

Tabela 4: Densidade da partícula dos tratamentos estudados nas camadas 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 30 cm

CAMADAS (cm)	TRATAMENTO		
	SEM VINHAÇA	COM VINHAÇA	MATA
	g.cm ⁻³		
0-10	2,80 Ba	2,69 Ba	2,74 Ba
10-20	2,89 Aa	2,72 Ba	2,75 Ba
20-30	2,87 Aa	2,73 Ba	2,73 Ba

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem significativamente (p<0,05) pelo Teste de Tukey. (*) Significante (p<0,05).

5.5. Carbono Orgânico Total (COT) e Matéria Orgânica (M.O)

Ocorreu diferença significativa entre os tratamentos para os atributos carbono orgânico total (COT) e Matéria orgânica do solo (MOS), onde os maiores teores observados encontram-se no tratamento sob mata nativa, que por sua vez foram muito próximos dos valores encontrados no tratamento com vinhaça (Tabela 5). Esses resultados sugerem que a adição da vinhaça contribuiu para que os teores de COT nessas áreas sejam tão próximos às áreas sob mata nativa. Segundo Rubens *et al.* (2010), o aporte de COT no tratamento com vinhaça pode se justificar pela quantidade de matéria orgânica presente na vinhaça. Já os valores encontrados na mata podem ser associados ao maior aporte de serapilheira por essa área, corroborando as pesquisas de Fernandez *et al.* (2010), Loss *et al.* (2011), Junior *et al.* (2012), Liu *et al.* (2014) e Li *et al.* (2016).

Tabela 5: Teores de Carbono Orgânico Total e Matéria Orgânica dos tratamentos estudados.

TRATAMENTOS Camada (0 a 20)	COT	M.O
	dag.Kg ⁻¹	
SEM VINHAÇA	1,40 B	2,41 B
COM VINHAÇA	2,21 AB	3,81 AB
MATA	2,35 A	4,05 A

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna não diferem significativamente (p<0,05) pelo Teste de Tukey. (*) Significante (p<0,05).

Rosset, J. S. et. al. (2014) ao avaliarem o Carbono orgânico total e matéria orgânica no parque nacional de Serra de Itabaiana observaram que o solo da área de mata nativa apresentou maiores teores e estoques de carbono orgânico total e das frações humificadas da matéria orgânica do solo e, dentre as áreas manejadas com cana-de-açúcar, aquela com aplicação de vinhaça, apresenta maiores estoques de carbono orgânico total e das frações humificadas, como melhoria nos atributos químicos do solo. Já o solo da área sem utilização de resíduos apresentou os menores teores de C, corroborando os dados encontrados nas áreas em estudo.

O trabalho também identificou que cultivo com cana-de-açúcar reduz o teor de carbono orgânico total e matéria orgânica particulada em relação ao solo sob mata nativa, observando-se menor redução nos teores desses atributos no solo que recebeu vinhaça, concordando com Apolino J. N. da Silva *et al.* (2006) em seu trabalho com matéria orgânica em argissolos coesos manejados com cana-de-açúcar.

5.6. Respiração basal do solo(C-CO₂), Carbono da biomassa microbiana do solo (C-BMS), Quociente Metabólico (qCO₂) e Quociente Microbiano (qMic)

Quanto a respiração basal do solo (C-CO₂) não houve diferença significativa entre os sistemas avaliados, enquanto para o Carbono da biomassa microbiana (C-BMS) ocorreu diferença significativa entre os tratamentos avaliados (**Tabela 6**).

Quando observado do ponto de vista nutricional, maior C-BMS pode ser interessante, pois a atividade microbiana durante a decomposição dos resíduos vai disponibilizar nutrientes para as culturas, em contrapartida, essa maior liberação de C pode ser indesejável do ponto de vista ambiental, pois significa maior liberação de C para a atmosfera.

Tabela 6: Respiração basal do solo(C-CO₂), Carbono da biomassa microbiana do solo (C-BMS), Quociente Metabólico (qCO₂) e Quociente Microbiano (qMic)

TRATAMENTOS	C-BMS	C-CO ₂	qCO ₂	qMIC
Camada (0 a 20cm)	µg CO ₂ .g solo ⁻¹	µg CO ₂ .g solo ⁻¹ .dia ⁻¹	µg CO ₂ .g solo ⁻¹ .dia ⁻¹	%
SEM VINHAÇA	31,98 B	17,68 A	57,36 A	2,33 B
COM VINHAÇA	90,13 A	21,24 A	24,74 AB	4,07 A
MATA	85,59 A	11,16 A	13,13 B	3,07 A

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha não diferem significativamente (p<0,05) pelo Teste de Tukey. (*) Significante (p<0,05).

