

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO

JOSÉ ALFREDO NUNES

**AVALIAÇÃO VISUAL DA ESTRUTURA DO SOLO EM ÁREA
PRODUTORA DE CANA-DE-AÇÚCAR COM DIFERENTES MANEJOS
AGRÍCOLAS**

RECIFE

2022

José Alfredo Nunes
Engenheiro Agrônomo

Avaliação visual da estrutura do solo em área produtora de cana-de-açúcar com diferentes manejos agrícolas

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Edivan Rodrigues de Souza

Coorientadores: Prof. Dr. Raphael Moreira Beirigo

Dr^a Monaliza Alves dos Santos

**Recife
2022**

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)

- N972a Nunes, José Alfredo
Avaliação visual da estrutura do solo em área produtora de cana-de-açúcar com diferentes manejos agrícolas / José Alfredo Nunes. - 2022.
68 f. : il.
- Orientador: Edivan Rodrigues de Souza.
Coorientadora: Monaliza Alves dos .
Inclui referências e anexo(s).
- Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Recife, 2022.
1. Qualidade do solo. 2. Manejo e conservação. 3. Física do solo. 4. Vinhaça. I. Souza, Edivan Rodrigues de, orient. II. , Monaliza Alves dos, coorient. III. Título

CDD 631.4

JOSÉ ALFREDO NUNES

Avaliação visual da estrutura do solo em área produtora de cana-de-açúcar com diferentes manejos agrícolas

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Aprovada em 04 de Março de 2022

Prof. Dr. Edivan Rodrigues de Souza

Orientador

Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE)

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a. Dr.^a. Rachel Muylaert Locks Guimarães

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

Prof. Dr. Ademir de Oliveira Ferreira

Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE)

DEDICATÓRIA

Dedico este manuscrito que representa um período fundamental ao meu crescimento como ser humano, a toda minha família e em especial ao meu Pai que contribuiu incansavelmente para essa conquista, DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente a Deus, por ter me abençoado com a dádiva da vida e com ela conquistar sabedoria para trilhar meus próprios caminhos.

Ao meu Pai José Nunes Filho que jamais mediu esforços para me proporcionar melhores condições durante toda minha trajetória acadêmica, a minha mãe Vilma que desde meus 8 anos de idade me abençoa com seus ensinamentos sobre a vida, a minha mãe Lucilene que mesmo distante sempre esteve presente em meu coração, aos meus irmãos Guthemberg, Guthierrez e Guthermann, as minhas cunhadas Diana, Cláudia e Lílian que sempre estiveram à disposição nos momentos que mais precisei. Ao meu Tio Severino (Biu) que me levava a escola de bicicleta sem qualquer sacrifício, a minha vó Josefa que sempre foi uma verdadeira mãe em todos os aspectos da vida.

À minha esposa, não existem palavras para expressar o quão importante és em minha vida, sempre companheira nas horas mais precisas e que vem me apoiando incansavelmente ao longo dos últimos 6 anos, não tenho dúvidas de que essa caminhada teria sido tortuosa sem a tua presença.

Ao meu orientador, Prof. Edivan Rodrigues de Souza, que mesmo com todos os empecilhos causados pela pandemia da COVID-19, conseguiu está sempre disponível e acessível com seus ensinamentos, não só acadêmicos, mas sobre valores que nos servem de bagagem durante a vida.

Aos meus coorientadores, Professor Raphael Moreira Beirigo e Dr.^a Monaliza Alves dos Santos, pelo apoio e parceria ao longo do desenvolvimento da pesquisa.

Aos meus orientadores Leonardo Dantas (UFPB/CCHSA), sendo o primeiro a me oferecer uma oportunidade de ingressar no viés científico da academia, ao professor Leonardo Pascoal (UFPB/CCHSA), ao professor Raphael Beirigo que mais uma vez foi o primeiro a me oferecer uma oportunidade de ingressar em um programa de iniciação científica (PIBIC) na graduação e me proporcionou a oportunidade de sair do Nordeste pela primeira vez, tendo estagiado por 15 dias na USP/ESALQ e por todo seu carisma e sua amizade. A professora Márcia Miranda e ao professor Roseilton Fernandes, que me proporcionaram a oportunidade de complementar os pilares da universidade com extensão e ensino.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco, e aos docentes do Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo pelos ensinamentos e momentos compartilhados durante estes dois anos.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão da bolsa.

À Usina Miriri LTDA pela parceria, infraestrutura e apoio na execução dessa pesquisa.

Ao Dr. Pedro Henrique Neves de Souza, representante da usina Miriri, por todo apoio e dedicação durante todo o processo, desde a definição dos manejos, coleta das amostras, a disponibilização de informações das áreas.

À Fundação Agrisus, que através de seus editais agraciou este projeto de pesquisa com financiamento, capaz de facilitar as etapas de desenvolvimento da pesquisa.

Ao Professor, Emidio Cantídio Almeida de Oliveira, pelo empenho e dedicação na interlocução entre nosso grupo de pesquisa e a Usina Miriri.

À Professora, Rachel Muylaert Locks Guimarães, pela parceria no desenvolvimento da pesquisa.

À minha turma de mestrado 2020.1, que mesmo a distância conseguimos compartilhar momentos de alegria.

Aos integrantes do grupo de pesquisa Solo-Água-planta (SAP), que não mediram esforços para que este trabalho fosse realizado com êxito: Monaliza, Jaciane, Francisco, Lucas, Rafael, Kauê, Victor e Paulo.

Aos funcionários da UFRPE, Eudes, Pedro e Vera, que jamais mediram esforços para me proporcionar uma estada mais agradável durante a realização desta pesquisa.

A todos, muito obrigado!

*"[...] Tudo o que
a mente humana
pode conceber,
ela pode conquistar [...]."*

(Napoleon Hill)

"[...] Até aqui nos ajudou o SENHOR [...]"

(1 Samuel 7:12)

Avaliação visual da estrutura do solo em área produtora de cana-de-açúcar com diferentes manejos agrícolas

RESUMO GERAL

Avaliar a estrutura do solo é importante para identificar as consequências dos manejos agrícolas, especialmente pela correlação estreita entre a estrutura do solo e os atributos que expressam o arranjo poroso do solo e sua relação com armazenamento de água e trocas gasosas. O tipo de manejo utilizado no cultivo de cana-de-açúcar interfere na estrutura do solo e deve ser avaliado por um método prático, confiável e de fácil reprodutibilidade. Nesse sentido, percebe-se na literatura uma lacuna de investigações sobre esses métodos em solos de áreas produtoras de cana-de-açúcar no Nordeste. Sendo assim, este trabalho investigou a metodologia da avaliação visual da estrutura do solo em áreas de cultivo de cana-de-açúcar com diferentes manejos agrícolas na mesorregião da zona da mata paraibana. Para tanto, foram realizadas coletas na usina Miriri Bioenergia e Alimentos S/A, produtora de cana-de-açúcar, pertencente ao município de Santa Rita, no estado da Paraíba. Foram amostrados três diferentes manejos: SQV - Cultivo de cana-de-açúcar em sequeiro com aplicação de vinhaça; IR - Cultivo de cana-de-açúcar irrigado e IRV - Cultivo de cana-de-açúcar irrigado aplicação de vinhaça, além de uma área de Vegetação nativa conservada. Os manejos foram amostrados na linha (L) de cultivo e na entrelinha (EL), com exceção da Área de vegetação nativa conservada com 5 repetições, totalizando 35 pontos de coleta. Os pontos de coletas consistiram de mini trincheiras (20 x 25 x 25 cm), com amostragens de solos deformado e não deformado nas camadas de 0-10 e de 10-20 cm para determinações de atributos físicos (granulometria, argila dispersa em água, índices de floculação e dispersão, densidade do solo, densidade de partículas, porosidade total, estabilidade de agregados, condutividade hidráulica e resistência do solo a penetração) e químicos (pH, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ e Al^{3+} trocáveis, H+Al, capacidade de troca catiônica (CTC), soma de bases (SB), condutividade elétrica do extrato de saturação e potencial osmótico das solução do solo). Para a determinação da *Visual Evaluation of Soil Structure* (VESS), os escores ou notas de 1 a 5 foram atribuídos aos blocos não deformados coletados nas mini-trincheiras. Para análise dos dados, utilizou-se da ANOVA, teste de comparação de médias de Scott- Knott ($p < 0,05$) e correlação de Pearson. Na análise da VESS, não houve diferença significativa para os manejos estudados. Os valores baixos na VESS sugerem uma condição estrutural adequada para os manejos avaliados. Todas as variáveis analisadas mostraram diferenças significativas entre as linhas de plantio e as entrelinhas. Por meio da correlação de Pearson ficou demonstrada a relação direta entre a VESS e os atributos físicos, com correlação significativa, positivas com a resistência do solo a penetração de raízes e negativas com a porosidade total e condutividade hidráulica saturada. Foi possível identificar que há diferença do local de amostragem: linha e entre linha. Dessa forma, os resultados encontrados na linha de plantio indicam que, quando se faz o uso do tráfego controlado de máquinas, esses locais são menos afetados e proporcionam melhores condições para o estabelecimento da cultura ao longo do seu ciclo produtivo. Por fim, o método de VESS pode ser usado por produtores e técnicos de campo em áreas de produção de cana-de-açúcar na região nordeste do Brasil, como uma ferramenta para o monitoramento da estrutura do solo e definição de estratégias para melhorias ou manutenção dessas áreas.

Palavras-chave: Qualidade do solo. Manejo e conservação. Física do solo. Vinhaça.

Visual Evaluation of Soil Structure in a sugarcane producing area with different agricultural managements

GENERAL ABSTRACT

Assessing soil structure is important to identify the consequences of agricultural management, especially due to the close correlation between soil structure and the attributes that express the porous arrangement of the soil and its relationship with water storage and gas exchange. The type of management used in the cultivation of sugarcane interferes with the structure of the soil and must be evaluated by a practical, reliable and easily reproducible method. In this sense, there is a gap in the literature on investigations on these methods in soils in sugarcane producing areas in the Northeast. Therefore, this work investigated the methodology of Visual Evaluation of Soil Structure in areas of sugarcane cultivation with different agricultural management in the mesoregion of the forest zone of Paraíba. For that, samples were taken at the Miriri bioenergy and foods S/A plant, a sugarcane producer, belonging to the municipality of Santa Rita, in the state of Paraíba. Three different managements were sampled: SQV - Cultivation of sugarcane in rainfed areas with application of vinasse; IR - Irrigated sugarcane cultivation and IRV - Irrigated sugarcane cultivation with vinasse, in addition to an area of conserved native vegetation. The managements were sampled in the row (L) of cultivation and between the rows (EL), with the exception of the area of native vegetation conserved with 5 repetitions, totaling 35 collection points. The collection points consist of mini trenches (20 x 25 x 25 cm), with samples of deformed and non-deformed soils in the 0-10 and 10-20 cm layers for determination of physical attributes (granulometry, clay dispersed in water, flocculation and dispersion indices, soil density, particle density, total porosity, aggregate stability, hydraulic conductivity and soil penetration resistance) and chemical (pH, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ and exchangeable Al^{3+} , H^+ , cation exchange capacity (CTC), sum of bases (SB), electrical conductivity of the saturation extract and osmotic potential of the soil solution). To determine the Visual Evaluation of Soil Structure (VESS), scores or grades from 1 to 5 were assigned to the undeformed blocks collected in the mini-trenches. For data analysis, ANOVA, Scott-Knott mean comparison test ($p < 0.05$) and Pearson correlation were used. In the analysis of VESS, there was no significant difference for the managements studied. The low values in VESS suggest an adequate structural condition for the evaluated managements. All the variables analyzed showed significant differences between the planting lines and between the lines. Through Pearson's correlation, the direct relationship between VESS and physical attributes was demonstrated, with a significant correlation, positive with soil resistance to root penetration and negative with total porosity and saturated hydraulic conductivity. It was possible to identify that there is a difference in the sampling location: line and between lines. Thus, the results found in the planting line indicate that, when using controlled machine traffic, these locations are less affected and provide better conditions for the establishment of the crop throughout its production cycle. Finally, the VESS method can be used by producers and field technicians in sugarcane production areas in the northeast region of Brazil, as a tool for monitoring soil structure and defining strategies for improvement or maintenance of these areas.

Keywords: Soil quality. Management and conservation. Soil physics. Vinasse.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização geográfica da área de estudo na Usina Miriri - Santa Rita-PB.....	26
Figura 2. Média da distribuição mensal da precipitação pluviométrica das áreas estudadas no ano da pesquisa (2021) região leste: pé de peru e santa Emília II; região central Miriri capim e Miriri sapé	27
Figura 3. A) Croqui de amostragem; B); Abertura das minis trincheiras e coleta das amostras deformadas e não deformadas; C) Retirada do bloco e separação das camadas contrastantes para a VESS; (D) Esquema ilustrativo das notas atribuídas em campo de acordo com a qualidade estrutura (Sq)	29
Figura 4. Coleta do bloco (A); bloco na bandeja (B); medição das camadas com auxílio da régua da cartilha VESS (C); analisando o bloco e conferindo a nota de acordo com a cartilha VESS (D).....	30
Figura 5. Cartilha de Avaliação Visual da Estrutura do Solo.	31
Figura 6. Amostras em saturação (A); amostras na mesa de tensão (B); amostras submetidas a tensão de 3Kpa (C)	33
Figura 7. Determinação da condutividade hidráulica saturada (Ksat)	33
Figura 8. Separação dos agregados	34
Figura 9. Amostra submetida ao teste de resistência a penetração (RP) por penetrômetro eletrônico de bancada (MA – 933®)	35
Figura 10. Densidade do solo (DS) das áreas de cana-de-açúcar com diferentes manejos agrícolas na usina Miriri – Santa Rita-PB – VN (vegetação nativa); SQV (Cultivo de cana-de-açúcar em sequeiro com aplicação de vinhaça); IR (Cultivo de cana-de-açúcar irrigado sem aplicação de vinhaça); IRV (Cultivo de cana-de-açúcar irrigado com aplicação de vinhaça).	39
Figura 11. Porosidade total (PT), macroporosidade (MA), mesoporosidade (ME) e microporosidade (MI) das áreas de cana-de-açúcar com diferentes manejos agrícolas na usina Miriri – Santa Rita-PB – VN (vegetação nativa); SQV (Cultivo de cana-de-açúcar em sequeiro com aplicação de vinhaça); IR (Cultivo de cana-de-açúcar irrigado sem aplicação de vinhaça); IRV (Cultivo de cana-de-açúcar irrigado com aplicação de vinhaça).....	42
Figura 12. Condutividade hidráulica saturada (Ksat) das áreas de cana-de-açúcar com diferentes manejos agrícolas na usina Miriri – Santa Rita-PB – VN (vegetação nativa); SQV (Cultivo de cana-de-açúcar em sequeiro com aplicação de vinhaça); IR (Cultivo de cana-de-açúcar irrigado sem aplicação de vinhaça); IRV (Cultivo de cana-de-açúcar irrigado com aplicação de vinhaça).....	46

Figura 13. Índice de estabilidade de agregados (IEA) das áreas de cana-de-açúcar com diferentes manejos agrícolas na usina Miriri – Santa Rita-PB – VN (vegetação nativa); SQV (Cultivo de cana-de-açúcar em sequeiro com aplicação de vinhaça); IR (Cultivo de cana-de-açúcar irrigado sem aplicação de vinhaça); IRV (Cultivo de cana-de-açúcar irrigado com aplicação de vinhaça). 48

Figura 14. Resistência do solo a penetração de raízes (RP) das áreas de cana-de-açúcar com diferentes manejos agrícolas na usina Miriri – Santa Rita-PB – VN (vegetação nativa); SQV (Cultivo de cana-de-açúcar em sequeiro com aplicação de vinhaça); IR (Cultivo de cana-de-açúcar irrigado sem aplicação de vinhaça); IRV (Cultivo de cana-de-açúcar irrigado com aplicação de vinhaça). 51

Figura 15. Avaliação Visual da Estrutura do Solo (VESS) das áreas de cana-de-açúcar com diferentes manejos agrícolas na usina Miriri – Santa Rita-PB – VN (vegetação nativa); SQV (Cultivo de cana-de-açúcar em sequeiro com aplicação de vinhaça); IR (Cultivo de cana-de-açúcar irrigado sem aplicação de vinhaça); IRV (Cultivo de cana-de-açúcar irrigado com aplicação de vinhaça). 52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Histórico de uso da terra e práticas de manejo para cada local estudado.	28
Tabela 2. Análise granulométrica e densidade de partículas dos manejos estudados	32
Tabela 3. Atributos químicos dos manejos estudados	37
Tabela 4. Média da massa proporcional de agregados do solo das áreas estudadas – VN (vegetação nativa); SQV (Cultivo de cana-de-açúcar em sequeiro com aplicação de vinhaça) IR (Cultivo de cana-de-açúcar irrigado sem aplicação de vinhaça); IRV (Cultivo de cana-de-açúcar irrigado com aplicação de vinhaça).	50
Tabela 5. Correlações entre a Avaliação Visual da Estrutura do solo (VESS) e os principais atributos físicos indicadores da qualidade estrutural do solo	54

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL.....	15
1.1	Hipóteses	16
1.2	Objetivos	16
1.2.1	<i>Objetivo Geral</i>	16
1.2.2	<i>Objetivos Específicos</i>	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Qualidade do solo.....	18
2.2	Estrutura do solo.....	19
2.2.1	Avaliação visual da estrutura do solo	20
2.3	Cultivo de Cana-de-açúcar	22
2.3.1	Aplicação de vinhaça em áreas com plantio de cana-de-açúcar	23
2.3.2	Cultivo irrigado e sequeiro.....	24
3	Material e Métodos	26
3.1	Localização da área de estudo	26
3.2	Critérios de seleção para escolha das áreas de coleta.....	27
3.3	Amostragem do solo.....	29
3.4	Descrição detalhada da VESS	29
3.5	Análise dos atributos físicos do solo	31
3.6	Análise dos atributos químicos do solo.....	36
3.7	Análise dos dados.....	38
4	Resultados e Discussão.....	39
4.1	Densidade do solo	39
4.2	Distribuição de poros no solo.....	41
4.3	Condutividade hidráulica saturada	46
4.4	Índice de estabilidade de agregados e classe de agregados.....	48

4.5	Resistência do solo a penetração de raízes	51
4.6	Avaliação Visual da Estrutura do Solo (VESS) e correlação com atributos físicos do solo	52
5	Conclusões	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		57
ANEXO A – Análise química da vinhaça aplicada nas áreas de estudo		68

1 INTRODUÇÃO GERAL

O conhecimento da qualidade da estrutura do solo é de fundamental importância para o manejo hídrico. Ao longo dos anos, o uso sucessivo de máquinas agrícolas pesadas, seja no preparo do solo ou no plantio, impulsionado pela falta de cobertura vegetal em áreas de produção agrícola, tem resultado na quebra dos agregados e rompimento da estrutura do solo, evidenciando danos que vão desde a redução da porosidade do solo, da taxa de infiltração e da condutividade hidráulica, até o aumento da densidade do solo, impulsionado pelo aumento da compactação do solo. Com isso, as raízes têm maior dificuldade de desenvolvimento, o que dificulta a absorção de água e nutrientes.

Em áreas de produção de cana-de-açúcar, a estrutura do solo é avaliada usando as propriedades físicas do solo que melhor se correlacionam com as suas condições estruturais. As principais delas são, densidade do solo, porosidade, resistência à penetração, estabilidade de agregados e condutividade hidráulica. Essas variáveis são mais específicas, por trazerem um detalhamento de cada aspecto físico do solo e por isso, requerem maior tempo de processamento, levando em consideração as etapas de coleta das amostras, análises laboratoriais e interpretação dos dados.

É comum que manejos sejam adaptados para condições específicas de clima, relevo e classe de solo, quando se tem água disponível, condições ideais de relevo e toda uma infraestrutura que dispõe dos mais variados insumos agrícolas. Os produtores adotam sistemas de irrigação que auxiliam na disponibilidade de água no solo para as plantas e ainda facilitam a aplicação de vinhaça por fertirrigação, que proporciona ao solo, aumento do carbono orgânico, da atividade microbológica, assim como a melhoria de atributos físicos.

Quando esses insumos não estão disponíveis ou quando a região apresenta baixos índices pluviométricos, onde a água é um fator limitante, os produtores optam pela utilização da agricultura em sequeiro, onde não há utilização de um sistema de irrigação. Assim, o produtor planeja-se para um melhor aproveitamento das épocas chuvosas. Sabe-se que o impacto das gotas de chuva é um dos principais responsáveis pela desagregação das partículas do solo e que um sistema de irrigação mal planejado também pode causar danos expressivos, como a aceleração dos processos erosivos.

