

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP  
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**INDICADORES DE QUALIDADE DE ARGISSOLO  
SUBMETIDO À ESCARIFICAÇÃO EM ÁREA MECANIZADA  
DE CANA-DE-AÇÚCAR**

**Daniel Pereira Pinheiro**

Engenheiro Agrônomo

**2018**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP  
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**INDICADORES DE QUALIDADE DE ARGISSOLO  
SUBMETIDO À ESCARIFICAÇÃO EM ÁREA MECANIZADA  
DE CANA-DE-AÇÚCAR**

**Daniel Pereira Pinheiro**

**Orientadora: Profa. Dra. Carolina Fernandes**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Agronomia (Ciência do Solo).

**2018**

Pinheiro, Daniel Pereira  
P654i      Indicadores da qualidade de Argissolo submetido à escarificação  
em área mecanizada de cana-de-açúcar / Daniel Pereira Pinheiro. --  
Jaboticabal, 2018  
xv, 47 p. : il. ; 29 cm

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de  
Ciências Agrárias e Veterinárias, 2018  
Orientadora: Carolina Fernandes  
Banca examinadora: Maria Helena Moraes Spinelli, Antonio Sergio  
Ferraud, Lucieta Guerreiro Martorano, Miguel Angelo Mutton  
Bibliografia

1. Agricultura. 2. *Saccharum* spp. 3. Preparo do solo. I. Título. II.  
Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.4:633.61

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação – Diretoria  
Técnica de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Jaboticabal.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: INDICADORES DE QUALIDADE DE ARGISSOLO SUBMETIDO À ESCARIFICAÇÃO EM ÁREA MECANIZADA DE CANA-DE-AÇÚCAR

AUTOR: DANIEL PEREIRA PINHEIRO

ORIENTADORA: CAROLINA FERNANDES

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA (CIÊNCIA DO SOLO), pela Comissão Examinadora:



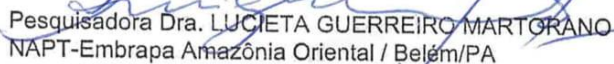
Profa. Dra. CAROLINA FERNANDES  
Departamento de Solos e Adubos / FCAV / UNESP - Jaboticabal



Profa. Dra. MARIA HELENA MORAES SPINELLI  
Depto de Solos e Recursos Ambientais-FCA / Botucatu, SP



Prof. Dr. ANTONIO SERGIO FERRAUDO  
Vice-Diretoria / FCAV / UNESP - Jaboticabal



Pesquisadora Dra. LUCIETA GUERREIRO MARTORANO  
NAPT-Embrapa Amazônia Oriental / Belém/PA



Prof. Dr. MIGUEL ANGELO MUTTON  
Departamento de Produção Vegetal / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Jaboticabal, 11 de julho de 2018

## **DADOS CURRICULARES DO AUTOR**

**DANIEL PEREIRA PINHEIRO** - Filho de Durval Pinheiro Filho e Maria José Pereira Pinheiro nasceu em Belém, Pará, em 09 de novembro de 1984. Concluiu o ensino médio em dezembro 2002. Prestou vestibular para Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA) na mesma época, e ingressou no curso de graduação em Engenharia Agrônômica em abril de 2003. Durante a graduação foi bolsista de iniciação científica na Embrapa Amazônia Oriental e monitor da disciplina de Levantamento e Conservação do Solo na UFRA. Exerceu cargo de liderança como diretor da Empresa de Consultoria de Agrária e Ambiental Junior. Em novembro de 2007 concluiu o curso, recebendo o título de Engenheiro Agrônomo. Em março de 2008 iniciou seu curso de Mestrado em Agronomia (Solos e Nutrição de Plantas) na UFRA, com obtenção do título de Mestre em abril de 2010. Em novembro de 2010, após aprovação em concurso público ingressou como professor efetivo na área de Ciência do Solo na UFRA, tendo em agosto de 2014 a liberação para cursar o Doutorado em Agronomia (Ciência do Solo), na Faculdade de Ciências Agrárias em Veterinárias (FCAV-UNESP), Câmpus de Jaboticabal, SP. Em julho de 2018 obteve o título de Doutor de Agronomia (Ciência do Solo) após ser aprovado pela banca examinadora da tese de doutorado.

Amem a verdade e seus frutos de vida, por si próprios  
e pelos outros; consagrem ao estudo e a seu uso a  
maior parte de seu tempo e de seu coração.

*Padre Antonín Dalmace Sertillanges*

Ao Divino Espírito Santo, que emana seus dons de  
fortaleza, entendimento, ciência, conselho, piedade  
e temor a Deus.

### **AGRADEÇO**

Aos meus pais, Durval Pinheiro Filho e Maria José  
Pereira Pinheiro pela plenitude do amor que me foi  
dado, e a entrega total de suas vidas à minha  
criação e formação.

### **OFEREÇO E DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

À Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV-UNESP), Câmpus de Jaboticabal, SP, e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo) pelas excelentes oportunidades de crescimento científico e pessoal durante a realização do curso de Doutorado, conhecimentos que levarei para o resto de minha vida.

À Universidade Federal Rural da Amazônia pelo afastamento integral nas minhas atividades como docente, que foram decisivos e fundamentais nessa oportunidade de ampliar os conhecimentos com o curso de Doutorado na FCAV-UNESP.

À minha orientadora Profa. Dra. Carolina Fernandes pela sua inestimável contribuição na minha formação profissional, e pelo seu zelo à pesquisa e ao patrimônio público, esmero que levarei como substância em minha vida.