Os maiores valores de C-BMS são geralmente encontrados em solos de sistemas naturais, com destaque para os ambientes onde há um maior fluxo de resíduos e matéria

orgânica, juntamente com a ausência de perturbações decorrentes de atividade antrópica, tornam possível a existência de maiores quantidades de CBMS, indicando o maior equilíbrio da microbiota do solo nesse ecossistema. (Gomes, M. S. et al, 2017).

Houve diferença significativa para a variável C-BMS, onde o tratamento sem vinhaça apresentou a menor taxa de C-BMS ($31,98 \mu\text{g CO}_2.\text{g solo}^{-1}$). Este fato pode estar relacionado ao manejo do solo, principalmente operações de aração e gradagem, que deixam o solo mais exposto. O tratamento com vinhaça, mesmo sendo manejado da mesma forma, apresentou maior taxa de C-CBMS ($90,13 \mu\text{g CO}_2.\text{g solo}^{-1}$) isso ocorreu porque a adição da vinhaça ao solo aporta grandes quantidades de MO e, deste modo, impede que essa concentração diminua. O revolvimento do solo estimula as comunidades microbianas e a fauna do solo a usarem, de forma mais intensiva, a matéria orgânica presente como fonte de carbono, provocando um desequilíbrio no processo de ciclagem de nutrientes do solo.

A taxa de C-CO₂ está ligada à quantidade de carbono do solo, indicando maior atividade biológica nos tratamentos com vinhaça e de mata, que está diretamente relacionada com a disponibilidade de C do solo e/ou da biomassa microbiana (Mercante et al., 2004). O que corrobora as informações desse trabalho, que identificou uma maior respiração basal do solo nos tratamentos com vinhaça e sob mata nativa, devido ao aporte de MO que a vinhaça promove e em função do alto aporte de serrapilheira pela mata, respectivamente.

Os aumentos na emissão de C-CO₂ são reflexos tanto do incremento da C-BMS (maior número de células respirando), quanto da maior atividade metabólica das células microbianas, demandada para suprir as necessidades energéticas e de carbono da C-CBMS ativa. Uma vez que a respiração basal do solo está diretamente relacionada à atuação dos micro-organismos na decomposição de resíduos orgânicos. (Alves, 2015). A elevação da respiração microbiana, após aplicação de vinhaça nos solos é geralmente atribuída ao alto teor de C solúvel e de rápida assimilação, presente no efluente (Pramanik; Chung, 2011), o qual é fonte rápida de energia para os micro-organismos (Prata et al., 2001).

De acordo com Colozzi Filho et al. (1999), sugere-se que os valores da relação C_{mic}/CO_2 que expressam uma condição de equilíbrio do C no solo seriam de 2,3 para monoculturas e 4,4 para rotação de culturas (Anderson & Domsch, 1989). Assim, em solos nos quais esses valores são maiores ou menores estaria ocorrendo, respectivamente, acúmulo ou perdas de C. Foram encontrados 4,07 % para o tratamento com vinhaça, 3,07% na mata e 2,33% no tratamento sem vinhaça, indicando que os sistemas se encontram em condição de equilíbrio.

O menor e maior quociente metabólico ou respiratório (qCO_2) foram observados no tratamento de mata e sem vinhaça, respectivamente (**Tabela 6**). De acordo com De-Polli & Pimentel (2005), quanto menor o qCO_2 , mais eficiente é a biomassa microbiana no uso de C, e menores são as perdas na forma de CO_2 . Assim, os resultados obtidos permitem inferir que, no tratamento mata havia uma população microbiana com elevadas taxas de respiração. Essas condições podem ser resultantes da quantidade e da qualidade da matéria orgânica disponível. Portanto, assim como relatado por De-Polli & Pimentel (2005), pode-se inferir que o qCO_2 é um indicador sensível para estimar a atividade biológica e a qualidade do solo. Maiores valores de qCO_2 indicam maiores perdas de C no sistema na forma de CO_2 por unidade de biomassa microbiana.