A avaliação visual da estrutura do solo ou o termo em inglês *Visual Evaluation of Soil Structure* (VESS) tem sido utilizada majoritariamente no Sul e Sudeste do Brasil (CHERUBIN et al., 2017; GIAROLA et al., 2013; TUCHTENHAGEN et al., 2018), em diferentes condições (mudança no uso da terra, da vegetação nativa para pastagem e cana-de-açúcar; sistema de

plântio direto nas culturas da soja, milho e feijão, além de trigo, ervilha preta e ervilhaca; plântio direto, preparo convencional, integração-lavoura-pecuária e pastagens nativas, com os usos das culturas: azevém, soja, milho, arroz e trigo). Entretanto, pouco tem se avaliado essa metodologia em manejos adotados no Nordeste do Brasil. Há apenas um relato na literatura do uso dessa metodologia em cana-de-açúcar no Nordeste Brasileiro, o que pode ser conferido em CAVALCANTI et al. (2020).

Dessa forma, torna-se cada vez mais importante a realização de pesquisas científicas voltadas aos indicadores de qualidade física do solo na região nordeste do Brasil, direcionado para seus principais usos e potencialidades agrícolas, ainda, é necessário que haja integração entre os pesquisadores, produtores e técnicos de campo, com a finalidade de desenvolver e implantar metodologias simples e de fácil acesso. Para que seja possível, disponibilizar ferramentas capazes de expressarem resultados satisfatórios, que auxiliem na tomada de decisão final pelo produtor, seja na adoção de um sistema conservacionista, na seleção de culturas e/ou no uso de um sistema de irrigação.

1.1 Hipóteses

- O uso da avaliação visual da estrutura do solo (VESS) permite identificar as diferenças estruturais entre os cultivos irrigado, de sequeiro e com aplicação de vinhaça.
- A VESS é capaz de identificar e fornecer resultados diagnóstico das condições estruturais de solos da classe argissolo amarelo em áreas de cultivos de cana-de-açúcar e estes podem ser correlacionados com atributos físicos e químicos do solo.
- Amostragens na linha de plântio e entrelinha apresentam resultados distintos para atributos físicos preditores da qualidade estrutural do solo e podem interferir nos resultados caso não sejam pré-estabelecidos antes das coletas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar o uso da avaliação visual da estrutura do solo em áreas de cultivo de cana-de-açúcar com diferentes manejos agrícolas na mesorregião da zona da mata paraibana.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Comparar três manejos agrícolas de cultivo (área com aplicação de vinhaça; área irrigada e área cultivada sob condição de sequeiro) com área de preservação utilizando o método da avaliação visual da estrutura do solo.
- Determinar os atributos físicos do solo, como frações granulométricas, argila dispersa em água, índices de floculação e dispersão, densidade do solo, densidade de partículas, porosidade total, estabilidade de agregados, condutividade hidráulica e resistência do solo a penetração e correlacionar com os escores obtidos na VESS.
- Determinar as propriedades químicas do solo - pH, cátions trocáveis (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ e Al^{3+}), acidez potencial (H^+ +Al), capacidade de troca catiônica (CTC), soma de bases (SB).
- Identificar a influência da aplicação de vinhaça nos atributos físicos e químicos do solo.
- Identificar os impactos causados pelo cultivo irrigado e sequeiro na qualidade estrutural do solo.
- Utilização do método como uma ferramenta prática do dia a dia, capaz de auxiliar os agentes dos campos de produção agrícola.
- Apresentar a VESS como um método que possa expressar as condições estruturais de áreas com cultivo de cana-de-açúcar para as condições de manejo e solos avaliados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Qualidade do solo

A utilização de termos que trazem uma visão ampla de determinado assunto, na maioria das vezes gera debates e divergência entre os cientistas, isso ocorre muito pela necessidade de estabelecer parâmetros que definam como este deve ser empregado. O termo qualidade do solo, remete a compreensão de todos os fatores que englobam a gestão responsável dos recursos naturais para o desenvolvimento da agricultura, e estão ligados a manutenção da qualidade da água e do ar (KARLEN, et al., 1997; KARLEN; DITZLER; ANDREWS, 2003). Avalia-lo de forma quantitativa tornou-se um dos principais objetos de pesquisa da ciência do solo nas últimas décadas, isto porque o sistema solo está atrelado a diversas funções que atuam como mecanismos integrados, ligados a parte química, física e biológica (ABD-ELWAHED, 2019).

Porém, o campo que a qualidade do solo abrange é bem maior que simplesmente questões que envolvam a produção de alimentos. Nortcliff (2002) relatou que a qualidade do solo é mais complexa que a qualidade da água e do ar, visto que além do solo possuir as fases sólida, líquida e gasosa, ele tem utilidade para inúmeros outros fins, que variam de acordo com o serviço ecossistêmico que é ofertado. Isso desde a exploração dos seus recursos para fins econômicos, como agricultura, pecuária e construção civil, ou até mesmo para prestação de serviços naturais que visam exclusivamente a preservação ambiental e conservação da biodiversidade (BÜNEMANN et al., 2018; SIMS; CUNNINGHAM; SUMNER, 1997).

Desta forma, torna-se importante identificar atributos do solo que sejam sensíveis ao ponto de serem indicadores de sua qualidade, isso porque normalmente os índices que estão prontamente disponíveis aos produtores a curto prazo, como granulometria, classe de solos além de macro e micronutrientes do solo, já não são mais suficientes para evitar prejuízos a longo prazo, sejam estes de cunho econômico ou ambiental.

Assim, é cada vez mais necessário a inclusão de indicadores físicos (condutividade hidráulica, resistência do solo a penetração de raízes, macro, meso e micro porosidades), indicadores químicos (capacidade de troca catiônica, macro e micronutrientes, condutividade elétrica) e indicadores biológicos (respiração basal do solo, quociente metabólico) que tragam consigo uma maior precisão e que exponham um diagnóstico exato das condições do solo analisado.

A falta de compreensão sobre os impactos causados ao meio ambiente, bem como a percepção da importância desses recursos para a garantia da produção de alimentos, fibras,

madeira, manutenção e ciclagem de nutrientes, distribuição de água, regulação do clima (MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT, 2005) e a expansão das áreas de cultivo em áreas naturais, além do uso de práticas convencionais de manejo, vem causando a diminuição da qualidade do solo (JUNIOR et al., 2013) e conseqüentemente a redução e até perdas dos serviços ecossistêmicos do solo.

Bünemann et al. (2018) e Qi et al. (2009), relataram que, pela complexidade que envolvem os termos empregados na qualidade do solo, métodos que avaliem a sua condição ainda necessitam de uma grande evolução na ciência do solo. O que está diretamente ligado com a necessidade de se avaliar dados consistentes e precisos por meio de metodologias capazes de expressarem este dano no solo ao longo dos anos.

Diante disso, faz-se necessário o monitoramento da qualidade do solo através de seus atributos químicos, físicos e biológicos, sendo essas ferramentas cruciais na avaliação da qualidade desses ecossistemas agrícolas, assim como mensurar a capacidade de fornecer serviços ambientais (RINOT et al., 2019). Por fim, as condições expressas pelos ambientes em desequilíbrio ambiental indicam a necessidade de uma nova e eficiente visão.

A sociedade já começa a se movimentar interessada em manejos agrícolas que preservem as condições ambientais. Os profissionais que são formados semestralmente nas universidades e instituições de ensino técnico e superior, são a vanguarda dessa mudança, é preciso fazer algo eficiente não só do ponto de vista econômico, mas principalmente que conserve os recursos naturais que são passados para as futuras gerações, só a partir deste ponto será possível garantir segurança alimentar e ambiental a longo prazo, caso contrário os recursos naturais que são comprovadamente finitos continuarão se exaurindo (VEZZANI; MIELNICZUK, 2011).

2.2 Estrutura do solo

A estrutura do solo é definida como a organização espacial das partículas e poros do solo resultante de processos pedogenéticos, além de ser responsável por regular processos no solo como, retenção e infiltração de água, fluxo de gases, teor de matéria orgânica, dinâmica de nutrientes, penetração de raízes e susceptibilidade à erosão (RABOT et al., 2018). Também compõe o habitat para a sobrevivência de milhares de espécies de microrganismos (BOTTINELLI et al., 2015).

Torna-se complexo entender o fluxo dinâmico da estrutura do solo, uma vez que os processos ocorrem em escalas distintas de tempo, podendo uma mudança na estrutura do solo

acontecer na ordem de segundos, com o uso de um escarificador do solo, ou até mesmo em séculos, decorrentes dos processos de formação dos solos (STEWART et al., 1990).

Pesquisadores ao longo das últimas décadas tem-se dedicado a entender e explicar a gama de funções e serviços ecossistêmicos que a estrutura do solo fornece aos organismos terrestres (BRONICK; LAL, 2005; NAWAZ; BOURRIÉ; TROLARD, 2013; OERTEL et al., 2016). Com isso, surgiu a necessidade de estabelecer parâmetros para uma estrutura de boa qualidade (BESSON et al., 2013; KELLER et al., 2017).

Para boa parte desses serviços fornecidos, uma estrutura aceitável, é aquela capaz de regular todas as atividades biológicas, que englobem desde organismos microscópicos (CURTIS; SLOAN; SCANNELL, 2002) até os macroscópicos e com isso, fazer com que ao longo dos anos, todo esse conjunto de atividades possam gerar desenvolvimento e manutenção de uma estrutura de excelência para um solo de boa qualidade (COLOMBI et al., 2018; HU et al., 2021).

As condições estruturais de um solo, podem ser percebidas em diferentes escalas de intensidade. Na produção agrícola, os efeitos de um solo com baixas condições estruturais são evidenciadas com a redução da produtividade das culturas, trazendo consequências como o aumento do custo de produção, resultando na diminuição da margem de lucro, ocasionando danos diretos aos produtores e suas famílias e indiretos ao mercado consumidor.

Ampliando os fatos anteriormente mencionados para uma condição regional, é possível observar que os danos na estrutura do solo, resultam na diminuição da qualidade da água da superfície e subterrânea, além da deterioração da paisagem, com deslizamentos de terra, mudanças nos cursos de água e danos diversos a estruturas civis. Em um espectro global, sua influência é ainda mais preocupante, sendo responsável por gerar desequilíbrio de água e energia, além dos mais diversos ciclos biogeoquímicos (BRONICK; LAL, 2005).

2.2.1 Avaliação visual da estrutura do solo

Peerlkamp (1959) foi pioneiro no desenvolvimento de um método capaz de avaliar visualmente a estrutura do solo e que até hoje serve como base para a criação e aprimoramento dos métodos utilizados atualmente. Onde por meio de uma escala baseada em notas, é possível indicar as condições expressas nesse solo, sejam elas naturais ou decorrentes do uso e manejo que interfiram diretamente na sua qualidade estrutural.

Baseando-se na coleta de uma amostra indeformada, para análise visual das suas condições estruturais, analisando aspectos físicos como, tamanho, porosidade e a força dos agregados, além da presença de raízes e a cor do solo.

Tendo como referência o princípio mencionado anteriormente, alguns pesquisadores nas últimas décadas se especializaram, desenvolveram e aperfeiçoaram alguns métodos de avaliar o solo de forma visual (BALL; BATEY; MUNKHOLM, 2007; BALL; DOUGLAS, 2003; GUIMARÃES; BALL; TORMENA, 2011; MUELLER et al., 2009).

Esses métodos apresentam algumas vantagens, e a principal delas é que as avaliações são realizadas diretamente no campo, com a utilização de poucos equipamentos e o resultado imediato possibilita que a avaliação seja repetida, caso necessário. Com isso, o principal benefício da utilização de métodos capazes de avaliar a estrutura do solo in loco é a simplicidade, eficácia e baixo custo, por possibilitar a interpretação pelos responsáveis técnicos e os próprios agricultores (SHEPHERD et al., 2000; GUIMARÃES, et al., 2013).

Nos últimos anos a avaliação visual de perfis do solo tem sido cada vez mais estudada por cientistas do solo, principalmente nas áreas de pedologia e classificação de solos. Todavia métodos como este requerem um vasto conhecimento de pedologia e tempo suficiente para exploração desses perfis por completo. Com isso, a fim de facilitar a interpretação da avaliação da estrutura do solo, métodos como o *Visual Evaluation of Soil Structure* (VESS) ou Avaliação Visual da Estrutura do Solo são cada vez mais usados (BALL; BATEY; MUNKHOLM, 2007; GUIMARÃES; BALL; TORMENA, 2011).

Apesar de já comprovada a eficácia do método em inúmeras e recentes pesquisas (POLANÍA-HINCAPIÉ et al., 2021; BALL et al., 2017; CAVALCANTI et al., 2020; CHERUBIN et al., 2017; GUIMARÃES et al., 2017; LEOPIZZI; GONDRET; BOIVIN, 2018; MUTUKU et al., 2021), as análises dos atributos físicos convencionais (densidade do solo, condutividade hidráulica, porosidades, resistência do solo a penetração de raízes, entre outras) não podem ser descartadas.

Por isso, é importante relacionar os métodos visuais com outros indicadores da qualidade física do solo que são mais consolidados, tendo em vista que mesmo com resultados satisfatórios, os métodos de VESS ainda podem ser subjetivos, principalmente na validação desses resultados em solos que apresentam texturas distintas (FRANCO et al., 2019)

É possível afirmar que, a estrutura do solo dentro do sistema é responsável diretamente por interações físicas, químicas e biológicas que ocorrem constantemente e são influenciados diretamente pelas formas de uso (RABOT et al., 2018). Com isso, o uso da VESS como um sistema de pontuações que quantificam a qualidade estrutural do solo e que variam em uma

escala de Sq (qualidade estrutural) de 1 (boa qualidade estrutural) a Sq 5 (baixa qualidade estrutural), devem refletir as condições encontradas em campo no momento da análise, seja por mudança, adoção ou manutenção de um sistema de cultivo, só assim a utilização dessa ferramenta poderá auxiliar no uso sustentável do solo (GUIMARÃES et al., 2013).

2.3 Cultivo de Cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) é notadamente uma das principais culturas agrícolas de expressão econômica mundial (ALI et al., 2019; SURENDRAN et al., 2016), isso se dá pela sua expressiva contribuição na produção de açúcar global, estimada em 70%. Os subprodutos alavancam ainda mais o seu potencial, por meio do processamento, é possível obter caldo de cana, açúcar mascavo, bagaço, melaço e ainda, a utilização de sua palhada como alternativa de proteção da camada superficial do solo. Isto reflete na manutenção da umidade do solo, redução do impacto da gota de chuva e fornecimento de nutrientes, gerando equilíbrio no sistema por interagir com as propriedades químicas, físicas e biológicas do solo (ALI et al., 2021).

A cana-de-açúcar é uma cultura perene com seis espécies taxonômicas (D'HONT et al., 1998) e tantas outras variedades, originalmente do sul e sudeste da Ásia, popularizou-se ao redor do mundo com as caravanas europeias de colonização. De acordo com a FAO (2019) é possível afirmar que seu cultivo contempla mais de 100 países. De 1961 até os dias atuais sua produção foi de 448 milhões de Mg colhidas em pouco mais de 8,9 milhões de hectares para cerca de 2 bilhões de toneladas em aproximadamente 27 milhões de hectares.

No Brasil, seu valor torna-se ainda maior por ser a 2º commodity agrícola de maior importância, abrangendo uma área de 10.039.100 ha, que produziu entre as safras de 2019-2020 cerca de 642.717.800 Mg, impulsionando a economia do país (CONAB, 2020). Esses dados deixam o país na primeira colocação, como detentor de 40% da produção mundial, seguido da Índia com aproximadamente 20%.

Antes mesmo da queda da economia global, com os danos causados pela pandemia de COVID-19 (2020 e 2021), a produção de cana-de-açúcar ganhou destaque em diversos campos na última década, visto que, com a demanda crescente pela produção de alimentos, as incertezas com a bolsa de valores e os preços inconstantes dos barris de petróleo global (BLACK et al., 2012) e ainda a agenda mundial de redução da emissão de gases de efeito estufa (LISBOA et al., 2011), fizeram com que a produção e distribuição de etanol se tornasse promissora e viável para todos os agentes envolvidos.

O constante aumento da demanda mundial por alimentos, trouxe consigo diversos outros pontos que são objetos de pesquisa das mais renomadas instituições de ensino, no caso da cana-de-açúcar, o uso sucessivo de máquinas agrícolas pesadas, além das queimadas constantes, evidenciam esses impactos causados nessas áreas de produção mais constantes a cada safra (CHERUBIN et al., 2016), o que passa a preocupar pesquisadores e órgãos ambientais sobre quais medidas devem ser adotadas para minimizar os danos existentes nesses solos ao longo das décadas.

É clara a tendência de aumento dessas áreas, considerando a pressão pelos órgãos governamentais para sustentar a demanda de um mercado cada vez mais populoso e competitivo (GOLDEMBERG et al., 2014). Todavia, espera-se que esse aumento pondere o uso de práticas de conservação do solo, gerando assim uma sustentabilidade ambiental (CARVALHO et al., 2017).

As preocupações que envolvem a qualidade do solo em cultivos de cana-de-açúcar aumentaram substancialmente na última década, sendo os temas relacionados aos impactos causados pelo tráfego de máquinas agrícolas e o uso de sistemas convencionais, correspondentes a 74% das publicações. Vale destacar que, de acordo com o levantamento de 160 publicações, 99 destas tiveram como origem o Brasil (MARTÍNI et al., 2020).

Devido a importância histórica e econômica da cultura da cana-de-açúcar para a região Nordeste do Brasil e por existir apenas uma pesquisa voltada para a qualidade estrutural do solo com a utilização de uma metodologia de análise visual na região, outras pesquisas devem ser realizadas nessas áreas com a utilização de métodos como a avaliação visual da estrutura do solo, fomentando a obtenção de resultados simples e objetivos com o propósito de auxiliar o produtor na melhor tomada de decisão, a fim de mitigar futuros impactos na estrutura do solo.

2.3.1 Aplicação de vinhaça em áreas com plantio de cana-de-açúcar

A produção de etanol a partir da cana-de-açúcar é uma das principais atividades do agronegócio de diversos países latino-americanos (RULLI; VILLEGAS; COLIN, 2020). É comum em toda atividade a geração de resíduos, na atividade sucroalcooleira estima-se que uma destilaria pode gerar em torno de 10 a 15 litros de vinhaça para cada litro de etanol produzido (DEL GOBBO; VILLEGAS; COLIN, 2019).

A vinhaça da cana-de-açúcar é um resíduo composto por uma mistura de água, sais e teor elevado de compostos orgânicos, com pH ácido e de coloração marrom. Seu uso como fertilizante é comum, uma vez que apresenta altos níveis de potássio, chegando a acumular cerca de 70% do potássio fornecido pela cana (DE MELO et al., 2018). Também pode fornecer

altos teores de matéria orgânica no solo, além de proporcionar uma maior disponibilidade de nutrientes para as plantas, devido ao aumento na concentração de cátions (K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+}) no solo, no entanto sua utilização deve ser controlada, seguindo as recomendações técnicas de adubação da cultura, de modo que não sejam aplicadas quantidades excessivas que venham a lixiviar e contaminar o lençol freático (PRADO; CAIONE; CAMPOS, 2013).

Em pesquisa realizada sobre o efeito da aplicação de vinhaça nas propriedades físico-químicas dos solos, onde os tratamentos foram: aplicação de água, aplicação de fertilizante convencional e aplicação de vinhaça, houve diminuição da densidade e aumento da porosidade dos solos, com a aplicação de vinhaça em relação aos demais tratamentos. Também foi possível constatar aumento na estabilidade dos agregados e capacidade de retenção de água, isso devido a disponibilidade de matéria orgânica pela vinhaça, o que proporciona aumento da agregação do solo (JIANG et al., 2012).

2.3.2 Cultivo irrigado e sequeiro

Á água é um recurso fundamental para a manutenção e sobrevivência das espécies na terra, no entanto, tem se tornado um recurso escasso não só em áreas convencionalmente secas, mas também em regiões que costumavam ter índices pluviométricos elevados (DACCACHE et al., 2012).

A agricultura é a atividade econômica que mais consome água de qualidade no planeta e estima-se que para gerar uma dieta nutricionalmente saudável para uma pessoa é necessário de aproximadamente 1300 m^3 por ano (FALKENMARK; ROCKSTROM, 2004). De acordo com a análise de cenário realizada por Fraiture et al. (2007), anualmente são destinadas 7100 Km^3 para a produção de alimentos, estima-se também que até 2050, caso não haja um equilíbrio entre os sistemas de manejos adotados serão necessários de 8.500 a 11.000 km^3 , isso para produzir as mesmas quantidades dos dias atuais.

Está cada vez mais perceptível que o mundo está enfrentando uma das maiores crises hídricas da sua história, o que evidencia a necessidade de readequação das políticas de aumento de novas áreas irrigadas, em contraste, deve-se analisar a inserção cada vez maior de áreas de agricultura de sequeiro, visto que, assim será possível obter um equilíbrio entre a produção de alimentos e a água gasta para tal e, assim, tentar reduzir os riscos e incertezas sobre a quantidade de água disponível para a sobrevivência das futuras gerações (ROCKSTRÖM et al., 2010).