O maior quociente microbiano ($qMIC$) ocorreu na área com vinhaça e não diferiu significativamente do tratamento mata nativa. Segundo Mercante et al. (2004), maiores taxas de $qMIC$ implicam em maior imobilização temporária de nutrientes e, conseqüentemente, menor propensão a perdas no sistema solo-planta.

Este resultado era esperado, pois assim como a vinhaça contribui com o aporte de matéria orgânica ao solo, a contribuição da vegetação da mata nativa promove uma cobertura do solo que mantém a umidade, evitando grandes oscilações na temperatura, além de contribuir com fonte de energia para o desenvolvimento microbiano (Wood, 1991).

Matsuoka et al. (2003) ressaltam ainda que condições mais favoráveis para a biomassa microbiana em solos sob vegetação nativa podem ser atribuídas ao acúmulo de serapilheira, que condiciona menor variação e níveis mais adequados de temperatura e umidade.

6. CONCLUSÕES

Solos manejados com a aplicação de vinhaça são mais resistentes a mudança da densidade do solo, densidade de partícula, granulometria e classe textural, que influenciam diretamente na compactação do solo.

O solo manejado sem aplicação de vinhaça tem o menor volume de poros, o que indica menor tendência de compactação quando o canavial é conduzido com a aplicação de vinhaça.

O tratamento com vinhaça apresentou maior quantidade de carbono da biomassa microbiana do que os tratamentos sem vinhaça e mata.

Houve maior perda de carbono na forma de CO₂ no tratamento sem vinhaça do que nos tratamentos com vinhaça e mata.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, T. H.; DOMSCH, K. H. **The metabolic quotient for CO₂ (qCO₂) as a specific activity parameter to assess the effect of environmental condition, such as pH on the microbial biomass of forest soils.** *Soil Biology and Biochemistry*, Amsterdam, v. 23, n. 3, p. 393-395, 1993.

ANDERSON, T.H. & DOMSCH, K.H. **Ratios of microbial biomass carbon to total organic in arable soils.** *Soil Biol. Biochem.*, 21:474-479, 1989.

ANDRADE, J. **Construção de um Índice de Sustentabilidade Ambiental para a Agroindústria Paulista de Cana-de-Açúcar [ISAAC].** 2009, 259 p. Dissertação (Mestrado Profissional). Escola de Economia de São Paulo, Faculdade Getúlio Vargas, São Paulo, 2009.

ALBUQUERQUE, F. S.; RODRIGUES, L. N.; MAGALHÃES, Y. M. C.; NERY, A. R **Densidade e porosidade de um latossolo amarelo distrófico sob pastagem e floresta.** Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia. Fortaleza/CE, 2015.

ALMEIDA, B. G.; FREITAS, P. L.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M.; DONAGEMMA, G. K. Porosidade. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (eds.). **Manual de métodos de análise de solo.** 3.ed. rev. ampl. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2017a. p.82-94. ISBN: 978-85-7035-771-7

ALMEIDA, B. G. **Métodos alternativos de determinação de parâmetros Físicos do solo e uso de condicionadores químicos no estudo da qualidade do solo, 105p.,** Tese Doutorado. ESALQ/USP, 2008.

ALMEIDA, B. G.; VIANA, J. H. M.; TEIXEIRA, W. G.; DONAGEMMA, G. K. Densidade do solo. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (eds.). **Manual de métodos de análise de solo.** 3.ed. rev. ampl. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2017b. p.65-75. ISBN: 978-85-7035-771-7

ALVES, M. C., et al. (2018). **Effects of vinasse application on physical properties and increases microbial biomass and activity of a tropical soil.** *Agricultural Water Management*, 203, 168-175.

ALVES, Paulo Roger Lopes. **Avaliação exotoxicológica da vinhaça de cana-de-açúcar no solo,** Tese de doutorado revisada, ESALQ/USP, 2015.

APHA. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. American Public Health Association 20^a Edition, Washington D.C., 3118p. 2003.

ALMEIDA, J.R. **O problema da vinhaça em São Paulo**, Piracicaba, 1952. p. 1-21. (Boletim Técnico COPERSUCAR, 3).

APOLINO J. N. da SILVA et al. **Matéria orgânica e propriedades físicas de um argissolo amarelo coeso sob sistemas de manejo com cana-de-açúcar**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.10, n.3, p.579–585, 2006

BENGOUGH, A. G. et al., A. **Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits**. Journal of Experimental Botany, v. 62, n. 1, p. 59- 68, 2011.

BOUMA, J. **Influence of soil macroporosity on environmental quality**. Advances in agronomy, Madison, 46(1), 1-37, 1991.

CAETANO, J. O.; VERGINASSI, A.; ASSIS, P. C. R.; CARNEIRO, M. A. C.; PAULINO, H B. **Indicadores de Qualidade de um Latossolo Vermelho sob Diferentes Sistemas de uso e Manejo**. Glogal Science and Technology, Rio Verde, v. 06, n. 01, 2013.

CHERUBIN, M. R.; EITELWEIN, M. T.; FABBRIS, C.; WEIRICH. S. W.; SILVA, R. F. da; SILVA, V. R. da, BASSO, C. J. **Qualidade física, química e biológica de um Latossolo com diferentes manejos e fertilizantes**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 39: p. 615-625, 2015.

CHRISTOFOLETTI, C.A.; Escher, J.P.; Correia, J.E.; Marinho, J.F.U.; Fontanetti, C.S. Sugarcane vinasse environmental implications of its use. Waste Management, v.33, p.2752–2761, 2013.

COCA, M., Barrocal, V.M.; Lucas, S.; Gonza’lez-Benito, G.; García-Cubero, M.T. **Protein production in Spirulinaplatensis biomass using beet vinasse-supplemented culture media**. Food and Bioproducts Processing, v.94, n.9, p.306–312, 2015.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da Safra Brasileira: cana-de-açúcar**. Safra 2023/24, terceiro levantamento. Dezembro, 2022. 62p.

- CUNHA, E. Q. DA.; STONE, L. F.; MOREIRA, J. A. A.; FERREIRA, E. P. B.; DIDONET, A. D.; LEANDO, W. M. **Sistemas de preparo do solo e culturas de cobertura na produção orgânica de feijão e milho**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 35 (2), pp. 589-602, 2011
- CUNHA, R. C. A.; Costa, A. C. S.; Maset Filho, B.; Casarini, D. C. P. **Effects of irrigation with vinasse and dynamics of its constituents in the soil: I – physical and chemical aspects**. Water Science Technology, v.19, n.8, p.155-165, 1981.
- EMBRAPA, **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**. Manual de Métodos de Análise de solo. 3º ed. rev. e ampl., Brasília, DF: Embrapa, 2017. 577p.
- EMBRAPA. **Manual de análises químicas de solos**, plantas e fertilizantes. Editor técnico: Fábio César da Silva. 2 Ed. Ver. Ampl. – Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2009.
- EMBRAPA, **Manual de métodos de análise de solo**. Centro Nacional de Pesquisa de Solo. 2.ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPq, 1997.
- ESPAÑA-GAMBOA, E; MIJANGOS-CORTES, J; BARAHONA-PEREZ, L.; DOMINGUEZ-MALDONADO, J; HERNÁNDEZ-ZARATE, G.; ALZATE-GAVIRIA, L. **Vinasses: characterization and treatments**. Waste Management & Research, London, v. 2, p.1235-1250, 2011.
- FERNANDES, D. D. et al. **Utilização do etanol em motores a combustão no Brasil**. Universo do Petróleo e do gás, Nova Venécia, v. 1, n. 3, 2010.
- FERNÁNDEZ, R.; QUIROGA, A.; ZORATI, C.; NOELLEMAYER, E. **Carbon contents and respiration rates of aggregate size fractions under no-till and conventional tillage**. Soil Tillage Research, v.109, p. 103-109, 2010.
- FILOSO, S., et al. (2017). **Sugarcane ethanol production in Brazil: challenges and perspectives for sustainability**. BioScience, 67(12), 1026-1035.
- FREIRE, W. J.; CORTEZ, L. A. B. **Vinhaça de cana-de-açúcar**. Guaíba: Agropecuária, 2000.
- GAMA-RODRIGUES, E. F.; BARROS, N. F. de; GAMA-RODRIGUES, A. C.; SANTOS, G. A. **Nitrogênio, Carbono e Atividade da biomassa microbiana do solo em plantações de eucalipto**. Revi. Bras. de Ciênc. do Solo, v.29, p.893-901, 2005.
- GOLDEMBERG, J., et al. (2018). **Ethanol for a sustainable energy future**. Science, 359(6375), 1320-1323.