Com o avanço da tecnologia na agricultura, além das mais diversas condições climáticas espalhadas pelo globo, surgiu a necessidade do uso de técnicas artificiais de suprimento da

demanda de água por parte das culturas, para que essas sejam capazes de realizar suas atividades fisiológicas. Dois dos principais sistemas de manejos que se baseiam no uso de água são o sequeiro e irrigado, onde o cultivo de sequeiro depende integralmente dos períodos chuvosos para suprir as demandas das culturas (ARAGÃO, 1980) e o sistema irrigado depende de um sistema artificial que é acionado para suprir os períodos de déficit hídricos (DENG et al., 2006).

O principal fator complicador da agricultura de sequeiro está atrelado a sua dependência na distribuição e quantidade do volume de chuvas ao longo do ano, o que torna esse tipo de agricultura uma atividade de risco comparada a irrigada.

Sua eficiência também está atrelada a adequação e eficiência no uso de outras práticas, sendo o manejo adequado do solo uma das principais, sua correta aplicação implicará em uma alta taxa de infiltração e conseqüentemente melhora no armazenamento dessa água (ANA, 2020). Já na agricultura irrigada, existe a necessidade da implantação de um pacote tecnológico na propriedade agrícola, ou seja, necessidade de melhorias nos insumos, serviços, máquinas e implementos, o que gera aumentos significativos nos custos de produção.

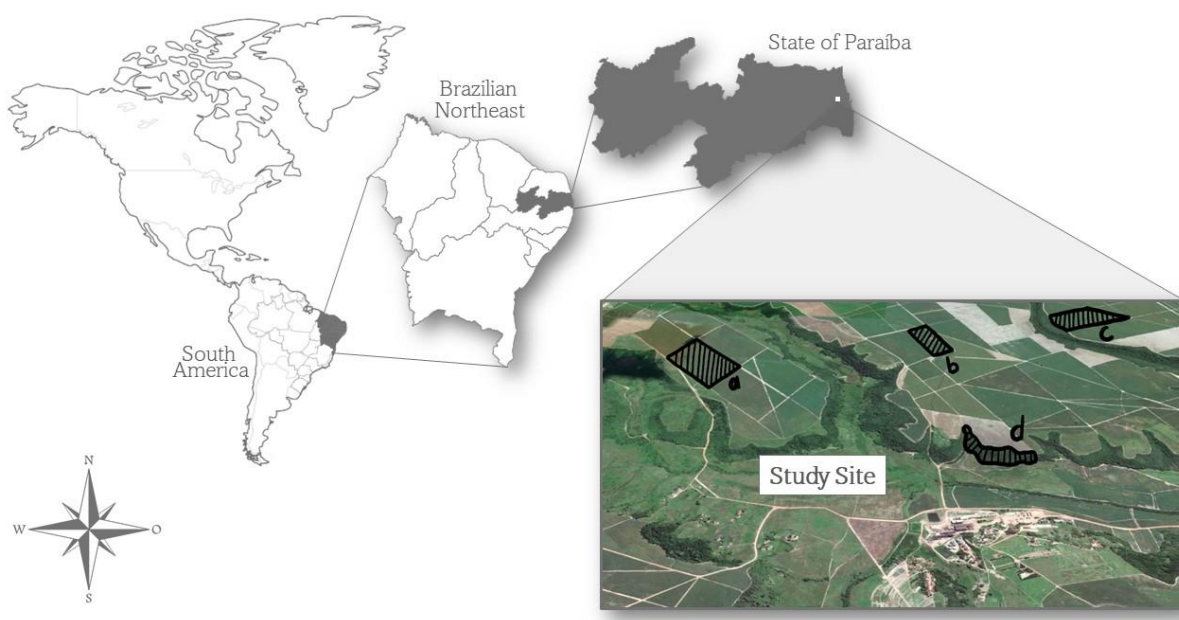
Sabe-se que em todas as atividades agrícolas de alto rendimento existem vantagens e desvantagens a serem exploradas, isso é evidenciado também nas principais características das agriculturas de sequeiro e irrigadas, porém com tudo que já foi mencionado espera-se que haja por diante, sempre a menção e avaliação dos riscos que tais atividades possam trazer, a curto, médio e longo prazo, visando sempre estabelecer um equilíbrio entre as necessidades humanas e manutenção dos recursos naturais.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização da área de estudo

A pesquisa foi realizada na usina Miriri Bioenergia e Alimentos S/A, produtora de cana-de-açúcar, localizada na mesorregião da zona da mata paraibana, pertencente ao município de Santa Rita, no estado da Paraíba (Figura 1). O trabalho foi conduzido nas áreas comerciais de cana, em três áreas da fazenda, Santa Emília II, Miriri Capim e Miriri Sapé.

Figura 1. Localização geográfica da área de estudo na Usina Miriri - Santa Rita-PB



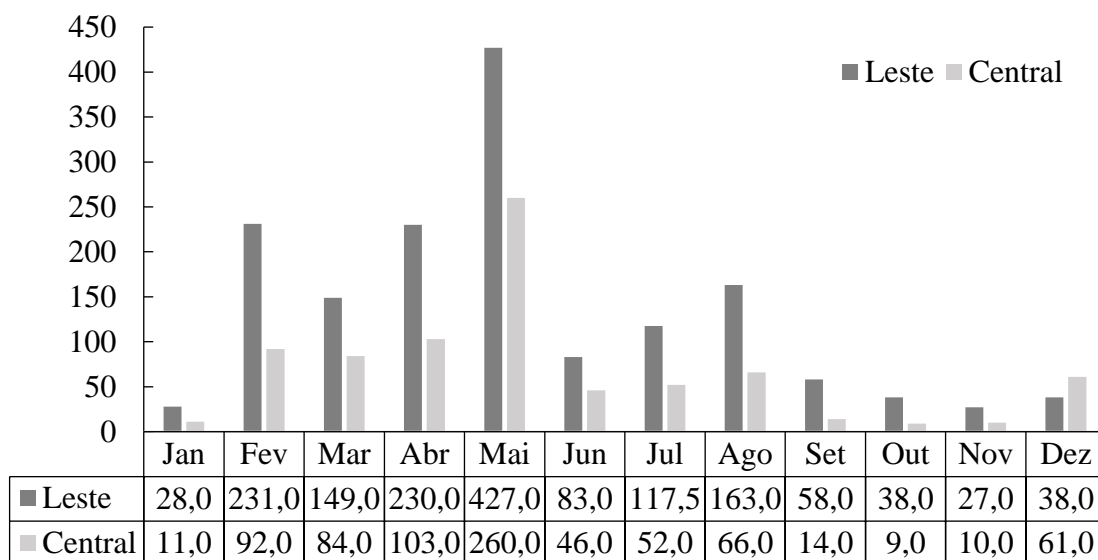
(a) Cultivo de cana-de-açúcar em sequeiro com aplicação de vinhaça, (b) Cultivo de cana-de-açúcar irrigado com aplicação de vinhaça, (c) Cultivo de cana-de-açúcar irrigado sem aplicação de vinhaça, (d) Vegetação nativa conservada.

As principais unidades litoestratigráficas são depósitos colúvio-eluviais formados por sedimentos arenosos, areno-argilosos e conglomeráticos e arenitos e conglomerados, com intercalações de siltito e argilito do Grupo Barreiras, ambos do período Cenozóico (SANTOS et al., 2002). A fitofisionomia de ocorrência natural na região é Floresta Tropical Úmida (Mata Atlântica) e os principais solos são da classe dos Argissolos, Latossolos e Espodossolos (BRASIL, 1972; MEDEIROS, 2018).

O clima na região é do tipo As (tropical úmido com período seco no verão) pela classificação climática de Köppen-Geiger (ALVARES et al., 2013).

Por encontrar-se em uma região próxima ao litoral do estado a área caracteriza-se por consideráveis com médias de 1600 mm anuais e apresentam temperaturas médias de 26°C (Figura 2) (SOUZA; SILVA; AZEVEDO, 2007).

Figura 2. Média da distribuição mensal da precipitação pluviométrica das áreas estudadas no ano da pesquisa (2021) região leste: pé de peru e santa Emília II; região central Miriri capim e Miriri sapé



Fonte: Usina Miriri.

3.2 Critérios de seleção para escolha das áreas de coleta

A usina Miriri está localizada em uma área que faz divisa com alguns municípios (Mamanguape – PB, Mari-PB, Sapé-PB e Rio Tinto- PB), apesar de pertencer a uma mesorregião bem definida, existem aparições de manchas variadas de solos e ainda está próximo a uma área de tabuleiros costeiros (DOS SANTOS, et al., 2018).

Para seleção dos manejos avaliados nesta pesquisa procurou-se estabelecer alguns critérios, como: classe de solo Argissolo Amarelo, condições de uso similares (corretivos agrícolas, adubação, tráfego controlado de máquinas e colheita mecanizada); estágios fenológicos similares (4ª folha). A área de referência também pertence a mesma classe de solo das demais. Avaliou-se ainda, o histórico de uso das áreas para uma melhor percepção das reais condições em que os manejos foram adotados (Tabela 1).

Tabela 1. Histórico de uso da terra e práticas de manejo para cada local estudado.

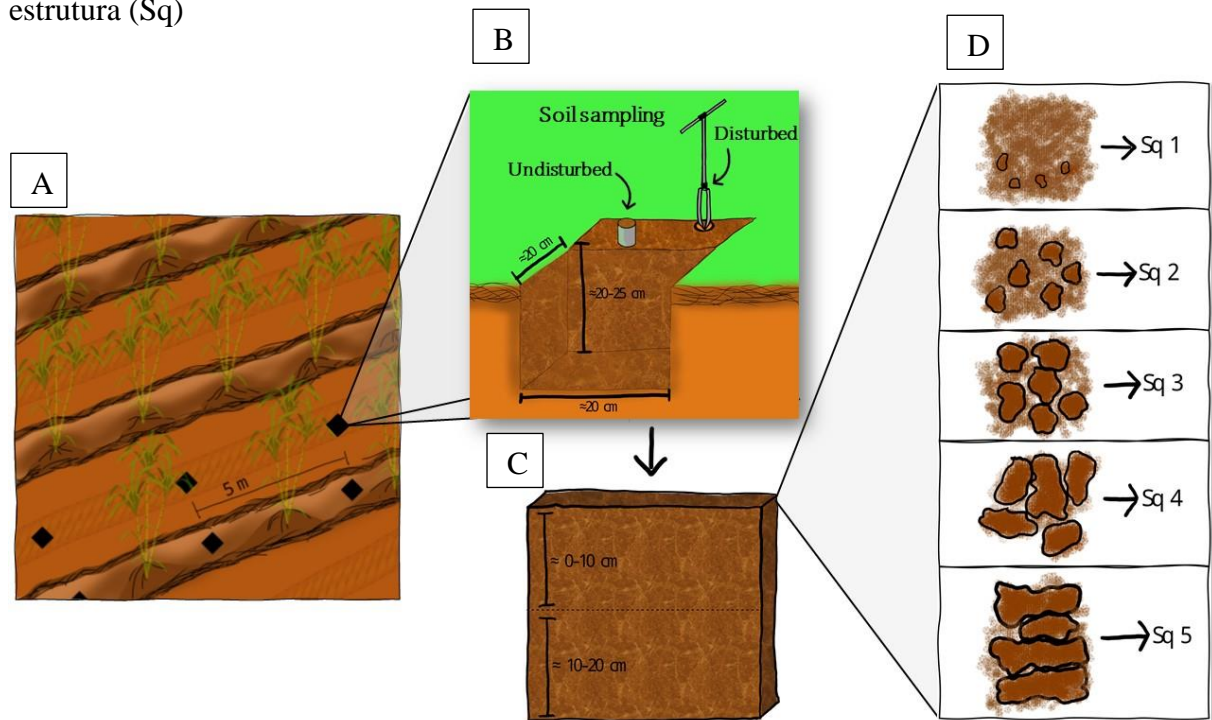
Siglas	Uso da terra	Descrição
VN	Vegetação nativa conservada	Fragmento de Floresta Tropical Úmida (Mata Atlântica) conservada, na região nordeste do Brasil.
SQV	Cultivo de cana-de-açúcar em sequeiro com aplicação de vinhaça	O cultivo de cana-de-açúcar nesse talhão é em sequeiro, onde as necessidades hídricas da cultura são supridas de acordo com o regime pluviométrico de cada safra. A vinhaça é aplicada no início de cada ciclo produtivo, 15 dias após a colheita é aplicada uma lâmina de 35 mm via fertirrigação por carretel hidro roll e 15 dias após a primeira aplicação o mesmo procedimento é repetido para ajudar na rebrota da cana. Na época da amostragem a cana-de-açúcar estava no estágio fenológico de 4 ^a folha. Os fertilizantes são aplicados anualmente de acordo com a recomendação de adubação para a cultura com base na análise química do solo, assim como a correção da acidez do solo com calcário agrícola quando necessário. A cana-de-açúcar é colhida mecanicamente com colheitadeira. A área estudada possui sistema de tráfego controlado utilizado. A produtividade média é de 39,52 toneladas de colmo por hectare (TCH).
IR	Cultivo de cana-de-açúcar irrigado sem aplicação de vinhaça	O cultivo de cana-de-açúcar nesse talhão é irrigado com 50% da evapotranspiração da cultura (ETC), onde as necessidades hídricas da cultura são supridas via pivô central a cada 8 dias. Na época da amostragem a cana-de-açúcar estava no estágio fenológico de 4 ^a folha. Os fertilizantes são aplicados anualmente de acordo com a recomendação de adubação para a cultura com base na análise química do solo, assim como a correção da acidez do solo com calcário agrícola quando necessário. A cana-de-açúcar é colhida mecanicamente com colheitadeira. A área estudada possui sistema de tráfego controlado utilizado. A produtividade média é de 78,71 toneladas de colmo por hectare (TCH).
IRV	Cultivo de cana-de-açúcar irrigado com aplicação de vinhaça	O cultivo de cana-de-açúcar nesse talhão é irrigado com 50% da evapotranspiração da cultura (ETC), onde as necessidades hídricas da cultura são supridas via pivô central a cada 8 dias. A vinhaça é aplicada no início de cada ciclo produtivo, 15 dias após a colheita é aplicada uma lâmina de 35 mm via fertirrigação por carretel hidro roll e 15 dias após a primeira aplicação o mesmo procedimento é repetido para ajudar na rebrota da cana. Na época da amostragem a cana-de-açúcar estava no estágio fenológico de 4 ^a folha. Os fertilizantes são aplicados anualmente de acordo com a recomendação de adubação para a cultura com base na análise química do solo, assim como a correção da acidez do solo com calcário agrícola quando necessário. A cana-de-açúcar é colhida mecanicamente com colheitadeira. A área estudada possui sistema de tráfego controlado utilizado. A produtividade média é de 68,65 toneladas de colmo por hectare (TCH).

3.3 Amostragem do solo

A amostragem considerou 3 manejos (SQV, IR e IRV), 2 locais de coleta (linha e entrelinha) e 2 camadas (0-10 e 10-20 cm) além da área de referência (vegetação nativa preservada), com 5 repetições cada, totalizando 35 pontos de coleta.

Em cada um desses pontos foram abertas mini trincheiras (Figura 3) com uma distância de aproximadamente 5 m entre elas, todas na mesma linha de plantio da cana-de-açúcar e na entrelinha ao lado (abertas sempre pelo mesmo operador).

Figura 3. A) Croqui de amostragem; B) Abertura das minis trincheiras e coleta das amostras deformadas e não deformadas; C) Retirada do bloco e separação das camadas contrastantes para a VESS; (D) Esquema ilustrativo das notas atribuídas em campo de acordo com a qualidade estrutura (Sq)



3.4 Descrição detalhada da VESS

A abordagem utilizada para a avaliação visual da estrutura do solo seguiu a metodologia proposta por (BALL; BATEY; MUNKHOLM, 2007) e modificada por (GUIMARÃES; BALL; TORMENA, 2011). Em cada ponto de amostragem, foi aberta uma mini trincheira com as dimensões de (20 x 25 x 25 cm), posteriormente, com auxílio de uma pá reta, foi retirado um bloco da face superior do local e transferido para uma bandeja de plástico (Figura 4).

Figura 4. Coleta do bloco (A); bloco na bandeja (B); medição das camadas com auxílio da régua da cartilha VESS (C); analisando o bloco e conferindo a nota de acordo com a cartilha VESS (D)



A avaliação levou em consideração a forma dos agregados, a identificação de camadas de estrutura contrastante, a medição da espessura da camada e para finalizar foi atribuída uma pontuação comparando a estrutura da amostra com a cartilha VESS, que contém descrições e fotos de cada qualidade da estrutura do solo proposta, conforme descrito por (GUIMARÃES; BALL; TORMENA, 2011) (Figura 5).





















Uma vez que as camadas distintas foram identificadas e a pontuação foi atribuída para cada, de acordo com a descrição da cartilha, uma pontuação final ponderada para cada amostra de solo foi calculada, estabelecida pela seguinte equação 1:

$$VESS_{Sq} = \sum_{i=1}^n \frac{Sq_i T_i}{TT}$$

Equação 1

Onde, $VESS_{sq}$ é a pontuação geral VESS, S_{qi} e T_i são, respectivamente a pontuação e a espessura de cada camada de solo identificada, e TT é a espessura total da amostra de solo (BALL et al., 2017).

Figura 5. Cartilha de Avaliação Visual da Estrutura do Solo.

Qualidade Estrutural	Tamanho e aparência dos agregados	Porosidade visível e raízes	Aparência depois do manuseio: vários solos	Aparência depois do manuseio: mesmo solo diferentes manejos	Característica distintiva	Aparência e descrição de agregados naturais ou fragmento reduzido de ~ 1,5 cm de diâmetro	0 1 2 3 4 5 10 15 20 25 cm
Qe1 Friável Agregados quebram facilmente com os dedos	Maioria < 6 mm após a quebra	Alta porosidade Raízes por todo solo			 Agregados pequenos	 A ação de quebrar o bloco é suficiente para revelá-los. Agregados grandes são compostos por agregados menores, presos pelas raízes.	
Qe2 Intacto Agregados quebram facilmente com uma mão	Uma mistura de agregados porosos e redondos entre 2 mm – 7 cm Sem presença de torrões	Maioria dos agregados são porosos Raízes por todo solo			 Agregados altamente porosos	 Agregados quando obtidos são redondos, muito frágeis, despedaçam muito facilmente e são altamente porosos.	
Qe3 Firme Maioria dos agregados quebram com uma mão	Uma mistura de agregados porosos entre 2mm -10 cm; menos de 30% são <1 cm. Alguns torrões angulares não porosos podem estar presentes	Macroporos e fissuras presentes Porosidade e raízes: ambas dentro dos agregados			 Agregados com baixa porosidade	 Fragmentos de agregados são razoavelmente fáceis de serem obtidos. Apresentam poucos poros e são arredondados. Raízes geralmente crescem através dos agregados.	
Qe4 Compacto Quebrar agregados com uma mão requer esforço considerável	Maioria > 10 cm e são sub-angulares não porosos; possibilidade de horizontalização; menos que 30% são <7 cm	Poucos macroporos e fissuras Raízes agrupadas em macroporos e ao redor dos agregados			 Macroporos bem distintos	 Fragmentos de agregados são fáceis de serem obtidos quando o solo está úmido, em forma de cubo muito angulosos e pontudos e apresentam fissuras internamente.	
Qs5 Muito compacto Difícil quebra	Maioria são maiores que > 10 cm, muito poucos < 7 cm, angular e não poroso	Porosidade muito baixa. Macroporos podem estar presentes. Pode conter zonas anaeróbicas. Poucas raízes e restritas a fissuras			 Cor azul-acinzentada	 Fragmentos de agregados são fáceis de serem obtidos quando o solo está úmido, no entanto, considerável força é necessária. Geralmente não apresentam poros ou fissuras.	

Fonte: Ball et al., 2007 - Tradução: Guimarães e Tormena, 2011.

3.5 Análise dos atributos físicos do solo

As amostras de solo foram secas ao ar, destorroadas e passadas na peneira de 2 mm para a preparação da terra fina seca ao ar (TFSA). As análises seguiram com a determinação das frações granulométricas pelo método do densímetro proposto por Gee e Or (2002), modificado e descrito por Almeida (2008). Determinou-se ainda a argila dispersa em água (ADA), onde, a partir da relação entre os teores da argila total (AT) e ADA foi obtido o grau de flocculação $\{GF (\%) = [(\% AT - \% ADA) \% AT] \times 100\}$, sendo o grau de dispersão calculado por diferença $[GD (\%) = 100 - GF (\%)]$.

Também foi realizado o fracionamento da areia por peneiramento em areia grossa e fina (DONAGEMMA et al., 2017). A densidade de partículas foi obtida pelo método do balão volumétrico (VIANA, TEIXEIRA; DONAGEMMA, 2017) os resultados obtidos encontram-se na Tabela 3. E a densidade do solo foi obtida pelo método do cilindro volumétrico (ALMEIDA et al., 2017).

Tabela 2. Análise granulométrica e densidade de partículas dos manejos estudados

Manejo Agrícola	Camada cm	AG	AF	AT	Silte	Argila	GF	GD	DP	Classe Textural	
		g kg ⁻¹				%		g cm ⁻³			
VN	0-10	300	193	493	145	362	63	37	2,64	Argilo-arenoso	
	10-20	246	212	458	164	377	59	41	2,58	Argilo-arenoso	
SQV	L	0-10	463	370	833	29	138	69	31	2,71	Franco-arenoso
			EL	455	373	828	30	142	66	34	2,71
	L	10-20	462	365	827	23	151	70	30	2,70	Franco-arenoso
			EL	459	366	825	28	146	67	33	2,68
IR	L	0-10	533	376	909	23	68	88	12	2,70	Arenosa
			EL	548	345	893	39	68	91	9	2,68
	L	10-20	579	330	909	27	64	91	9	2,67	Arenosa
			EL	539	365	904	28	67	88	12	2,68
IRV	L	0-10	598	250	848	23	129	69	31	2,67	Areia-franca
			EL	548	285	833	42	125	76	24	2,65
	L	10-20	516	312	828	26	145	68	32	2,69	Areia-franca
			EL	548	293	841	26	134	74	26	2,67

VN - Vegetação nativa; SQV - Cultivo de cana-de-açúcar em sequeiro com aplicação de vinhaça; IR - Cultivo de cana-de-açúcar irrigado sem aplicação de vinhaça; IRV - Cultivo de cana-de-açúcar irrigado com aplicação de vinhaça; L - Linha; EL - Entrelinha; AG - Areia grossa; AF - areia fina; AT - areia total; GF - grau de flocculação; GD - grau de dispersão; DP - densidade de partículas.

A porosidade total foi determinada baseando-se no método direto, proposto por Almeida et al., 2017. A Determinação da distribuição dos poros foi baseada no método da mesa de tensão, que consistiu na preparação das amostras assim como para a densidade do solo e posteriormente foram saturadas e pesadas e em seguidas postas na mesa de tensão e aplicadas as tensões de 1 KPa, 3 KPa e 6 KPa. A classificação do diâmetro dos poros seguiu a recomendação de Prevedello e Armindo (2015), sendo macroporos (Ma) $\geq 300\mu\text{m}$; mesoporos (Me) entre $50\mu\text{m}$ e $300\mu\text{m}$; e microporos (Mi) $< 50\mu\text{m}$ (Figura 6).

Figura 6. Amostras em saturação (A); amostras na mesa de tensão (B); amostras submetidas a tensão de 3Kpa (C)



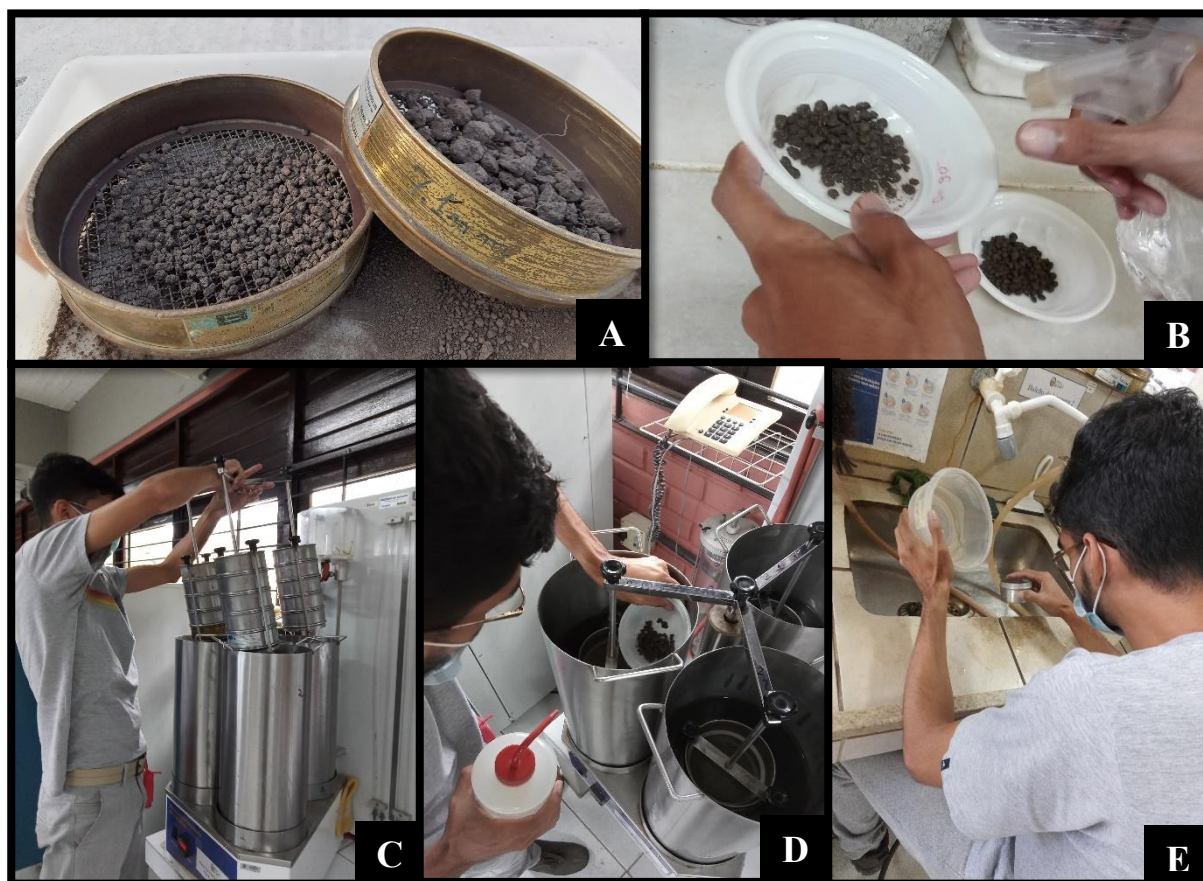
A condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) foi determinada pelo método do permeômetro de carga constante (TEIXEIRA et al., 2017) (Figura 7).

Figura 7. Determinação da condutividade hidráulica saturada (K_{sat})



Para determinação e separação da classe de agregados as amostras foram separadas, com auxílio das peneiras de 8 e 4,76 mm. O material preparado foi adicionado ao conjunto de peneiras com as aberturas da malha de 2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,25 mm, 0,053 mm, em aparelho de oscilação vertical do tipo Yooder por 15 minutos de acordo com a metodologia de (YODER 1936) modificado por (NIMMO; PERKINGS, 2002) (Figura 8).

Figura 8. Separação dos agregados



(A); aplicação de álcool 96° para quebra da tensão superficial dos agregados; (B); inserindo o conjunto de peneiras no Yoder (C); inserindo a amostra no Yoder para oscilação por 15 min. (D); passando o material retido nas peneiras para as latas e posterior secagem na estufa a 105 °C (E)

Foi calculado o DMPu (Diâmetro médio ponderado – via úmida) a partir dos resultados obtidos anteriormente no Yooder e com auxílio da seguinte equação 2:

$$DMPu = \Sigma(xiu.wiu) \quad \text{Equação 2}$$

Para o via seca foi pesada uma amostra de 25g para o mesmo conjunto de peneiras da análise anterior e submetida a um agitador mecânico vibratório, durante 1 minuto com 90 vibrações por minuto, o conteúdo resultante de cada peneira foi transportado para latas e pesado. Por meio dos resultados obtidos foi possível realizar os cálculos DMPs (Diâmetro médio ponderado – via seca), utilizando-se da seguinte equação 3: $\{DMPs = \Sigma(x_{is}.w_{is})\}$.

$$DMPs = \Sigma(xis.wis) \quad \text{Equação 3}$$

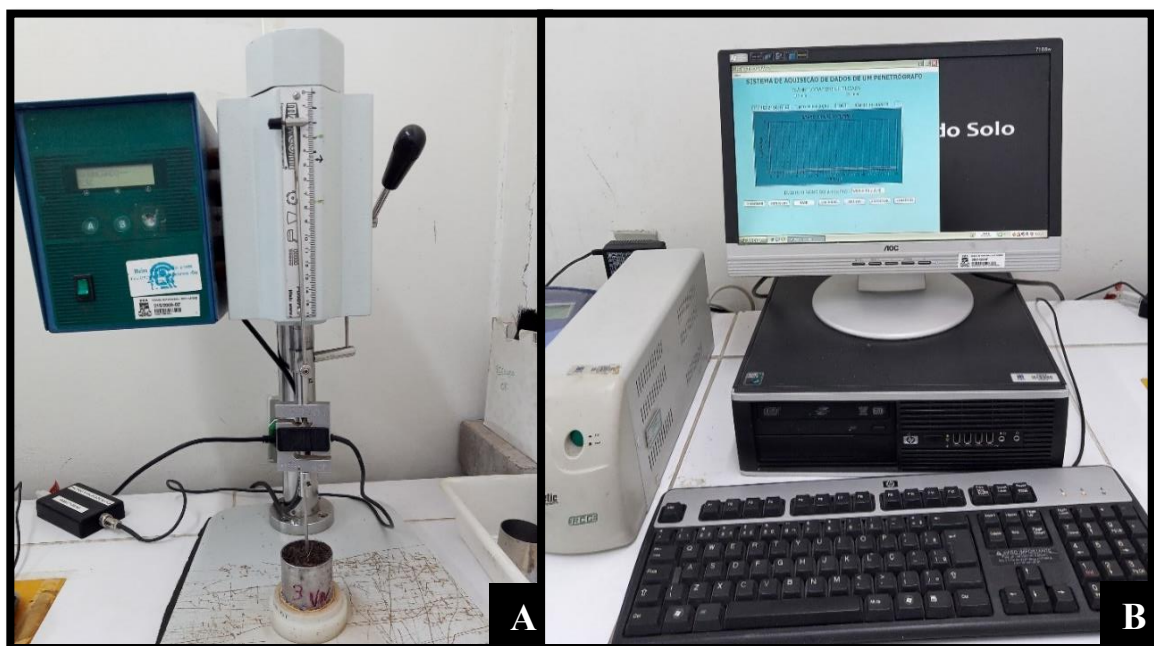
Com os resultados anteriormente obtidos foi possível gerar os índices de estabilidade de agregado, sendo estimada mediante a relação entre o DMPu (Diâmetro médio ponderado – via úmida) e o DMPs (Diâmetro médio ponderado – via seca), com a seguinte equação 4: (TEIXEIRA et al., 2017).

$$IEA = \left(\frac{DMPu}{DMPs} \right) * 100 \quad \text{Equação 4}$$

Os ensaios de resistência do solo à penetração de raízes (RP) foram conduzidos logo após as amostras atingirem equilíbrio no ponto de 6 KPa na mesa de tensão, em um penetrômetro eletrônico de bancada (MA – 933®), com célula de carga de 20 kg, onde foi aplicada uma carga constante, a uma taxa de 4 mm min⁻¹, por meio de uma agulha com base do cone de 4 mm. O motor de propulsão, acoplado à célula de carga, conectada à agulha, promoveu sua penetração na amostra do solo.

Um sistema de aquisição de dados registrou a força aplicada ao solo contido no anel volumétrico, necessária para penetração da agulha ao solo, responsável pela resistência à penetração. O modelo do penetrômetro usado nos ensaios possui *Software* que forneceu os resultados de RP em MPa (Figura 9).

Figura 9. Amostra submetida ao teste de resistência a penetração (RP) por penetrômetro eletrônico de bancada (MA – 933®)



(A); Captação dos dados do ensaio de RP por computador acoplado a um penetrógrafo (B)

3.6 Análise dos atributos químicos do solo

Para a avaliação dos atributos químicos, as amostras de solo foram submetidas a caracterização da solução do solo, através do preparo da pasta saturada, pelo método descrito por Richards (1954). No extrato de saturação, foram mensurados a condutividade elétrica (CEes), o pH (RICHARDS, 1954) e o potencial osmótico (Ψ_o) estimada pela equação 5 de Van't Hoff, após determinação da osmolaridade em osmômetro de pressão de vapor (PAULINO, et al., 2020).

$$\Psi_o(\text{MPa}) = -\text{moles do soluto} * R * T \quad \text{Equação 5}$$

Sendo: R a constante universal dos gases (0,008314 Mpa Kg K⁻¹ mol⁻¹) e T é a temperatura em Kelvin.

Para a caracterização química do solo foi realizada a medida do pH em água (1:2,5). Os cátions trocáveis Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺ foram extraídos por KCl 1 mol L⁻¹ e dosados por espectrofotometria de absorção atômica (Ca²⁺ e Mg²⁺) e titulometria (Al³⁺). Os cátions Na⁺ e K⁺ foram extraídos por solução de Mehlich-1, sendo quantificados por fotometria de chama (TEIXEIRA et al., 2017). Quanto ao H+Al, a extração foi por acetato de cálcio tamponado a pH 7,0 e quantificados por volumétrica com solução de NaOH em presença de fenolftaleína como indicador (CAMPOS et al., 2017). Com os resultados obtidos a partir dos valores obtidos no complexo sortivo foi possível calcular a soma de bases (S), CTC potencial (T) e saturação por bases (V%). O percentual de Sódio Trocável (PST) foi calculado em relação a CTC a pH7,0 e o teor de Na no solo.

Os resultados obtidos para cada um dos manejos podem ser visualizados na Tabela 3.

Tabela 3. Atributos químicos dos manejos estudados

Manejo Agrícola	Camada	pH	CE	Ψ_o	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	H^++Al^{3+}	Al^{3+}	S	T	V	PST	
	cm	(H ₂ O)	dS m ⁻¹	Mpa	cmol _c Kg ⁻¹						%				
VN	0-10	5,1	0,29	0,05	3,27	0,59	0,16	0,14	12,6	1,19	4,2	16,7	24,9	3,5	
	10-20	5,0	0,27	0,05	2,17	0,45	0,13	0,10	12,7	1,80	2,8	15,5	18,3	2,9	
SQV	0-10	L	7,2	0,57	0,08	2,67	0,55	0,16	0,06	0,9	0	3,4	4,4	78,8	12,6
		EL	7,4	0,58	0,06	3,03	0,70	0,15	0,06	1,0	0	3,9	4,9	79,9	14,1
	10-20	L	7,3	0,47	0,08	3,63	0,62	0,17	0,05	0,5	0	4,5	5,0	89,4	12,5
		EL	7,6	0,54	0,06	3,29	0,65	0,17	0,06	0,5	0	4,2	4,7	88,7	13,8
IR	0-10	L	7,4	0,30	0,06	0,69	0,14	0,15	0,07	0,2	0	1,0	1,2	84,0	11,6
		EL	7,5	0,29	0,07	0,47	0,16	0,23	0,05	0,5	0	0,9	1,4	64,5	11,4
	10-20	L	7,0	0,27	0,06	0,23	0,11	0,14	0,06	0,5	0	0,5	1,0	52,3	10,8
		EL	7,4	0,27	0,07	0,28	0,11	0,10	0,04	0,5	0	0,5	1,0	53,0	11,1
IRV	0-10	L	7,1	0,51	0,08	2,64	0,50	0,18	0,10	0,9	0	3,4	4,3	79,3	11,5
		EL	7,1	0,53	0,08	2,47	0,67	0,18	0,09	1,1	0	3,4	4,5	76,4	15,1
	10-20	L	7,1	0,41	0,08	2,64	0,50	0,18	0,10	0,9	0	3,4	4,3	79,3	11,5
		EL	6,9	0,33	0,08	2,33	0,54	0,16	0,06	2,1	0	3,1	5,2	59,8	10,5

VN - Vegetação nativa; SQV - Cultivo de cana-de-açúcar em sequeiro com aplicação de vinhaça; IR - Cultivo de cana-de-açúcar irrigado sem aplicação de vinhaça; IRV - Cultivo de cana-de-açúcar irrigado com aplicação de vinhaça; L - Linha; EL - Entrelinha; Ψ_o - Potencial osmótico da solução do solo; S - soma de bases; T - capacidade de troca de cátions; V - percentagem de saturação por bases; PST - percentagem de sódio trocável

3.7 Análise dos dados

A normalidade dos dados foi testada usando o teste de Shapiro-Wilk ($p > 0,05$). As comparações dentro e entre os manejos foram realizadas usando ANOVA unilateral. Quando a ANOVA apresentou significância ($p < 0,05$), os valores das médias foram comparados pelo teste de Scott- Knott ($p < 0,05$).

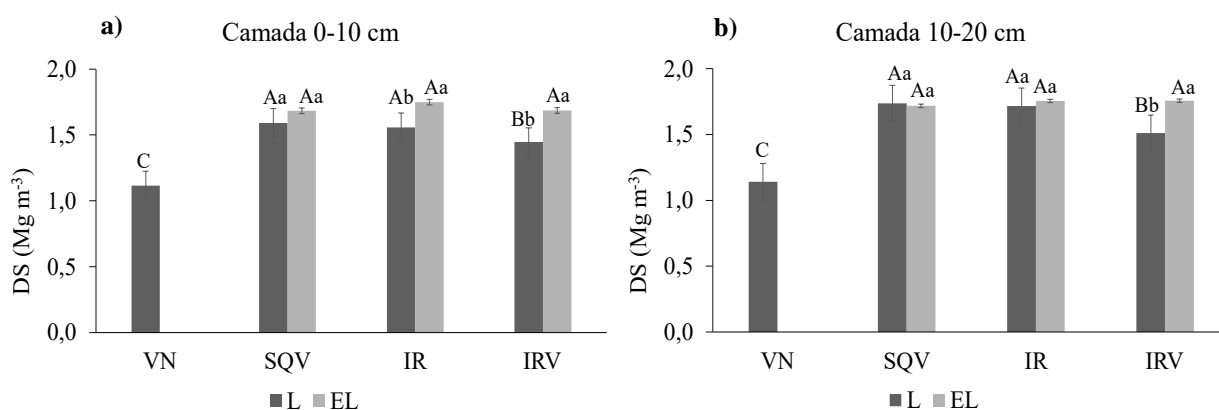
As comparações entre os manejos foram realizadas de forma independente, comparando todas as linhas e entrelinhas separadamente para cada camada analisada. A vegetação nativa só foi comparada com as linhas. Os dados foram analisados utilizando a versão 5.6 do Sisvar (FERREIRA, 2019). As correlações de Pearson foram realizadas com a versão online do software SAS® OnDemand for Academics.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Densidade do solo

Os cultivos irrigados apresentaram diferenças significativas quando se comparou linha e entrelinha, com destaque para uma maior densidade nas entrelinhas, com valores de $1,7 \text{ Mg m}^{-3}$ para as condições com e sem aplicação de vinhaça na camada de 0-10 cm (Figura 10a).

Figura 10. Densidade do solo (DS) das áreas de cana-de-açúcar com diferentes manejos agrícolas na usina Miriri – Santa Rita-PB – VN (vegetação nativa); SQV (Cultivo de cana-de-açúcar em sequeiro com aplicação de vinhaça); IR (Cultivo de cana-de-açúcar irrigado sem aplicação de vinhaça); IRV (Cultivo de cana-de-açúcar irrigado com aplicação de vinhaça).



Valores médios seguidos da mesma letra minúscula não apresentam diferença estatística entre linha e entrelinha dentro de cada manejo, de acordo com o teste de Scott- Knott ($p < 0,05$). Letras maiúsculas diferentes indicam significância entre os manejos. As barras indicam o erro padrão

Comparando os manejos com a vegetação nativa, observou-se que a VN apresentou a menor densidade encontrada nesta pesquisa ($1,1 \text{ Mg m}^{-3}$), diferindo dos demais. Ainda, o manejo IRVL ($1,45 \text{ Mg m}^{-3}$) apresentou-se diferente dos demais. Não foi constatada diferenças entre IRL e SQVL. Comparando as entrelinhas, não houve diferença entre nenhum dos manejos estudados.

Na camada de 10-20 cm, diferentemente da camada anterior, só houve diferença estatística significativa para Linha e Entrelinha no manejo IRV, com valor menor de Ds para a linha ($1,51 \text{ Mg m}^{-3}$) (Figura 10b).

Avaliando as diferenças entre os manejos, novamente a vegetação nativa expos os menores valores ($1,1 \text{ Mg m}^{-3}$) encontrados para esta camada, indicando diferenças entre todos os manejos. Não se constatou diferenças entre IRL e SQVL, indicando que IRVL mostrou-se diferente. Nas entrelinhas, como na camada anterior não houve diferença entre nenhum dos

manejos, no entanto houve aumento da densidade em IR ($1,8 \text{ Mg m}^{-3}$) e IRV ($1,8 \text{ Mg m}^{-3}$) em relação a camada mais superficial.