GUERIF, J. **L'analyse de la porosité: Application à l'étude du compactage des sols**. In: MONIER, G & GROSS, M.J., eds. Soil compaction and regeneration. Roterdan, CEE, 197. P.122-131.

GUILHERME, L.R.G.; FAQUIN, V.; FURTINI NETO, A.E. & CARVALHO, J.G., eds. **Inter-relação fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas**. Soil fertility, soil biology, and plant nutrition interrelationships. Viçosa, MG, SBCS; Lavras, UFLA/DCS, 1999. p.487-508.

HILLEL, D. **Solo e água: fenômenos e princípios físicos**. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1970, 231p.

JENKINSON, D.S.; LADD, J.N. **Microbial biomass in soil measurement and turnover**. In: PAUL, E. A.; LADD, J.N.. (Ed.). Soil biochemistry. New York: Dekker, 1981. v. 5.

JUNIOR, C. C.; PICCOLO, M. C.; NETO, M. S.; CAMARGO, P. B.; CERRI, C. C.; BERNOUX, M. **Carbono em agregados do solo sob vegetação nativa, pastagem, e sistemas agrícolas no Bioma Cerrado**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.36, p.1311-1321.2012.

KLEIN, V. A. **Física do solo**. Passo Fundo: Ed. Universidade de Passo Fundo, 2 ed., 240p., 2012.

LI, S. Y.; GU, X.; ZHUANG, J.; AN, T. T.; PEI, J. B.; XIE, H. T.; LI, H.; FU, S. F.; WANG, J. K. **Distribution and storage of crop residue carbon in aggregates and its contribution to organic carbon of soil with low fertility**. Soil Tillage Research, v.155, p.199-206, 2016.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: EDUSP, 2005. 335p.

LIU, M. Y.; CHANG, Q. R.; QI, Y. B.; LIU, J.; CHEN, T. **Aggregation and soil organic carbon fractions under different land uses on the tableland of the Loess Plateau of China**. Catena, v. 115, p. 19-28, 2014.

LOMANTO SANTA CRUZ, Luiz Felipe; GRIGOLETTO DUARTE, Carla; MALHEIROS, Tadeu Fabrício; CLETO PIRES, Eduardo. **Análise da viabilidade técnica, econômica e ambiental das atuais formas de aproveitamento da vinhaça: fertirrigação, concentração e biodigestão**. Revista Brasileira de Ciências Ambientais, [s. l.], ano 2013, n. 29, 29 set. 2013.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; SCHULIZ, N.; ANJOS, L. H. C.; SILVA, E. M. R. **Frações orgânicas e índice de manejo de carbono do solo em diferentes sistemas de produção orgânica**. IDESIA, v. 29, p. 11-19. 2011.

- LUDOVICE, M. T. F. **Estudo do efeito poluente da vinhaça infiltrada em canal condutor de terra sobre o lençol freático**. 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – UNICAMP, Campinas.
- MATSUOKA, M.; MENDES, L.C. & LOUREIRO, M.F. **Biomassa microbiana e atividade enzimática em solos sob vegetação nativa e sistemas agrícolas anuais e perenes na região de Primavera do Leste (MT)**. R. Bras. Ci. Solo, 7:425-433, 2003.
- MELLISSA A. S. da Silva et al. **Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.11, n.1, p.108–114, 2007
- MENDONÇA, E.S.; MATOS, E.S.; **Matéria orgânica do solo: Métodos de análise**. Viçosa: UFV, 107p.; 2005.
- MORAES, B. S.; ZAIAT, M.; BONOMI, A. **Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane ethanol production in Brazil: Challenges and perspectives**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 44, p. 888–903, 2015.
- NAVARRO, A.R.; Sepúlveda, M.D.C.; Rubio, M.C. **Bioconcentration of vinasse from the alcoholic fermentation of sugar cane molasses**. Waste Management, v.20, n.7, p.581–585, 2000.
- NUNES, R. S., et al. (2017). **Vinasse application effects on soil and implications for sugarcane crop**. Land Degradation & Development, 28(4), 1410-1419.
- OLIVEIRA, R. A., et al. (2016). **Biotechnology applied to sugarcane improvement: strategies to develop improved genotypes**. Bioenergy Research, 9(3), 929-945.
- RAFALDINI, M. E. et al. **Controle biológico para sistema de vinhaça no solo**. Engenharia Ambiental, Espírito Santo do Pinhal, v. 3, n. 2, p. 041-057, 2006.
- REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. **Propriedades física do solo**. 2006. Disponível em: <https://www.agro.ufg.br/up/68/o/na_lise_da_zona_n_o_saturada_do_solo__textp.pdf>. Acesso em: 15 de agosto de 2023.
- RIPOLI, T. C. C., et al. (2007). **A cana-de-açúcar no Brasil: da primeira colheita à agroindústria sucroalcooleira**. Revista de Economia e Sociologia Rural, 45(1), 5-32.