O uso de máquinas agrícolas constantes nas áreas de produção traz consigo inúmeros efeitos, sendo o principal deles a compactação do solo. Com a finalidade de reduzir tais efeitos, surgiu a agricultura de tráfego controlado, onde em todo ciclo da cultura a máquina irá se mover pela mesma entrelinha, de forma a diminuir os impactos causados na linha de plantio. Tudo isso, faz com que as áreas onde as máquinas passam concentrem a principal carga dos veículos (ESTEBAN et al., 2020).

Os dados apresentados para densidade do solo, indicam que o tráfego controlado nas áreas estudadas foi preponderante para que os valores de densidade fossem maiores nas entrelinhas do que em relação as linhas, isso também foi observado por Souza, et al. (2012), indicando que maiores valores de densidade promovem maior compactação do solo (SUZUKI et al., 2008).

É notável salientar que a densidade do solo é um dos principais atributos físicos do solo influenciados pelo tráfego de máquinas nas áreas de cultivo, e por isso, as informações encontradas para este atributo no presente manuscrito, evidenciam a importância da adoção de práticas como a utilização do tráfego controlado de máquinas, a fim de preservar as condições físicas necessárias para o desenvolvimento das culturas.

A vegetação nativa, apresentou valores abaixo ($1,1 \text{ Mg m}^{-3}$) aos de referência de densidade estabelecidos para solos arenosos ($1,3$ a $1,6 \text{ Mg m}^{-3}$) nas duas camadas estudadas, ainda assim são resultados que indicam que os valores encontrados refletem nas informações descritas para a área, sendo um local conservado, onde não houve quaisquer interferências humanas, relatada ao longo dos anos. A densidade diferiu dos demais manejos estudados nas duas camadas analisadas, isso foi constatado por Cardoso et al. (2015), quando comparou canaviais e fragmentos de florestas.

Os valores encontrados nas linhas de todos os manejos na camada de 0-10 cm encontram-se dentro do limite de referência. Diferenças entre as linhas de IR e IRV, indicam que a aplicação de vinhaça pode ter trazido benefícios para a camada superficial do solo, como a disponibilização de matéria orgânica, e assim, diminuído os efeitos da compactação e conseqüentemente redução da densidade. Todas as entrelinhas apresentaram valores acima do limiar crítico estabelecido para solos com essas características texturais, valores médios de $1,7 \text{ Mg m}^{-3}$, o que pode ser indício de compactação nesses pontos, condições essas já esperadas, visto que toda carga das máquinas agrícolas é impulsionada nas entrelinhas.

Na camada de 10-20 cm notou-se um comportamento similar a camada anterior para o manejo IRV, onde houve diferença entre sua linha e entrelinha. É notável destacar que, mais uma vez o manejo IRVL diferiu de IRL, apresentando valores abaixo do limite crítico, em contraponto, IRL apresentou os maiores valores encontrados nas linhas, esses resultados tendem a confirmar a tese de que a aplicação de vinhaça traz benefícios a estrutura do solo, essa afirmação é confirmada no trabalho de (OLIVEIRA et al., 2010).

Os aumentos de densidades constatados na camada de 10-20 cm, são relatados em outras pesquisas (CANISARES et al., 2020; DE CASTRO PAES et al., 2021), visto que toda camada logo abaixo de 10 cm, é adensada pelas práticas de manejos agrícolas, fazendo com que, toda carga exercida pelos 10 cm superficiais seja impulsionada sobre as camadas posteriores, e isso se torna ainda mais evidente nos valores mais elevados nas entrelinhas, que chegam a valores críticos como em IREL ($1,76 \text{ Mg m}^{-3}$).

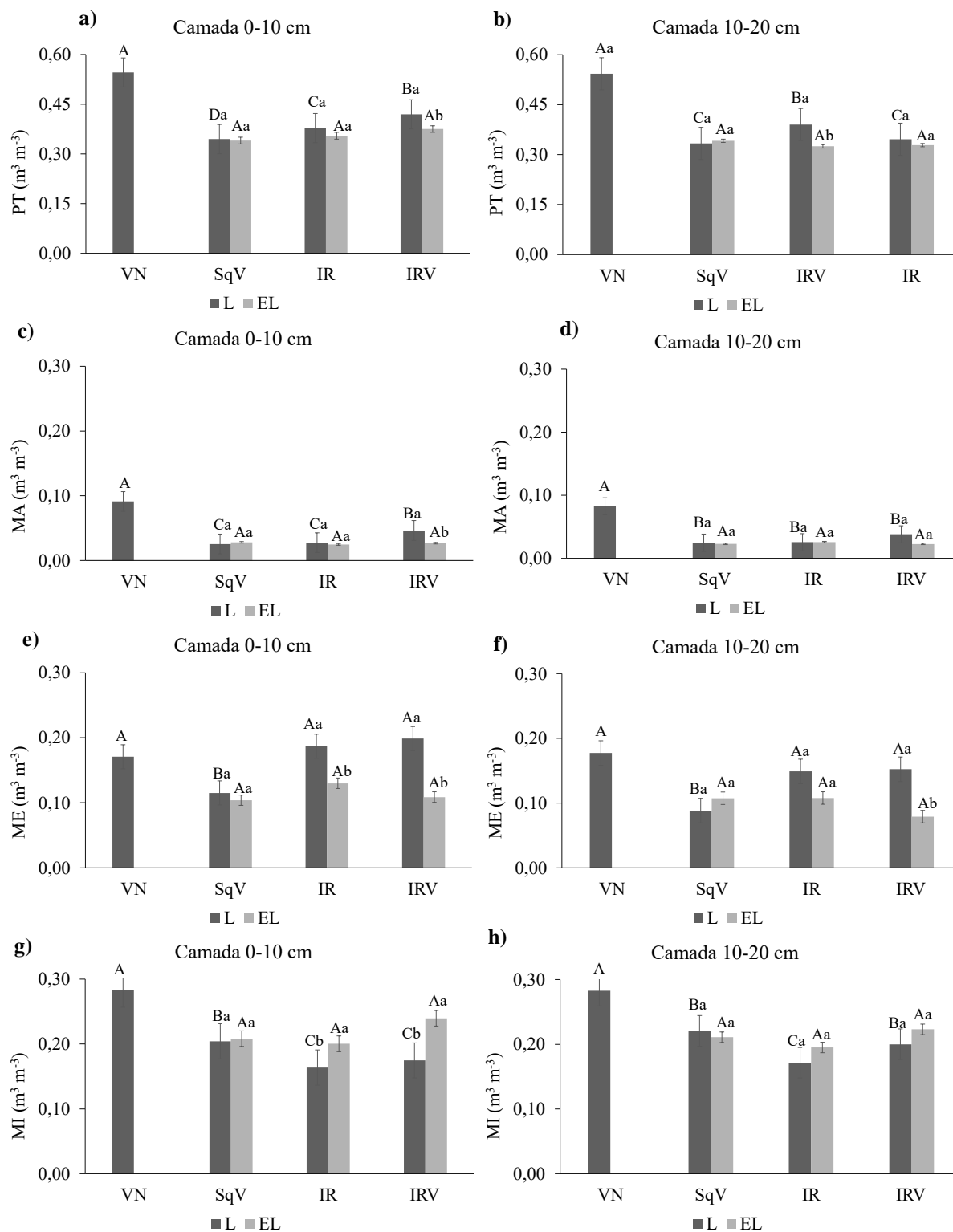
Ainda, é possível que mesmo com os benefícios relatados pela aplicação de vinhaça, possam aparecer resultados que não diferem entre essas áreas, principalmente nas entrelinhas e isso foi observado por Viana et al. (2011), que relatam que mesmo com a adição de matéria orgânica no solo pela aplicação de vinhaça, o tráfego de máquinas influencia diretamente nos valores de DS, devido a diminuição da MOS ao longo do tempo.

Por fim, o aumento da DS acima dos valores de referência, pode acarretar na diminuição da distribuição do volume de poros, da permeabilidade e taxa de infiltração de água no solo, além da quebra dos agregados e por consequência, aumentar a resistência do solo a penetração de raízes, indicando valores que se aproximam de solos compactados, o que dificulta o desenvolvimento radicular das plantas pela restrição ao acesso de água e nutrientes, podendo resultar em prejuízos econômicos para o produtor, a curto, médio e longo prazo, a depender da decisão que será tomada após a identificação desses danos estruturais (BOTTINELLI et al., 2015; COLOMBI et al., 2018).

4.2 Distribuição de poros no solo

Os valores de porosidade total indicam que, quando se comparou linha e entrelinha só houve diferença significativa no manejo IRV para a camada de 0-10 cm (Figura 11a). Todos os manejos apresentaram os maiores valores nas linhas de plantio.

Figura 11. Porosidade total (PT), macroporosidade (MA), mesoporosidade (ME) e microporosidade (MI) das áreas de cana-de-açúcar com diferentes manejos agrícolas na usina Miriri – Santa Rita-PB – VN (vegetação nativa); SQV (Cultivo de cana-de-açúcar em sequeiro com aplicação de vinhaça); IR (Cultivo de cana-de-açúcar irrigado sem aplicação de vinhaça); IRV (Cultivo de cana-de-açúcar irrigado com aplicação de vinhaça).



Valores médios seguidos da mesma letra minúscula não apresentam diferença estatística entre linha e entrelinha dentro de cada manejo, de acordo com o teste de Scott-Knott ($p < 0,05$). Letras maiúsculas diferentes indicam significância entre os manejos. As barras indicam o erro padrão

A Vegetação Nativa apresentou diferença estatística entre todos os manejos, apresentando o maior valor de porosidade total encontrado ($0,55 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). Dentre os manejos estudados, a área irrigada com aplicação de vinhaça, foi a única que apresentou diferenças quando a linha de plantio foi comparada com a entrelinha. A maior diferença encontrada entre os manejos foi identificada em SQVL ($0,35 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). As entrelinhas não apresentaram diferenças significativas.

Na camada de 10-20 cm, constatou-se diferenças entre as linhas e entrelinhas apenas do manejo IRV. As maiores porosidades foram encontradas onde a amostragem foi realizada na linha de plantio.

Mais uma vez a vegetação nativa diferiu dos demais manejos, quando esses foram comparados nas linhas de plantio. Observa-se que IRL ($0,35 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e SQVL ($0,33 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) apresentaram valores similares, o que fez com que não diferissem. As entrelinhas dos manejos apresentaram valores uniformes, não sendo possível constatar diferenças entre elas (Figura 11b).

Avaliando a macroporosidade na camada de 0-10 cm, quando a linha foi comparada com a entrelinha, só houve diferença no manejo IRV. Comprando os manejos, a VN apresentou diferença dentre todos analisados, com os maiores valores encontrados ($0,09 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). Observando os demais manejos, IRVL ($0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) diferiu de IRL e SQVL que apresentaram valores menores. As entrelinhas não apresentaram diferenças entre os manejos. (Figura 11c).

Não houve diferenças na comparação das linhas versus entrelinhas dos manejos estudados na camada de 10-20. A vegetação nativa apresentou os maiores valores ($0,09 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), diferindo dos demais manejos. Não se constatou diferenças entre as linhas dos manejos, o mesmo comportamento foi observado nas entrelinhas que não defeririam estatisticamente (Figura 11d).

A mesoporosidade na camada de 0-10 cm apresentou diferenças entre linha e entrelinha nos manejos IR, IRV e SQV. Na comparação entre os manejos, VN ($0,17 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), IRL ($0,19 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e IRVL ($0,20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), apresentaram valores similares.

Houve diferença entre SQVL ($0,12 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) que apresentou valores menores em comparação com VN, IRL e IRVL. Nas entrelinhas, não houve diferenças constatadas para esta análise (Figura 11e).

Comparando linha e entrelinha na camada de 10-20 cm, constatou-se diferença significativa nos manejos IR e IRV. Analisando diferença entre os manejos, observou-se similaridades entre os valores de VN, IRL e IRVL, que diferiram de SQVL. Nas entrelinhas, não houve diferenças (Figura 11f).

Na microporosidade, houve diferença entre linha e entrelinha de todos os manejos estudados, com exceção de SQV na camada de 0-10 cm (Figura 11g).

Comparando os manejos, a VN diferiu de todos os demais com $0,32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, posteriormente aparece SQVL com $(0,20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3})$, e os menores valores encontrados constam em IRVL $(0,17 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3})$. e IRL $(0,16 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3})$. As entrelinhas não diferiram estatisticamente.

Na camada de 10-20 cm, não houve diferença entre linha e entrelinha para nenhum dos manejos estudados. Houve similaridade entre IRVL e SQVL. Já IRVL diferiu dos demais, apresentando os menores valores $(0,17 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3})$. Comparando as entrelinhas dos manejos, novamente não houve diferença (Figura 11h).

O maior volume de poros encontrado na vegetação nativa, é um dos indicativos de que a área se encontra conservada, onde os resultados obtidos são refletidos por uma maior presença de espécies nativas na área de estudo, que apresentam sistemas radiculares mais diversos e uma maior atividade biológica, com a presença de cupins, minhocas e formigas, que abrem poros no solo (BOTTINELLI et al., 2015).

Ligado a isso, ocorre uma proteção da camada superficial do solo, por uma maior concentração de matéria orgânica no solo. Por ser um agente ligante na formação dos agregados, a matéria orgânica do solo propicia um rearranjo mais adequando das partículas do solo, contribuindo na manutenção dos poros, o que não ocorre em áreas de cultivo, fato relatado em alguns trabalhos que relacionam a vegetação nativa com diferentes manejos agrícolas (HARUNA et al., 2018; OLIVEIRA; ROLIM; VASCONCELOS; COSTA; et al., 2010; SANTOS; SCOTTI, 2018; SATTOLO et al., 2021).

A redução da porosidade total encontrada neste trabalho indica que, os diferentes manejos adotados nas áreas de produção de cana-de-açúcar influenciam diretamente neste comportamento, uma vez que, as tensões aplicadas pelas máquinas agrícolas na execução das suas atividades resultam no colapso e rompimento dos maiores poros do solo. Consequência deste fato se dá na redução de $0,19 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ do manejo sequeiro com aplicação de vinhaça em relação a vegetação nativa.

Ainda que os resultados encontrados estejam acima da zona crítica $(0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3})$ relatada por Roque et al. (2010), os resultados indicam perdas consideráveis da porosidade do solo para todos os manejos. É comum que áreas naturais, quando convertidas em áreas de produção agrícola apresentem variações nos atributos físicos do solo, principalmente na distribuição de poros no solo.

Nesses casos, a macroporosidade do solo é a mais afetada, isso ocorre porque as partículas do solo são adensadas pelo tráfego de máquinas nas áreas e conseqüentemente os espaços vazios que seriam preenchidos por ar e água, são reduzidos causando o processo de compactação do solo, comportamento similar ao identificado no presente manuscrito.

Ainda que haja a adoção do tráfego controlado de máquinas, os efeitos da compactação não são majoritariamente minimizados, pois o impacto do seu peso na entrelinha influencia no rearranjo das partículas no solo (SOUZA et al., 2012).

É notável salientar que, a aplicação de vinhaça na área irrigada promoveu melhorias a porosidade do solo quando a analisamos em relação a área sem aplicação, identificou-se uma manutenção de $0,04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ na porosidade total do manejo IRVL.

Nesse mesmo manejo na linha de plantio, ocorreu uma manutenção da mesma ordem de $0,04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ em relação a entrelinha. Essas informações concordam com a tese de que a aplicação de vinhaça no solo promove benefícios a qualidade física do solo, proporcionando melhorias e ou manutenção desses atributos (VICENTE et al., 2012).

A principal consequência da compactação causada pelo tráfego de máquinas agrícolas, é um aumento da densidade do solo, onde com esse aumento, a estrutura do solo fica comprometida e reflete na redução dos seus índices de porosidade, acarretando inúmeros outros problemas físicos, um dos principais seria a redução da taxa de infiltração de água no solo.

Os dados apresentados indicam que, umas das principais consequências dos danos causados as condições físicas do solo é a redistribuição dos poros no solo. Onde ocorrerá a diminuição dos macroporos e mesoporos, e principalmente nestes casos os microporos são aumentados, resultados semelhantes foram relatados por Arcoverde et al. (2019) e Rossetti; Centurion (2013).

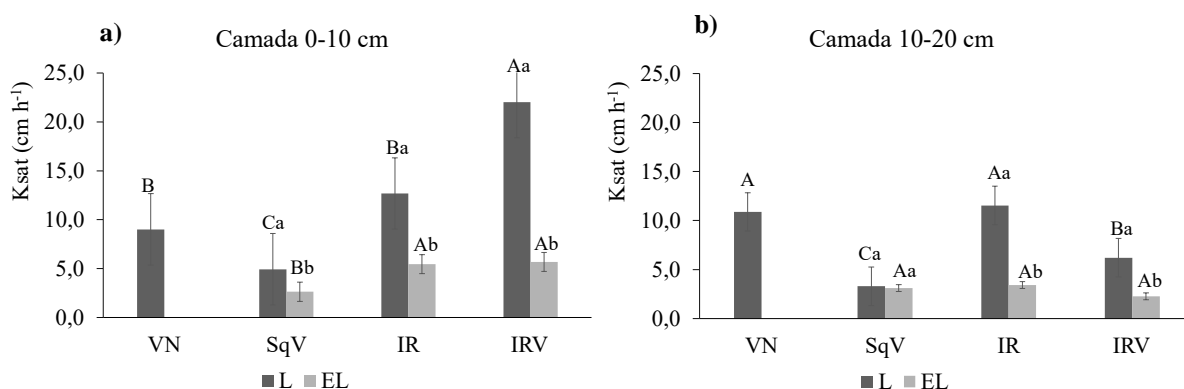
Com o aumento da densidade do solo, ocorre a diminuição da porosidade ou aumento da microporosidade, que tem por consequência uma redução na macroporosidade, resultando em alterações na retenção de água, desta forma, pode-se atribuir a este atributo físico conferência no diagnóstico da mecânica e movimento hídrico no solo.

Por fim, os danos provocados na distribuição dos poros nas áreas que adotam o sistema de cultivo em sequeiro, estão atrelados aos ciclos de umedecimento e secagem no solo, que por sua vez, induzem efeitos de expansão e redução, causando a ruptura dos agregados do solo (ROMERO-RUIZ et al., 2018).

4.3 Condutividade hidráulica saturada

Todos os manejos estudados apresentaram diferenças estatísticas para a condutividade hidráulica saturada, quando foram comparados na linha e entrelinha na camada de 0-10 cm (Figura 12 a). Na camada de 10-20 cm, só não houve diferença constatada para o manejo em sequeiro com aplicação de vinhaça (Figura 12b).

Figura 12. Condutividade hidráulica saturada (Ksat) das áreas de cana-de-açúcar com diferentes manejos agrícolas na usina Miriri – Santa Rita-PB – VN (vegetação nativa); SQV (Cultivo de cana-de-açúcar em sequeiro com aplicação de vinhaça); IR (Cultivo de cana-de-açúcar irrigado sem aplicação de vinhaça); IRV (Cultivo de cana-de-açúcar irrigado com aplicação de vinhaça).



Valores médios seguidos da mesma letra minúscula não apresentam diferença estatística entre linha e entrelinha dentro de cada manejo, de acordo com o teste de Scott- Knott ($p < 0,05$). Letras maiúsculas diferentes indicam significância entre os manejos. As barras indicam o erro padrão

Quando os manejos foram comparados entre si, separadamente nas duas camadas, houve diferença significativa entre as linhas de todos os manejos, com os maiores valores encontrados na linha do manejo irrigado com aplicação de vinhaça, nas duas camadas avaliadas, além da linha do manejo irrigado sem aplicação de vinhaça. As entrelinhas de IR e IRV apresentaram valores similares e difeririam das entrelinhas de SQV.

A vegetação nativa apresentou os valores médios ($9,0 \text{ cm h}^{-1}$) encontrados entre todos os manejos na camada de 0-10 cm. Os maiores valores ($22,0 \text{ cm h}^{-1}$) encontrados foram do manejo irrigado com aplicação de vinhaça.

Atributos físicos anteriormente relatados, como a distribuição de poros e a densidade do solo, tem relação direta com a condutividade hidráulica saturada (Ksat), que é um dos principais atributos físicos estudados quando procura-se entender o movimento de água no solo. Seus resultados implicaram muitas vezes nas condições em que o solo se encontra, do ponto de vista estrutural e como os manejos adotados estão influenciando no seu comportamento (GONÇALVES; LIBARDI, 2013; LIER; LIBARDI, 1999).

Em áreas de produção agrícola, o uso de máquinas é muitas vezes indispensável, visto que, auxiliam e aceleram todos os procedimentos no campo. Essas práticas acarretam no aumento da densidade do solo, pela consequência da diminuição dos espaços porosos. E essa redução, principalmente no volume dos macroporos leva a uma consequente redução da condutividade hidráulica saturada e a um aumento no desenvolvimento mecânico no crescimento das raízes (ROMERO-RUIZ et al., 2018).

O tráfego controlado de máquinas nas áreas estudadas foi eficaz na manutenção dos valores de condutividade hidráulica saturada, uma vez que, as diferenças constatadas nas comparações entre as linhas e entrelinhas dos manejos, provam que os menores valores de K_{sat} nas entrelinhas, são decorrentes da compactação desses locais, por serem exclusivamente para a passagem das máquinas e realização de práticas agrícolas.

Uma vez que, as linhas de plantio seguem preservadas durante todo o ciclo da cultura e mesmo após a colheita, quando ocorre a necessidade de renovar o canavial. Resultados parecidos foram encontrados por Roque et al. (2010).

Também é possível que os valores mais elevados apresentados nos manejos IR e IRV sejam os mais altos devido ao teor de areia de areia total (Tabela 2) serem os maiores dentre os manejos estudados, assim como a areia grossa em relação a areia fina. Dessa forma, é possível afirmar que maiores teores de areia grossa irão proporcionar maiores espaços porosos ao solo. Ainda assim, as diferenças significativas constatadas em relação a aplicação de vinhaça, trazem a confirmação dos seus benefícios a estrutura do solo.

Disto isto, mais uma vez a vinhaça mostrou-se eficaz em proporcionar melhorias a qualidade estrutural do solo, a ponto de promover a manutenção em um dos seus atributos. Mesmo que, notadamente mais uma vez os ciclos de umedecimento e secagem nas áreas de sequeiro tenham sido mais agravantes em gerar danos a estrutura física do solo.

Solos de textura arenosa, apresentam uma maior permeabilidade e baixa capacidade de retenção de água. O que faz com que solos com perfil mais arenoso, tenha característica de facilidade de infiltração de água, em contraste, a água não fica muito tempo retida. Isso se dá, devido os poros serem maiores e as partículas de areia não possuem cargas elétricas em superfície suficientemente fortes, tanto para resistir à força da gravidade, quanto para manter água por muito tempo como as argilas são capazes.

É possível que os manejos onde estão implantados sistemas de irrigação, nesse caso pivô central, estejam dispersando estas argilas, aumentando assim os processos erosivos e fazendo com que haja uma maior exposição das areias, principalmente as maiores partículas, areia grossa.

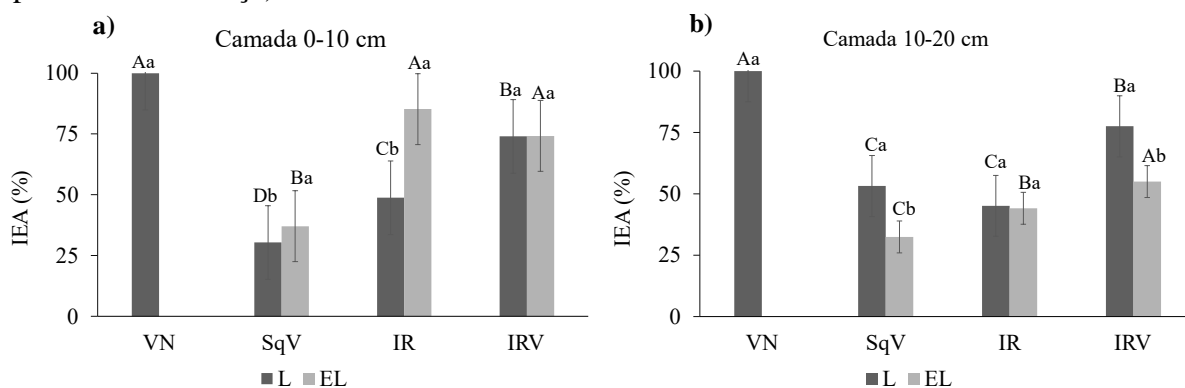
Outro fator que deve ser levado em consideração, é que mesmo sendo áreas que apresentam a mesma classe de solo, elas estão dispostas geograficamente em zonas distintas no território da fazenda, representadas por pequenas manchas de solo que vão desde a sede da fazenda (área central) até uma zona mais próxima ao litoral (área leste), o que fez com que as classes texturais apresentassem resultados distintos.

Para finalizar, os valores encontrados fazem referência a outras pesquisas realizadas, onde, no estado de Goiás, em áreas de Argissolo foram encontradas por Fiori et al. (2010), condutividades para Argissolo próximo de 5 cm h^{-1} . Boa parte dos manejos apresentaram valores superiores a esses nas linhas de plantio.

4.4 Índice de estabilidade de agregados e classe de agregados

Observa-se que na comparação entre linha e entrelinha dos manejos na camada de 0-10 cm, só houve diferença significativa entre IRL (48,77%) E IREL (85,21%) (Figura 13a). Na camada de 10-20 cm, constatou-se diferenças entre IRVL (77,53%); IRVEL (55,00%) e entre SQVL e SQVEL (32,44%) (Figura 13b).

Figura 13. Índice de estabilidade de agregados (IEA) das áreas de cana-de-açúcar com diferentes manejos agrícolas na usina Miriri – Santa Rita-PB – VN (vegetação nativa); SQV (Cultivo de cana-de-açúcar em sequeiro com aplicação de vinhaça); IR (Cultivo de cana-de-açúcar irrigado sem aplicação de vinhaça); IRV (Cultivo de cana-de-açúcar irrigado com aplicação de vinhaça).



Valores médios seguidos da mesma letra minúscula não apresentam diferença estatística entre linha e entrelinha dentro de cada manejo, de acordo com o teste de Scott- Knott ($p < 0,05$). Letras maiúsculas diferentes indicam significância entre os manejos. As barras indicam o erro padrão

Na comparação entre os manejos, a Vegetação Nativa apresentou o valor de 100% de IEA, para as duas profundidades estudadas. Ainda, constatou-se diferença significativa entre a VN e todos os demais manejos, com os menores valores encontrados no SQVL (30,36%) para a camada de 0-10 cm. Onde, na camada de 10-20 cm, houve diferença entre a VN e os demais manejos.

O alto índice de estabilidade de agregados na vegetação nativa, deve-se a reduzida intervenção humana nessa área, seja na frequente mudança ou adoção de manejos, ou mesmo a utilização de máquinas agrícolas. Ainda pode-se afirmar que nessas áreas não ocorre mudança na estrutura do solo a curto e médio prazo, visto que a ciclagem de nutrientes ocorre com frequência, pela diversidade de espécies existentes, de fauna e flora nativa.

Outro fator relevante para a estabilização dos agregados nessas áreas, é a disponibilização de matéria orgânica no solo, atrelado as atividades biológicas desenvolvidas pelos microrganismos do solo, facilitada pela diversidade de fauna e flora conservada, ampliando a gama de matérias que faram parte dos processos de decomposição e mineralização (WILLIAMS; PETTICREW, 2009).

As diferenças entre as linhas de IR (48,77%) e IRV (74,00%) na camada de 0-10 cm, são indícios de que a aplicação de vinhaça trouxe melhorias a estabilização dos agregados, Vicente et al (2011), obtiveram valores semelhantes, comparando áreas de cana-de-açúcar com e sem aplicação de vinhaça. Ainda, esse aumento pode não ter sido tão acentuado, devido a pouca estrutura nessas áreas e o alto teor de areia.

Por outro lado, quando se avaliou o manejo em sequeiro, notou-se que mesmo com a aplicação de vinhaça, houve uma redução significativa dos valores de estabilidade. Neste caso, o aporte de matéria orgânica no solo, conhecido em áreas de aplicação e vinhaça não foi suficiente para compensar os danos relacionados aos ciclos constantes de umedecimento e secagem nessas áreas de sequeiro.

Essa tese ficou ainda mais acentuada nesta variável pelo fato de ser uma constata que se trata da condição dos agregados no solo, e esses ciclo de umedecimento e secagem por vezes causam rupturas a estrutura física dos agregados tornando-os mais suscetíveis aos agentes erosivos.

Foi constatado por Tavares Filho et al. (2012) que índices de estabilidade de agregados com valores acima de 50% são indícios de uma boa estruturação do solo. Essas informações também foram constatadas por Oliveira et al. (2010) quando avaliou o IEA em diferentes manejos agrícolas em um Argissolo Amarelo com cultivo de cana-de-açúcar. O presente estudo indicou estes valores, porém os manejos IRL nas duas camadas estudadas aprestou índices mais baixos, assim como o SQVL.

No caso dos manejos irrigados esses resultados podem estar atrelados a sua classe textural ser predominantemente arenosa e ainda, quando observamos os valores da argila dispersa, areia e argila total é possível notar que, as áreas de sequeiro apresentam maiores

valores de argila e conseqüentemente maior dispersão, o que acarretou danos a estrutura dos agregados.

Avaliando a massa proporcional de agregados do solo, a maior média encontrada foi nos macroagregados grandes da vegetação nativa, seguido de IRV, para as camadas de 0-10 cm e 10-20 cm. Os manejos SQV e IR apresentaram respectivamente os menores valores para macroagregados grandes e conseqüentemente, os maiores valores de macroagregados pequenos em relação aos demais manejos (Tabela 4).

Tabela 4. Média da massa proporcional de agregados do solo das áreas estudadas – VN (vegetação nativa); SQV (Cultivo de cana-de-açúcar em sequeiro com aplicação de vinhaça) IR (Cultivo de cana-de-açúcar irrigado sem aplicação de vinhaça); IRV (Cultivo de cana-de-açúcar irrigado com aplicação de vinhaça).

Camada (cm)	Classe de agregado (mm)	VN	SQV		IR		IRV	
			L	EL	L	EL	L	EL
Massa de agregado (g)								
0-10	Macroagregados grande (2-8)	22,5	2,0	3,8	3,8	9,2	14,4	15,6
	Macroagregados pequeno (0,25-2)	1,2	19,0	17,6	17,4	12,9	9,0	7,7
	Microagregados (0,053-0,25)	0,6	3,2	2,9	3,1	2,3	1,0	0,9
10-20	Macroagregados grande (2-8)	23,0	8,0	2,6	2,8	3,1	13,4	8,1
	Macroagregados pequeno (0,25-2)	0,7	14,0	18,7	17,8	18,7	10,0	14,8
	Microagregados (0,053-0,25)	0,5	2,1	2,8	3,9	2,7	0,9	1,5

Avaliando a média da massa proporcional de agregados de forma descritiva, nota-se que houve uma variação entre os manejos IR e IRV nas camadas de 0-10 cm e 10-20 cm, onde os macroagregados grandes (3,8g) foram reduzidos a macroagregados pequenos (17,6g) em IRL, já em IRV houve uma inversão, tendo o seus macroagregados grandes (14,4g) restabelecendo seus maiores valores e ficando assim os macroagregados pequenos com 9,0g.

Sabe-se que a matéria orgânica é responsável direta na formação, agregação e cimentação dos agregados do solo e relaciona-se com a estabilização da matéria orgânica e do

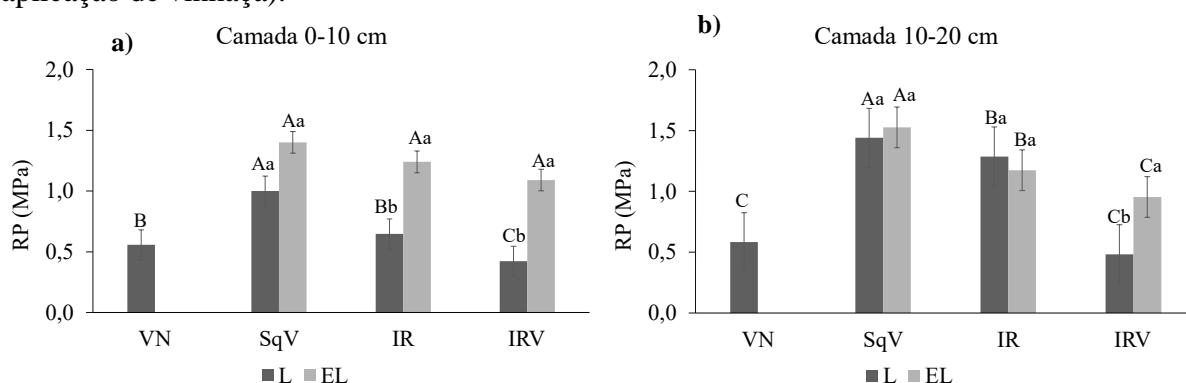
solo (TISDALL; OADES, 1982) e que a aplicação de vinhaça no solo proporciona o aumento nas quantidades de matéria orgânica no solo (CANELLAS et al., 2003; PAULINO, et al., 2011).

Dessa forma, pode-se afirmar que a aplicação de vinhaça nessa área foi responsável direta na estabilização dos agregados e na manutenção dos macroagregados grandes (VICENTE et al., 2012).

4.5 Resistência do solo a penetração de raízes

Não houve diferença significativa quando se comparou linha e entrelinha do manejo SQV para ambas as camadas. Todos os demais manejos apresentaram valores significativos quando suas linhas foram comparadas com as entrelinhas na camada de 0-10 cm, sendo IRL (0,65 MPa) e IREL (1,24 MPa), ainda, IRVL (0,42 MPa) e IRVEL (1,09 MPa) (Figura 14a).

Figura 14. Resistência do solo a penetração de raízes (RP) das áreas de cana-de-açúcar com diferentes manejos agrícolas na usina Miriri – Santa Rita-PB – VN (vegetação nativa); SQV (Cultivo de cana-de-açúcar em sequeiro com aplicação de vinhaça); IR (Cultivo de cana-de-açúcar irrigado sem aplicação de vinhaça); IRV (Cultivo de cana-de-açúcar irrigado com aplicação de vinhaça).



Valores médios seguidos da mesma letra minúscula não apresentam diferença estatística entre linha e entrelinha dentro de cada manejo, de acordo com o teste de Scott- Knott ($p < 0,05$). Letras maiúsculas diferentes indicam significância entre os manejos. As barras indicam o erro padrão

Na camada de 10-20 cm apenas IRV apresentou diferença entre a linha de plantio e a entrelinha (Figura 14b). Quando houve comparação entre os manejos, a vegetação nativa apresentou os menores valores para as duas camadas, com 0,56 MPa na camada de 0-10 cm seguido de 0,58 Mpa. Entretanto os menores valores para todos os manejos estudados foram encontrados em IR50VL que não diferiu da vegetação nativa em nenhuma das camadas analisadas.

O uso de máquinas pesadas e processos naturais são as principais causas da compactação em áreas agricultáveis (GRZESIAK, 2009). A compactação do solo está ligada ao arranjo estrutural do solo, causado por determinadas forças aplicadas, que por vezes reduzem o volume de poros e aumentam a sua densidade.

Dessa forma, a resistência a penetração e a densidade do solo são características chaves para mensurar os efeitos da compactação (ABU-HAMDEH, 2003). De acordo com Otto et al. (2011), valores acima de 2,0 MPa, já são considerados restritivos para o desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar. Nenhum dos manejos estudados alcançaram esses valores, no entanto o manejo em sequeiro com aplicação de vinhaça foi quem mais se aproximou, sendo o maior valor na sua entrelinha na camada de 10-20 cm 1,53 MPa.

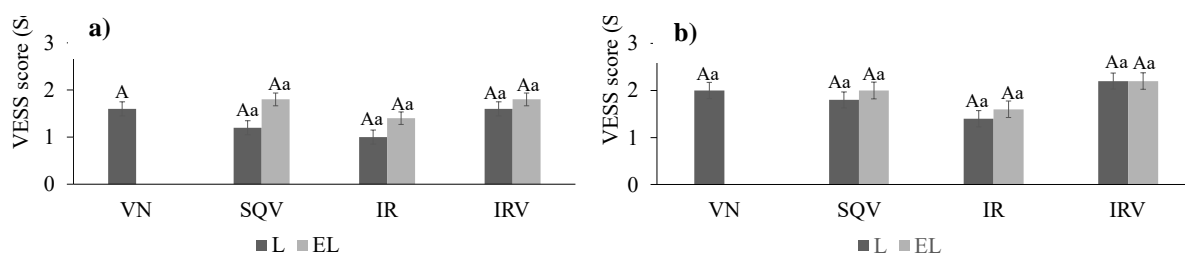
Os ciclos de umedecimento e secagem nessas áreas podem ter sido fundamentais para a expressão desses resultados, e mesmo com o tráfego controlado, a passagem de máquinas na entrelinha gerou impacto suficiente para afetar as linhas, visto que na camada de 10-20 cm onde este impacto é maior, devido ao adensamento da camada superficial sobre as mais profundas, a entrelinha apresentou valores superiores aos encontrados na linha.

Todos os demais manejos encontram-se abaixo desta zona crítica, indicando que não ocorre impedimento para o desenvolvimento radicular da cultura. É notável salientar que todas as linhas apresentaram valores inferiores as entrelinhas nas profundidades estudadas, indicando que o tráfego controlado de máquinas está sendo eficiente em minimizar os efeitos causados pelo traçado dos tratores e implementos, fazendo com que, toda carga que seria aplicada a área ficasse concentrada diretamente na entrelinha de plantio, valores semelhantes são apresentados nos trabalhos de Cortez et al. (2014); Souza et al. (2012).

4.6 Avaliação Visual da Estrutura do Solo (VESS) e correlação com atributos físicos do solo

Na VESS foi possível observar que não houve diferença significativa para nenhum dos manejos estudados, quando as linhas foram comparadas com as entrelinhas. Também não apareceram diferenças quando os manejos foram comparados entre si, nas duas camadas estudadas, 0-10 cm (Figura 15a) e 10-20 cm (Figura 15b).

Figura 15. Avaliação Visual da Estrutura do Solo (VESS) das áreas de cana-de-açúcar com diferentes manejos agrícolas na usina Miriri – Santa Rita-PB – VN (vegetação nativa); SQV (Cultivo de cana-de-açúcar em sequeiro com aplicação de vinhaça); IR (Cultivo de cana-de-açúcar irrigado sem aplicação de vinhaça); IRV (Cultivo de cana-de-açúcar irrigado com aplicação de vinhaça).



Valores médios seguidos da mesma letra minúscula não apresentam diferença estatística entre linha e entrelinha dentro de cada manejo, de acordo com o teste de Scott- Knott ($p < 0,05$). Letras maiúsculas diferentes indicam significância entre os manejos. As barras indicam o erro padrão

Para Giarola et al. (2013), avaliar as camadas de forma individual pode trazer uma maior certeza sobre as reais condições em que o solo se encontra, a fim de entender todos os fatores que envolvem tal resposta e definir uma solução para os manejos implantados. Nenhum dos manejos estudados alcançaram notas acima de 3, consideradas como valores definitivos para uma tomada de decisão sobre abordagem nas áreas, afim de minimizar os impactos causados pelos danos a qualidade estrutural sugerido por Ball et al. (2007), ainda, Cherubin et al. (2017), concluíram que um score VESS de 3,0 pode ser considerado um limiar transitório para auxiliar o produtor no momento de intervir em áreas com cultivo de cana-de-açúcar em regiões tropicais que foram afetadas por danos estruturais constatados no solo.

Disto isto, é preciso entender que esses valores encontrados pelos autores são constatações sobre as condições locais de uso e classe de solo, além de condições regionais, de forma que para determinadas condições e distinções em classes texturais esse valor transitório pode inferior ou superior a 3.

Avaliando a qualidade estrutural do solo em áreas de expansão da cana-de-açúcar com o auxílio da Avaliação Visual da Estrutura do Solo, Castioni et al. (2018) também concluíram que, uma qualidade estrutural fornecendo score VESS acima de 3 indicam camadas de impedimento para o desenvolvimento das raízes, acarretando danos econômicos para a produção agrícola. No geral, os valores encontrados são bons, visto que se encontram abaixo do limite crítico.

É preciso entender que o método é sensível a alterações na qualidade estrutural do solo. No entanto, em solos com pouca ou nenhuma estrutura os scores serão menores, de acordo com Guimarães e Tormena, (2011) os scores entre 1 e 2 apresentam respectivamente agregados com alta porosidade e números elevados de raízes. Isso ocorreu para todos os manejos na profundidade de 0-10 cm e que por tanto apresentaram valores que não requerem mudanças para os manejos adotados.

O cultivo de cana-de-açúcar foi capaz de proporcionar ao solo agregação na superfície do solo, através de suas raízes, e com isso ser possível obter um score, já os scores maiores obtidos nas entrelinhas, indicam compactação do solo, visto que é por essa faixa que as máquinas passam para realização práticas agrícolas.