RODRIGUES MUNIZ, Thays; RODRIGUES PEREIRA, Ana Maiara. **Concentrador De Vinhaça: Uma Análise De Viabilidade Econômica**. UNIVERSIDADE DE RIO VERDE, [s. l.], 14 maio 2019.

ROSSET, J. S. et al. **Chemical attributes, total organic carbon stock and humified fractions of organic matter soil submitted to different systems of sugarcane management**, Semina: Ciências Agrárias, Londrina, v. 35, n. 5, p. 2351-2366, set./out. 2014

ROSSETO, A. J. **Utilização agrônômica dos subprodutos e resíduos da indústria açucareira e alcooleira**. In: PARANHOS, S.B. Cana-de-açúcar: cultivo e utilização. Campinas: Fundação Cargill, 1987, v.2, p. 435-504.

RUBENS. P. B. et al. **ALTERAÇÕES EM ATRIBUTOS QUÍMICOS DE SOLO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR E ADIÇÃO DE VINHAÇA**. Pesq. Agropec. Trop., Goiânia, v. 40, n. 3, p. 341-346, jul./set. 2010 (2010)

SATYAWALI, Y.; BALAKRISHNAN, M. **Wastewater treatment in molasses based alcohol distilleries for COD and color removal: a review**. Agriculture, Ecosystems and Environment, Amsterdam, v. 86, p. 481–497, 2008.

SEPLAGE, Secretaria de Planejamento e Gestão de Pernambuco. **Visão de Futuro – Pernambuco 2035**. 2017. 85p

SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L. & CAMARGO, O.A. **Influência da compactação nas propriedades físicas de dois latossolos**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 10:91- 95, 1986.

SILVA, B. E. C. et al., **Propriedades físicas do solo em função de diferentes manejos de pastagem**. Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável, v. 7, n. 3, p. 66-75, 2017.

SILVA, M. A. S.; GRIEBELER, N. P.; BORGES, L. C. **Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiente. Campina Grande, v. 11, n. 1, p. 108-114, 2007.

SIMÕES NETO, D.; Oliveira, A.C. de; Rocha, A.T. da; Freire, F.J.; Freire, M.B.G. dos S.; Nascimento, C.W.A. do. **Características agroindustriais da cana-de-açúcar em função da adubação fosfatada, em solos de Pernambuco**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola, v. 16, n.4, p.347-354, 2012.

SU, T.M.; Li, Y.R.; Mo, Y.L.; Lu, C.Y.; Wei, G.P.; Jiang, Z.P. **Effect of vinasse application on the agronomic characters of sugarcane**. Chinese Journal of Soil Science, v.40, n.2, p.276–278, 2009.

SU, T.M., Li, Y.R.; Wei, G.P.; Jiang, Z.P.; Liao, Q.; Zhu, S.B. **Macronutrients absorption and surface runoff losses under different fertilizer treatments in sugarcane field**. Sugar Tech, v.14, n.3, p. 255–260, 2012.

TOPPA, EVB, Jadoski, CJ, Julianetti, A, Hulshof, T, Ono, EO, & Rodrigues, JD (2010) **Aspectos da fisiologia de produção da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.)**. Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia, 215-221.

VASCONCELOS, R. F. B.; SOUZA, E. R. de; CANTALICE, J. R. B.; SILVA, L. S. **Qualidade física de Latossolo Amarelo de tabuleiros costeiros em diferentes sistemas de manejo da cana-de-açúcar**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 18, n.4, p.381-386, 2014.

VALENTINE, T. A. et al., **Soil strength and macropore volume limit root elongation rates in many UK agricultural soils**. Annals of Botany, v. 110, n. 7, p. 259-270, 2012.

YANG, S.D.; Liu, J.X.; Wu, J. **Effects of vinasse and press mud application on the biological properties of soils and productivity of sugarcane**. Sugar Tech, v.15, n.2, p.152–158, 2013.