Ainda, Guimarães et al. (2013) afirmaram que o VESS é capaz de distinguir camadas distintas do solo, neste caso até os 25 cm, visto que a partir desta camada a estrutura do solo é

afetada por outros fatores e, portanto, outro método foi desenvolvido para tal, denominado SubVESS (BALL et al., 2015).

Sabe-se que a VESS é eficaz em fornecer scores capazes de identificar as condições da qualidade estrutural do solo o que foi comprovado nos últimos anos em inúmeras pesquisas (CAVALCANTI et al., 2020; CHERUBIN et al., 2017, 2016; GUIMARÃES, et al., 2011; GUIMARÃES et al., 2017; GUIMARÃES, et al., 2013). No entanto, esses autores enfatizam a importância da correlação entre a VESS e os principais atributos preditores da qualidade estrutural do solo (Tabela 5), visto que esses parâmetros são estudados por mais tempo em relação aos aspectos físicos do solo.

A matriz de correlação de Pearson mostrou correlações significativas entre a VESS e a condutividade hidráulica saturada, a VESS e a resistência do solo a penetração de raízes, além da VESS e a porosidade total, indicando que esses atributos físicos do solo podem ser correlacionados com os scores obtidos na avaliação visual da estrutura do solo (Tabela 5).

Tabela 5. Correlações entre a Avaliação Visual da Estrutura do solo (VESS) e os principais atributos físicos indicadores da qualidade estrutural do solo

Manejo	Prof. cm	K _{sat}	P>r	RP	P>r	PT	P>r	
VN	0-10	-0,28	0,72	0,58	0,42	-0,87	0,06	
	10-20	-0,91	0,28	-	-	-0,85	0,07	
SQV	0-10	L	-0,96	0,091	-	-	0,20	0,75
		EL	-0,65	0,23	-	-	-0,29	0,64
	10-20	L	-0,80	0,11	-	-	-0,14	0,82
		EL	-	-	-	-	-	-
IR	0-10	L	-	-	-	-	-	
		EL	-0,66	0,22	-0,83	0,17	0,20	0,74
	10-20	L	-	-	-0,99	0,02 ^{ns}	-0,76	0,13
		EL	-0,61	0,28	0,99	0,03 ^{ns}	-0,14	0,82
IRV	0-10	L	-	-	0,01	0,99	-0,09	0,89
		EL	0,29	0,71	-0,08	0,95	-0,85	0,07
	10-20	L	0,47	0,53	-0,56	0,62	-0,61	0,27
		EL	-	-	-	-	-0,59	0,29

VN (vegetação nativa); SQV (Cultivo de cana-de-açúcar em sequeiro com aplicação de vinhaça); IR (Cultivo de cana-de-açúcar irrigado sem aplicação de vinhaça); IRV (Cultivo de cana-de-açúcar irrigado com aplicação de vinhaça).; L – Linha; EL – Entrelinha; K_{sat} – Condutividade hidráulica saturada; RP – Resistência do solo a penetração de raízes; PT – Porosidade total; não significativo a nível de 0,05 (ns) pela análise de correlação de Pearson. As células em branco não representam o coeficiente de correlação de Pearson significativo

A VESS e a K_{sat}, apresentaram correlações negativas, indicando que à medida que os scores VESS diminuem a condutividade hidráulica aumenta, ou seja, as camadas de

impedimento do solo tendem a aumentar, como o aumento da densidade do solo e redução dos espaços poros, com a redistribuição dos macros, meso e microporos do solo, como isso a infiltração de água no solo irá reduzir.

A condutividade hidráulica tem uma relação intrínseca com os atributos físicos do solo, e com isso criou-se uma dependência direta entre as condições estruturais do solo, que por vezes são afetadas por sistemas de cultivo, com a condutividade hidráulica.

As correlação entre a VESS e a resistência do solo a penetração de raízes, mostraram-se positivas o que vão de acordo com as informações relatadas por Cavalcanti et al. (2020), uma vez que, o aumento dos scores indicam que a estrutura do solo está sofrendo alterações, que podem vir a acarretar em impedimentos no desenvolvimento do sistema radicular das plantas, essas correlações indicam de fato que, uma baixa condição estrutural irá acarretar em danos capazes de prejudicar a expansão das raízes no solo. Assim interferindo diretamente na realização de suas atividades fisiológicas, com dificuldades de acesso a água e nutrientes.

Correlações negativas ocorreram entre a VESS e a porosidade total, indicando mais uma vez que, uma boa condição estrutural do solo irá preservar a distribuição de poros no solo, em contraste , quando há uma piora na qualidade estrutural do solo, muitas vezes causada por compactação ou uma má gestão no controle das práticas agrícolas os poros do solo serão reduzidos pelo adensamento dos agregados do solo, esses resultados foram relatados por Cavalcanti et al. (2020), em área de cana-de-açúcar, no nordeste do Brasil e por Cherubin et al. (2017) com a mesma cultura na região sudeste.

Por fim, deve existir um equilíbrio entre os manejos implantados e o ambiente, que seja capaz de proporcionar condições para que as plantas se desenvolvam e sejam economicamente viáveis para os produtores e ambientalmente correto para o meio. Assim, é possível que por meio desse equilíbrio, a natureza siga seu curso, direcionado a fornecer de forma mais coerente seus principais serviços ecossistêmicos.

5 CONCLUSÕES

A densidade do solo, distribuição dos poros no solo, condutividade hidráulica saturada e resistência do solo a penetração de raízes, são atributos físicos eficazes e confiáveis em fornecer informações úteis na identificação das condições estruturais em áreas produtoras de cana-de-açúcar com e sem aplicação de vinhaça para as condições de uso apresentadas nesta pesquisa.

A diferença constatada entre as linhas e entrelinhas dos manejos indicam que, o tráfego controlado de máquinas pode ser uma estratégia adotada pelos produtores para reduzir o impacto dos manejos sobre as condições físicas do solo.

Os Scores VESS encontrados nos manejos estudados, apresentaram correlações positivas com a resistência do solo a penetração de raízes e negativas com a porosidade total e condutividade hidráulica saturada.

A avaliação visual da estrutura do solo não foi capaz de identificar diferenças entre os manejos estudados, o que está relacionado com a classe textural das áreas, solos arenosos com pouca estruturação.

Foi possível constatar que em áreas onde o tráfego controlado de máquinas é adotado, as amostragens para atributos físicos preditores da qualidade estrutural do solo devem ser realizadas nas linhas de plantio, evitando extrapolação dos dados pela compactação encontrada nas entrelinhas.

Por fim, o método de VESS pode ser usado por produtores e técnicos de campo em áreas de produção de cana-de-açúcar na região nordeste do Brasil, como uma ferramenta preventiva, a fim de atestar as condições estruturais das áreas manejadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABD-ELWAHED, M. S. Effect of long-term wastewater irrigation on the quality of alluvial soil for agricultural sustainability. **Annals of Agricultural Sciences**, v. 64, n. 2, p. 151–160, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.aosas.2019.10.003>
- ABU-HAMDEH, N. H. Soil compaction and root distribution for okra as affected by tillage and vehicle parameters. **Soil and Tillage Research**, v. 74, n. 1, p. 25–35, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(03\)00122-3](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(03)00122-3)
- ALI, S. E.; EL GEDAILY, R. A.; MOCAN, A.; FARAG, M. A.; EL-SEEDI, H. R. Profiling Metabolites and Biological Activities of Sugarcane (*Saccharum officinarum* Linn.) Juice and its Product Molasses via a Multiplex Metabolomics Approach. **Molecules**, v. 24, n. 5, p. 934, 2019. <https://doi.org/10.3390/molecules24050934>
- ALI, S. E.; YUAN, Q.; WANG, S.; FARAG, M. A. More than sweet: A phytochemical and pharmacological review of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). **Food Bioscience**, v. 44, p. 101431, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101431>
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. D. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, 22(6), 711-728, 2013. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, ARAGÃO, O. P. Alternativas para estabilização da agricultura de sequeiro. **EMBRAPA-CPATSA. Documentos**, 1980. Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/155950/1/SDC5.pdf>> Acesso em: 27 dez. 2021.
- ARCOVERDE, S. N. S.; SOUZA, C. M. A. de; SUAREZ, A. H. T.; COLMAN, B. A.; NAGAHAMA, H. de J. Atributos físicos do solo cultivado com cana-de-açúcar em função do preparo e época de amostragem. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 6, n. 1, p. 41–47, 2019. <https://doi.org/10.32404/rean.v6i1.2761>
- ASKARI, M. S.; CUI, J.; O'ROURKE, S. M.; HOLDEN, N. M. Evaluation of soil structural quality using VIS–NIR spectra. **Soil and Tillage Research, Soil Structure and its Functions in Ecosystems: Phase matter & Scale matter**. v. 146, p. 108–117, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.03.006>
- BALL, B. C.; BATEY, T.; MUNKHOLM, L. J. Field assessment of soil structural quality – a development of the Peerlkamp test. **Soil Use and Management**, v. 23, n. 4, p. 329–337, 2007. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2007.00102>
- BALL, B. C.; BATEY, T.; MUNKHOLM, L. J. Field assessment of soil structural quality – a development of the Peerlkamp test. **Soil Use and Management**, v. 23, n. 4, p. 329–337, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2016.05.004>
- BALL, B. C.; DOUGLAS, J. T. A simple procedure for assessing soil structural, rooting and surface conditions. **Soil Use and Management**, v. 19, n. 1, p. 50–56, 2003. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2003.tb00279>

- BALL, B.; BATEY, T.; MUNKHOLM, L.; GUIMARÃES, R.; BOIZARD, H.; MCKENZIE, D.; PEIGNÉ, J.; TORMENA, C.; HARGREAVES, P. The numeric visual evaluation of subsoil structure (SubVESS) under agricultural production. **Soil and Tillage Research**, v. 148, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.12.005>
- BALL, B. C.; GUIMARÃES, R. M. L.; CLOY, J. M.; HARGREAVES, P. R.; SHEPHERD, T. G.; MCKENZIE, B. M. Visual soil evaluation: A summary of some applications and potential developments for agriculture. **Soil and Tillage Research**, Visual soil evaluation and soil compaction research. v. 173, p. 114–124, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.07.006>
- BESSON, A.; SÉGER, M.; GIOT, G.; COUSIN, I. Identifying the characteristic scales of soil structural recovery after compaction from three in-field methods of monitoring. **Geoderma**, v. 204–205, p. 130–139, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.04.010>
- BLACK, E.; VIDALE, P. L.; VERHOEF, A.; CUADRA, S. V.; OSBORNE, T.; HOOF, C. V. den. Cultivating C4 crops in a changing climate: sugarcane in Ghana. **Environmental Research Letters**, v. 7, n. 4, p. 044027, 2012. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044027>
- BORDONAL, R. de O.; CARVALHO, J. L. N.; LAL, R.; DE FIGUEIREDO, E. B.; DE OLIVEIRA, B. G.; LA SCALA, N. Sustainability of sugarcane production in Brazil. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 38, n. 2, p. 13, 2018. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0490>
- BOTTINELLI, N.; JOUQUET, P.; CAPOWIEZ, Y.; PODWOJEWSKI, P.; GRIMALDI, M.; PENG, X. Why is the influence of soil macrofauna on soil structure only considered by soil ecologists? **Soil and Tillage Research**, Soil Structure and its Functions in Ecosystems: Phase matter & Scale matter. v. 146, p. 118–124, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.01.007>
- BRASIL. (1972). Equipe de Pedologia e Fertilidade do Solo – **Ministério da Agricultura**. Levantamento Exploratório – Reconhecimento de solos do Estado da Paraíba. Rio de Janeiro.
- BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, v. 124, n. 1, p. 3–22, 2005. DOI 10.1016/j.geoderma.2004.03.005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706104000898>
- BÜNEMANN, E. K.; BONGIORNO, G.; BAI, Z.; CREAMER, R. E.; DE DEYN, G.; DE GOEDE, R.; FLESKENS, L.; GEISSEN, V.; KUYPER, T. W.; MÄDER, P.; PULLEMAN, M.; SUKKEL, W.; VAN GROENIGEN, J. W.; BRUSSAARD, L. Soil quality – A critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 120, p. 105–125, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>
- CANELLAS, L. P.; VELLOSO, A. C. X.; MARCIANO, C. R.; RAMALHO, J. F. G. P.; RUMJANEK, V. M.; REZENDE, C. E.; SANTOS, G. A. Propriedades químicas de um Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar, com preservação do palhico e adição de vinhaça por longo tempo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 935–944, 2003. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000500018>
- CANISARES, L. P.; CHERUBIN, M. R.; DA SILVA, L. F. S.; FRANCO, A. L. C.; COOPER, M.; MOONEY, S. J.; CERRI, C. E. P. Soil microstructure alterations induced by land use change for sugarcane expansion in Brazil. **Soil Use and Management**, v. 36, n. 2, p. 189–199, 2020. <https://doi.org/10.1111/sum.12556>

- CARDOSO, M. de O.; PEDROSA, E. M. R.; FERRIS, H.; ROLIM, M. M.; VICENTE, T. F. da S.; DAVID, M. F. de L. Comparing sugarcane fields and forest fragments: the effect of disturbance on soil physical properties and nematode assemblages. **Soil Use and Management**, v. 31, n. 3, p. 397–407, 2015. <https://doi.org/10.1111/sum.12190>
- CARVALHO, J. L. N.; NOGUEIROL, R. C.; MENANDRO, L. M. S.; BORDONAL, R. de O.; BORGES, C. D.; CANTARELLA, H.; FRANCO, H. C. J. Agronomic and environmental implications of sugarcane straw removal: a major review. **GCB Bioenergy**, v. 9, n. 7, p. 1181–1195, 2017. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12410>
- CASTIONI, G. A.; CHERUBIN, M. R.; MENANDRO, L. M. S.; SANCHES, G. M.; BORDONAL, R. de O.; BARBOSA, L. C.; FRANCO, H. C. J.; CARVALHO, J. L. N. Soil physical quality response to sugarcane straw removal in Brazil: A multi-approach assessment. **Soil and Tillage Research**, v. 184, p. 301–309, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.08.007>
- CAVALCANTI, R. Q.; ROLIM, M. M.; DE LIMA, R. P.; TAVARES, U. E.; PEDROSA, E. M. R.; CHERUBIN, M. R. Soil physical changes induced by sugarcane cultivation in the Atlantic Forest biome, northeastern Brazil. **Geoderma**, v. 370, p. 114353, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114353>
- CHERUBIN, M. R.; FRANCO, A. L. C.; GUIMARÃES, R. M. L.; TORMENA, C. A.; CERRI, C. E. P.; KARLEN, D. L.; CERRI, C. C. Assessing soil structural quality under Brazilian sugarcane expansion areas using Visual Evaluation of Soil Structure (VESS). **Soil and Tillage Research**, Visual soil evaluation and soil compaction research. v. 173, p. 64–74, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.05.004>
- CHERUBIN, M. R.; KARLEN, D. L.; FRANCO, A. L. C.; TORMENA, C. A.; CERRI, C. E. P.; DAVIES, C. A.; CERRI, C. C. Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. **Geoderma**, v. 267, p. 156–168, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.01.004>
- COLOMBI, T.; TORRES, L. C.; WALTER, A.; KELLER, T. Feedbacks between soil penetration resistance, root architecture and water uptake limit water accessibility and crop growth – A vicious circle. **Science of The Total Environment**, v. 626, p. 1026–1035, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.129>
- CONAB - BOLETIM DA SAFRA DE CANA-DE-AÇÚCAR. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar>>. Acesso em: 27 dez. 2021.
- CURTIS, T.; SLOAN, W.; SCANNELL, J. Curtis TP, Sloan WT, Scannell JW. Estimating prokaryotic diversity and its limits. *Proc Natl Acad Sci* 99: 10494-10499. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 99, p. 10494–9, 2002. <https://doi.org/10.1073/pnas.142680199>
- D'HONT, A.; ISON, D.; ALIX, K.; ROUX, C.; GLASZMANN, J.C. Determination of basic chromosome numbers in the genus *Saccarum* by physical mapping of ribosomal RNA genes. **Genome**. 41, 221–225, 1998. <https://cdnsiencepub.com/doi/10.1139/g98-023>

- DACCACHE, A.; KEAY, C.; JONES, R. J. A.; WEATHERHEAD, E. K.; STALHAM, M. A.; KNOX, J. W. Climate change and land suitability for potato production in England and Wales: impacts and adaptation. **The Journal of Agricultural Science**, v. 150, n. 2, p. 161–177, 2012. <https://doi.org/10.1017/S0021859611000839>
- DE CASTRO PAES, É.; FERNANDES, I. O.; DIAS, F. P. M.; PEREIRA, E. G.; SANTOS, D. N.; DE LIMA, J. M.; NÓBREGA, R. S. A.; NÓBREGA, J. C. A. Land use, management and physical attributes of dense Ferralsols in tropical northeastern Brazil. **CATENA**, v. 203, p. 105321, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105321>
- DE MELO, T. R.; FERREIRA, R. R. M.; NAVROSKI, D.; FELTRAN, C. T. M.; FILHO, J. T. Physico-chemical attributes of a Cambisol under pasture managed with annual burns after sugarcane vinasse application. **International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture**, v. 7, n. 1, p. 75–81, 2018. <https://doi.org/10.1007/s40093-018-0193-y>
- DE OLIVEIRA FERREIRA, A.; DE MORAES SÁ, J. C.; LAL, R.; TIVET, F.; BRIEDIS, C.; INAGAKI, T. M.; GONÇALVES, D. R. P.; ROMANIW, J. Macroaggregation and soil organic carbon restoration in a highly weathered Brazilian Oxisol after two decades under no-till. **Science of The Total Environment**, v. 621, p. 1559–1567, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.072>
- DEL GOBBO, L. M.; VILLEGAS, L. B.; COLIN, V. L. The potential application of an autochthonous fungus from the northwest of Argentina for treatment of sugarcane vinasse. **Journal of Hazardous Materials**, v. 365, p. 820–826, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.11.071>
- DENG, X.-P.; SHAN, L.; ZHANG, H.; TURNER, N. C. Improving agricultural water use efficiency in arid and semiarid areas of China. **Agricultural Water Management**, Special Issue on Water Scarcity: Challenges and Opportunities for Crop Science. v. 80, n. 1, p. 23–40, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.07.021>
- DOS SANTOS, H. G., JACOMINE, P. K. T., DOS ANJOS, L. H. C., DE OLIVEIRA, V. A., LUMBRERAS, J. F., COELHO, M. R., ... & CUNHA, T. J. F. (2018). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa, 2018.
- ESTEBAN, D. A. A.; DE SOUZA, Z. M.; DA SILVA, R. B.; DE SOUZA LIMA, E.; LOVERA, L. H.; DE OLIVEIRA, I. N. Impact of permanent traffic lanes on the soil physical and mechanical properties in mechanized sugarcane fields with the use of automatic steering. **Geoderma**, v. 362, p. 114097, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114097>
- FAO, 2019. The agricultural production indices. FAOSTAT, Food and Agricultural Organisation of the United Nations (FAO). Online, Available <http://faostat.fao.org/> (Acessado em dezembro de 2021).
- FERREIRA, D. F. SISVAR: A COMPUTER ANALYSIS SYSTEM TO FIXED EFFECTS SPLIT PLOT TYPE DESIGNS: Sisvar. **Revista Brasileira de Biometria**, v. 37, n. 4, p. 529–535, 2019. <https://doi.org/10.28951/rbb.v37i4.450>

- FRAITURE, C. de; WICHELNS, D.; ROCKSTRÖM, J.; KEMP-BENEDICT, E.; ERIYAGAMA, N.; GORDON, L. J.; HANJRA, M. A.; HOOGEVEEN, J.; HUBER-LEE, A.; KARLBERG, L. Looking ahead to 2050: scenarios of alternative investment approaches. 2007. Disponível em: <<https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/36869>>. Acesso em: 27 dez. 2021.
- FRANCO, H. H. S.; GUIMARÃES, R. M. L.; TORMENA, C. A.; CHERUBIN, M. R.; FAVILLA, H. S. Global applications of the Visual Evaluation of Soil Structure method: A systematic review and meta-analysis. **Soil and Tillage Research**, v. 190, p. 61–69, 2019. DOI 10.1016/j.still.2019.01.002. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198718309826>
- FREITAS, M.; OLIVEIRA, M. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, v. 34, 2004. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782004000300052>
- GIAROLA, N. F. B.; DA SILVA, Á. P.; TORMENA, C. A.; GUIMARÃES, R. M. L.; BALL, B. C. On the Visual Evaluation of Soil Structure: The Brazilian experience in Oxisols under no-tillage. **Soil and Tillage Research**, Special issue: Applications of Visual Soil Evaluation. v. 127, p. 60–64, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.03.004>
- GOLDEMBERG, J.; MELLO, F. F. C.; CERRI, C. E. P.; DAVIES, C. A.; CERRI, C. C. Meeting the global demand for biofuels in 2021 through sustainable land use change policy. **Energy Policy**, v. 69, p. 14–18, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.02.008>
- GONÇALVES, A. D. M. de A.; LIBARDI, P. L. Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 1174–1184, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000500007>
- GRZESIAK, M. T. Impact of soil compaction on root architecture, leaf water status, gas exchange and growth of maize and triticale seedlings. **Plant Root**, v. 3, p. 10–16, 2009. <https://doi.org/10.3117/plantroot.3.10>
- GUIMARÃES, R. M. L.; BALL, B. C.; TORMENA, C. A. Improvements in the visual evaluation of soil structure. **Soil Use and Management**, v. 27, n. 3, p. 395–403, 2011. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2011.00354>
- GUIMARÃES, Rachel M. L.; LAMANDÉ, M.; MUNKHOLM, L. J.; BALL, B. C.; KELLER, T. Opportunities and future directions for visual soil evaluation methods in soil structure research. **Soil and Tillage Research**, Visual soil evaluation and soil compaction research. v. 173, p. 104–113, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.01.016>
- GUIMARÃES, R. M. L.; BALL, B. C.; TORMENA, C. A.; GIAROLA, N. F. B.; DA SILVA, Á. P. Relating visual evaluation of soil structure to other physical properties in soils of contrasting texture and management. **Soil and Tillage Research**, Special issue: Applications of Visual Soil Evaluation. v. 127, p. 92–99, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.01.020>
- HARUNA, S. I.; ANDERSON, S. H.; NKONGOLO, N. V.; ZAIBON, S. Soil Hydraulic Properties: Influence of Tillage and Cover Crops. **Pedosphere**, v. 28, n. 3, p. 430–442, 2018. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60387-4](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60387-4)

- HU, W.; DREWRY, J.; BEARE, M.; EGER, A.; MÜLLER, K. Compaction induced soil structural degradation affects productivity and environmental outcomes: A review and New Zealand case study. **Geoderma**, v. 395, p. 115035, 2021. DOI 10.1016/j.geoderma.2021.115035. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706121001099>
- JIANG, Z.-P.; LI, Y.-R.; WEI, G.-P.; LIAO, Q.; SU, T.-M.; MENG, Y.-C.; ZHANG, H.-Y.; LU, C.-Y. Effect of Long-Term Vinasse Application on Physico-chemical Properties of Sugarcane Field Soils. **Sugar Tech**, v. 14, n. 4, p. 412–417, 2012. <https://doi.org/10.1007/s12355-012-0174-9>
- JUNIOR, P. R.; DONAGEMMA, G.; ANDRADE, F.; PASSOS, R.; BALIEIRO, F.; MENDONÇA, E.; RUIZ, H. Can Soil Organic Carbon Pools Indicate the Degradation Levels of Pastures in the Atlantic Forest Biome? **Journal of Agricultural Science**, v. 6, n. 1, p. p84, 2013. <https://doi.org/10.5539/jas.v6n1p84>
- KARLEN, D. L.; MAUSBACH, M. J.; DORAN, J. W.; CLINE, R. G.; HARRIS, R. F.; SCHUMAN, G. E. Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation (A Guest Editorial). **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, n. 1, p. 4–10, 1997. DOI 10.2136/sssaj1997.03615995006100010001x. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/sssaj1997.03615995006100010001>
- KARLEN, D. L.; DITZLER, C. A.; ANDREWS, S. S. Soil quality: why and how? **Geoderma**, The assessment of soil quality. v. 114, n. 3, p. 145–156, 1 jun. 2003. DOI 10.1016/S0016-7061(03)00039-9. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706103000399>
- KAVDIR, Y.; SMUCKER, A. Soil aggregate sequestration of cover crop root and shoot-derived nitrogen. **Plant and Soil**, v. 272, p. 263–276, 2005. <https://doi.org/10.1007/s11104-004-5294>
- KELLER, T.; COLOMBI, T.; RUIZ, S.; MANALILI, M. P.; REK, J.; STADELMANN, V.; WUNDERLI, H.; BREITENSTEIN, D.; REISER, R.; OBERHOLZER, H.; SCHYMANSKI, S.; ROMERO-RUIZ, A.; LINDE, N.; WEISSKOPF, P.; WALTER, A.; OR, D. Long-Term Soil Structure Observatory for Monitoring Post-Compaction Evolution of Soil Structure. **Vadose Zone Journal**, v. 16, n. 4, p. vzj2016.11.0118, 2017. <https://doi.org/10.2136/vzj2016.11.0118>
- LEOPIZZI, S.; GONDRET, K.; BOIVIN, P. Spatial variability and sampling requirements of the visual evaluation of soil structure in cropped fields. **Geoderma**, v. 314, p. 58–62, 15 mar. 2018. DOI 10.1016/j.geoderma.2017.11.003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706117310042>
- LIER, Q. de J. van; LIBARDI, P. L. Variabilidade Dos Parâmetros Da Equação Que Relaciona a Condutividade Hidráulica Com a Umidade Do Solo No Método Do Perfil Instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 4, p. 1005–1014, 1999. <https://doi.org/10.1590/S0100-06831999000400028>
- LISBOA, C. C.; BUTTERBACH-BAHL, K.; MAUDER, M.; KIESE, R. Bioethanol production from sugarcane and emissions of greenhouse gases – known and unknowns. **GCB Bioenergy**, v. 3, n. 4, p. 277–292, 2011. <https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2011.01095>

- MARTÍNI, A. F.; VALANI, G. P.; BOSCHI, R. S.; BOVI, R. C.; SIMÕES DA SILVA, L. F.; COOPER, M. Is soil quality a concern in sugarcane cultivation? A bibliometric review. **Soil and Tillage Research**, v. 204, p. 104751, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104751>
- MEDEIROS, B. M. **Atualização Da Classificação Do Mapa De Solos Da Paraíba**. 38 f. Monografia (Graduação em agronomia) – Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2018.
- MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT (PROGRAM) (Org.). **Ecosystems and human well-being: synthesis**. Washington, DC: Island Press, 2005.
- MUELLER, L.; KAY, B. D.; DEEN, B.; HU, C.; ZHANG, Y.; WOLFF, M.; EULENSTEIN, F.; SCHINDLER, U. Visual assessment of soil structure: Part II. Implications of tillage, rotation and traffic on sites in Canada, China and Germany. **Soil and Tillage Research**, v. 103, n. 1, p. 188–196, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.09.010>
- MUELLER, L.; KAY, B. D.; HU, C.; LI, Y.; SCHINDLER, U.; BEHRENDT, A.; SHEPHERD, T. G.; BALL, B. C. Visual assessment of soil structure: Evaluation of methodologies on sites in Canada, China and Germany: Part I: Comparing visual methods and linking them with soil physical data and grain yield of cereals. **Soil and Tillage Research**, v. 103, n. 1, p. 178–187, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.12.015>
- MUELLER, L.; SHEPHERD, G.; SCHINDLER, U.; BALL, B. C.; MUNKHOLM, L. J.; HENNINGS, V.; SMOLENTSEVA, E.; RUKHOVIC, O.; LUKIN, S.; HU, C. Evaluation of soil structure in the framework of an overall soil quality rating. **Soil and Tillage Research**, Special issue: Applications of Visual Soil Evaluation. v. 127, p. 74–84, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.03.002>
- MUTUKU, E. A.; VANLAUWE, B.; ROOBROECK, D.; BOECKX, P.; CORNELIS, W. M. Visual soil examination and evaluation in the sub-humid and semi-arid regions of Kenya. **Soil and Tillage Research**, v. 213, p. 105135, 2021. DOI 10.1016/j.still.2021.105135. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198721002087>
- NAWAZ, M. F.; BOURRIÉ, G.; TROLARD, F. Soil compaction impact and modelling. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 33, n. 2, p. 291–309, 2013. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0071-8>
- NIMMO, J.R.; PERKINGS, K.S. Aggregate stability and size distribution. In: DANE, J.H.; TOPP, G.C. **Methods of Soil Analysis. Part 4: Physical Methods**. **Soil Science Society of American Book Series**. v. 5, p. 812-815, 2002.
- NORTCLIFF, S. Standardisation of soil quality attributes. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Soil Health as an Indicator of Sustainable Management. v. 88, n. 2, p. 161–168, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00253-5](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00253-5)
- NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, CORTEZ, J. W.; OLSZEWSKI, N.; PIMENTA, W. A.; PATROCÍNIO FILHO, A. P.; SOUZA, E. B. de; NAGAHAMA, H. de J. Avaliação da intensidade de tráfego de tratores em alguns atributos físicos de um argissolo amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 1000–1010, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000300032>

- OERTEL, C.; MATSCHULLAT, J.; ZURBA, K.; ZIMMERMANN, F.; ERASMI, S. Greenhouse gas emissions from soils—A review. **Geochemistry**, v. 76, n. 3, p. 327–352, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2016.04.002>
- OLIVEIRA, V. S.; ROLIM, M. M.; VASCONCELOS, R. F. B.; COSTA, Y. D. J.; PEDROSA, E. M. R. Compactação de um argissolo amarelo distrocoeso submetido a diferentes manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, p. 914–920, 2010. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000900002>
- OLIVEIRA, V. S.; ROLIM, M. M.; VASCONCELOS, R. F. B.; PEDROSA, E. M. R. Distribuição de agregados e carbono orgânico em um Argissolo Amarelo distrocoeso em diferentes manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, p. 907–913, 2010. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000900001>
- OTTO, R.; SILVA, A. P.; FRANCO, H. C. J.; OLIVEIRA, E. C. A.; TRIVELIN, P. C. O. High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. **Soil and Tillage Research**, v. 117, p. 201–210, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.10.005>
- PAULINO, J.; ZOLIN, C. A.; BERTONHA, A.; FREITAS, P. S. L.; FOLEGATTI, M. V. Estudo exploratório do uso da vinhaça ao longo do tempo: II. Características da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, p. 244–249, 2011. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000300004>
- PAULINO, M. K. S. S.; SOUZA, E. R. de; LINS, C. M. T.; DOURADO, P. R. M.; LEAL, L. Y. de C.; MONTEIRO, D. R.; REGO JUNIOR, F. E. de A.; SILVA, C. U. de C. Influence of vesicular trichomes of *Atriplex nummularia* on photosynthesis, osmotic adjustment, cell wall elasticity and enzymatic activity. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 155, p. 177–186, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.07.036>
- PEERLKAMP, P.K., 1959. A visual method of soil structure evaluation. In: Meded, v.d. (Ed.), Land bou whoge school en Opzoekings stations van de. Staat te Gent, XXIV No. 24, pp. 216 221.
- POLANÍA-HINCAPIÉ, K. L.; OLAYA-MONTES, A.; CHERUBIN, M. R.; HERRERA-VALENCIA, W.; ORTIZ-MOREA, F. A.; SILVA-OLAYA, A. M. Soil physical quality responses to silvopastoral implementation in Colombian Amazon. **Geoderma**, v. 386, p. 114900, 2021. DOI 10.1016/j.geoderma.2020.114900. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706120326550>
- PRADO, R. de M.; CAIONE, G.; CAMPOS, C. N. S. Filter Cake and Vinasse as Fertilizers Contributing to Conservation Agriculture. **Applied and Environmental Soil Science**, v. 2013, p. e581984, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/581984>
- PREVEDELLO, C.L.; ARMINDO, R. A. Física do solo com problemas resolvidos - 2ª Edição revisada e ampliada. Curitiba: C. L. Prevedello, 2015. 474p. ISBN: 8590757420.
- R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. Fertilidade do solo. Viçosa: RABOT, E.; WIESMEIER, M.; SCHLÜTER, S.; VOGEL, H.-J. Soil structure as an indicator of soil functions: A review. **Geoderma**, v. 314, p. 122–137, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009>

RABOT, E.; WIESMEIER, M.; SCHLÜTER, S.; VOGEL, H.-J. Soil structure as an indicator of soil functions: A review. **Geoderma**, v. 314, p. 122–137, 2018. DOI 10.1016/j.geoderma.2017.11.009. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706117310273>

RICHARDS, L.A. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. United States Salinity Laboratory Staff, Washington, 1954.

ROCKSTRÖM, J.; KARLBERG, L.; WANI, S. P.; BARRON, J.; HATIBU, N.; OWEIS, T.; BRUGGEMAN, A.; FARAHANI, J.; QIANG, Z. Managing water in rainfed agriculture—The need for a paradigm shift. **Agricultural Water Management**, Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture. v. 97, n. 4, p. 543–550, 2010.

<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.09.009>

ROMERO-RUIZ, A.; LINDE, N.; KELLER, T.; OR, D. A Review of Geophysical Methods for Soil Structure Characterization. **Reviews of Geophysics**, v. 56, n. 4, p. 672–697, 2018.

<https://doi.org/10.1029/2018RG000611>

ROQUE, A. A. de O.; SOUZA, Z. M. de; BARBOSA, R. S.; SOUZA, G. S. de. Controle de tráfego agrícola e atributos físicos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, p. 744–750, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2010000700016>

ROSSETTI, K. de V.; CENTURION, J. F. Sistemas de manejo e atributos físico-hídricos de um Latossolo Vermelho cultivado com milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, p. 472–479, 2013. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000500002>

RULLI, M. M.; VILLEGAS, L. B.; COLIN, V. L. Treatment of sugarcane vinasse using an autochthonous fungus from the northwest of Argentina and its potential application in fertigation practices. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 8, n. 5, p. 104371, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104371>

SANTOS, H. V.; SCOTTI, M. R. Riparian reforestation with a single exotic species restores soil aggregation and porosity but not humic substances. **Soil Use and Management**, v. 34, n. 1, p. 124–133, 2018. <https://doi.org/10.1111/sum.12405>

SATTOLO, T. M. S.; PEREIRA, L. M.; OTTO, R.; FRANCISCO, E.; DUARTE, A. P.; KAPPES, C.; PROCHNOW, L. I.; CHERUBIN, M. R. Effects of land use, tillage management, and crop diversification on soil physical quality in Cerrado agricultural systems. **Soil Science Society of America Journal**, v. 85, n. 5, p. 1799–1813, 2021.

<https://doi.org/10.1002/saj2.20306>

SHEPHERD, T.G., 2000. Visual Soil Assessment, **Field Guide for Cropping and Pastoral Grazing on Flat to Rolling Country**, vol. 1. Horizons.mw/Landcare Research, Palmerston North, pp. 84 pp. Regional Council; New Zealand; Ministry for the Environment. **Field guide for cropping and pastoral grazing on flat to rolling country**. Palmerston North, N.Z.: Horizons.mw: Landcare Research, 2000.

SHEPHERD, T.G., 2009. Visual Soil Assessment, **Field Guide for Cropping and Pastoral Grazing on Flat to Rolling Country**, vol. 1. Horizons Regional Council, Palmerston North, pp. 119 pp.

- SILVA, A. J. N. da; CABEDA, M. S. V.; CARVALHO, F. G. de. 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, p. 579–585, 2006. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662006000300007>
- SIMS, J. T.; CUNNINGHAM, S. D.; SUMNER, M. E. Assessing Soil Quality for Environmental Purposes: Roles and Challenges for Soil Scientists. **Journal of Environmental Quality**, v. 26, n. 1, p. 20–25, 1997. <https://doi.org/10.2134/jeq1997.00472425002600010004>
- SOUZA, C. B. de; SILVA, B. B. da; AZEVEDO, P. V. de. Crescimento e rendimento do abacaxizeiro nas condições climáticas dos Tabuleiros Costeiros do Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, p. 134–141, 2007. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662007000200002>
- SOUZA, G. S. de; SOUZA, Z. M. de; SILVA, R. B. da; ARAÚJO, F. S.; BARBOSA, R. S. Compressibilidade do solo e sistema radicular da cana-de-açúcar em manejo com e sem controle de tráfego. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, p. 603–612, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2012000400017>
- SURENDRAN, U.; RAMESH, V.; JAYAKUMAR, M.; MARIMUTHU, S.; SRIDEVI, G. Improved sugarcane productivity with tillage and trash management practices in semi arid tropical agro ecosystem in India. **Soil and Tillage Research**, v. 158, p. 10–21, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.10.009>
- SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; LIMA, C. L. R. de. Estimativa da susceptibilidade à compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 963–973, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000300006>
- TAVARES FILHO, J.; FELTRAN, C. T. M.; OLIVEIRA, J. F. de; ALMEIDA, E. de; GUIMARÃES, M. de F. Atributos de solo determinantes para a estimativa do índice de estabilidade de agregados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, p. 436–441, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2012000300016>
- TEIXEIRA, P.C; DONAGEMMA, G.K; FONTANA, A; TEIXEIRA, W.G. **Manual de métodos de análise de solo**. Brasília, 3. ed. rev. e ampl. Embrapa, 2017.
- TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, v. 33, n. 2, p. 141–163, 1982. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x>
- TUCHTENHAGEN, I. K.; LIMA, C. L. R. de; BAMBERG, A. L.; GUIMARÃES, R. M. L.; MANSONIA, P.-M. Visual Evaluation of the Soil Structure under Different Management Systems in Lowlands in Southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, 2018. <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20170270>
- VEZZANI, F.M. & MIELNICZUK, J. **O solo como sistema**. Curitiba, 2011. 104p.

VIANA, E. T.; BATISTA, M. A.; TORMENA, C. A.; COSTA, A. C. S. da; INOUE, T. T. Atributos físicos e carbono orgânico em latossolo vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 2105–2114, 2011.

<https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000600025>

VICENTE, T. F. da S.; PEDROSA, E. M. R.; ROLIM, M. M.; OLIVEIRA, V. S.; OLIVEIRA, A. K. S.; SOUZA, A. M. P. L. Relações de atributos do solo e estabilidade de agregados em canaviais com e sem vinhaça. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, p. 1215–1222, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012001100010>

WILLIAMS, N. D.; PETTICREW, E. L. Aggregate stability in organically and conventionally farmed soils. **Soil Use and Management**, v. 25, n. 3, p. 284–292, 2009.

<https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2009.00223.x>

ANEXO A – Análise química da vinhaça aplicada nas áreas de estudo

RELATÓRIO DE ENSAIO AGRONÔMICO:
VINHAÇA

SOLICITANTE	MIRIRI ALIMENTOS E BIOENERGIA S.A.	DATA ENTRADA	13/10/2021
PROPRIETÁRIO	MIRIRI ALIMENTOS DE BIOENERGIA S/A	DATA SAÍDA	26/10/2021
PROPRIEDADE	***		
MUNICÍPIO/UF	NÃO INFORMADO-PR	ID AMOSTRA	02 / VINHAÇA DO CANAL DE IRRIGAÇÃO / 29/09/2021
		CÓD.LAB.	51647/329178

CARACTERIZAÇÃO AGRONÔMICA

		DETERMINAÇÃO	mg/L
pH		P	Fósforo Total
	4,23		26,79
DETERMINAÇÃO		mg/L	
N-NO ₃ ⁻	Nitrogênio Nitrato	K	Potássio Total
	0,00		405,70
N-NO ₂ ⁻	Nitrogênio Nitrito	Ca	Cálcio Total
	N.D.		56,71
N-NH ₄ ⁺	Nitrogênio Amoniacal	Na	Sódio Total
	1,18		27,04
N	Nitrogênio Total	SO ₄ ²⁻	Sulfato Total
	73,64		218,85
		Cl ⁻	Cloreto
			294,03

FÍSICO-QUÍMICA

DETERMINAÇÃO	mg CaCO ₃ /L	DETERMINAÇÃO	mS/cm
Dureza	***	CE	Condutividade Elétrica

CONTAMINANTES

DETERMINAÇÃO	mg/L	DETERMINAÇÃO	mg/L
Al	Alumínio Total	Cr	Cromo Total
	***		***
Cd	Cádmio Total	Hg	Mercúrio Total
	***		***
Co	Cobalto Total	Pb	Chumbo Total
	***		***

NUTRIENTES

DETERMINAÇÃO	mg/L	DETERMINAÇÃO	mg/L
B	Boro Total	Mo	Molibdênio Total
	N.D.		N.D.
Cu	Cobre Total	Ni	Níquel Total
	N.D.		0,01
Fe	Ferro Total	Se	Selênio Total
	9,19		N.D.
Mn	Manganês Total	Si	Silício Total
	0,79		7,91
Mg	Magnésio Total	Zn	Zinco Total
	47,13		N.D.

CARACTERIZAÇÃO AGRONÔMICA REALIZADA DE ACORDO COM A NORMA CETESB P. 4.231

OBS. ESTE RELATÓRIO REPRESENTA A AMOSTRA ENTREGUE AO LABORATÓRIO E IDENTIFICADA PELO INTERESSADO.

 N.D. NÃO DETECTADO. *** ENSAIO NÃO SOLICITADO.

 Alexandre Durães

 Gerente Técnico

 Juliane Araújo

 Gerente da Qualidade

 Carlos Eduardo de C. Almeida

 Eng.º Agrônomo | CREA-PR 127660/D