Aos professores e professoras das disciplinas cursadas durante o curso de Doutorado.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo auxílio financeiro para a condução da pesquisa (processo nº 2014/14490-2).

À Usina São Martinho, por disponibilizar a área experimental e maquinários para a realização no estudo, e as equipes de funcionários que auxiliaram na etapa de coleta do solo.

Aos amigos do Grupo de Pesquisa em Física do Solo (GPFiS), Francisco Carlos, Camila Silva, Nilvan Melo, Luma Souza, Deise Nogueira, Matheus Silva, Mariele Fernandes, Edson Júnior, Bruno Mazon e Ludmila Magalhães.

À minha namorada Grenda Hingrid Alcântara, por sua docilidade, ternura, paciência e companhia nesta importante etapa de minha vida.

Aos amigos, Raphael Leone, Aline Barbosa e Reinaldo Moraes, este último que foi o “trabalhador fervoroso” e “amigo absorto” que Pe. Sertillanges aconselha a ter por perto, “pois se une e compreende a sua obra, não se tratando mais de distração, mas de uma ajuda”.

Aos meus familiares, e especial minhas tias, tios, padrinho e madrinha.

Aos funcionários do Departamento de Solos e Adubos, Claudinha, Mauro, Aauto e Gibson.

Aos meus amigos Frei Eraldo, Dr. Eduardo Lima e Dra. Patrícia Leitão Lima por suas palavras de incentivo e orações.

Às instituições de ensino: Instituto Lauro Sodré, Escola Armando Fajardo e Colégio Salesiano do Carmo pela minha formação escolar no ensino fundamental e médio.

E finalmente agradeço a todos os meus professores, desde a terna infância até o presente momento, que dedicaram suas vidas como seres consagrados na verdade do ensinamento.

Agradeço!



**SUMÁRIO**

	<b>Página</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>x</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xi</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS</b> .....	<b>xii</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>xiii</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>xv</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>3</b>
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>11</b>
3.1 Caracterização da área de estudo .....	11
3.2 Delineamento experimental e condução do experimento .....	14
3.3 Amostragem e determinação dos atributos físicos do solo .....	15
3.4 Colheita da cana-de-açúcar e determinação de produtividade de colmos .....	16
3.5 Análise fatorial multivariada .....	16
3.6 Índice de qualidade física do solo .....	17
3.7 Análise estatística das variáveis latentes, índice de qualidade física do solo e produtividade de colmos de cana-de-açúcar .....	18
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>19</b>
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	<b>37</b>
<b>6 REFERÊNCIAS</b> .....	<b>37</b>

## INDICADORES DE QUALIDADE DE ARGISSOLO SUBMETIDO À ESCARIFICAÇÃO EM ÁREA MECANIZADA DE CANA-DE-AÇÚCAR

**RESUMO** – A escarificação somente na linha de plantio é um tipo de preparo mínimo do solo que vem sendo utilizado na reforma de canaviais, e o seu impacto sobre a qualidade física do solo necessita ser avaliado. O objetivo neste trabalho foi avaliar a qualidade física de Argissolo, submetido à escarificação para o plantio de cana-de-açúcar. Os tratamentos avaliados foram: escarificação do solo somente na linha de plantio (ELP) e escarificação em área total (EAT). O experimento foi realizado no município de Monte Alto, SP, próximos as coordenadas 21° 15' S e 48° 25' W, altitude média 735 m. Foram avaliadas quatro épocas de amostragem: após o preparo do solo com escarificação, após o plantio da cana-de-açúcar, seis meses após o plantio e após a colheita mecanizada da cana-de-açúcar. Amostras de solo foram coletadas nas camadas de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m de profundidade em dois locais de amostragem (linha e entrelinha de plantio). Determinaram-se os teores de areia, silte e argila, e os atributos físicos: densidade do solo (Ds), resistência mecânica à penetração (RP), macroporosidade (MaP), microporosidade (MiP). A partir do conjunto de dados obtidos, realizou-se uma análise fatorial multivariada com extração dos fatores pelo método da análise de componentes principais. Dois fatores foram extraídos e explicaram 76% da variação total. O primeiro fator, responsável por 44 % da variância total pôde ser interpretado como a resposta da formação de microporosidade do solo influenciada pela natureza textural, uma vez que, as variáveis relevantes neste fator foram MiP, areia e argila. Esse fator representou o indicador intrínseco do solo. O segundo fator, responsável por 32 % da variância remanescente pôde ser interpretado como a resposta do processo de alteração na relação massa-volume do solo, uma vez que, as variáveis relevantes nesse fator foram MaP, Ds e RP. Esse fator remanescente, representou o indicador do manejo do solo. Após a extração dos fatores, com base nos valores de escores fatoriais obtidos, determinou-se um índice de qualidade física do solo (IQFS) que, conjuntamente com os dois fatores extraídos, auxiliaram na avaliação da qualidade física do solo. Após o preparo da área, as linhas de plantio submetidas à escarificação apresentaram qualidade física melhor que as entrelinhas de cultivo, em função do maior volume de poros e menor RP e Ds. Porém, o efeito benéfico da escarificação do solo não foi persistente em função do fenômeno da reconsolidação do solo, desaparecendo logo após o plantio e estendendo-se após a colheita da cana-de-açúcar, cujas linhas e entrelinhas de cultivo apresentaram qualidade física do solo semelhante para as duas áreas avaliadas.

**Palavras-chave:** agricultura, *Saccharum* spp., preparo do solo, preparo mínimo, atributos físicos do solo.

## SOIL QUALITY INDICATORS IN AN ULTISOL SUBJECTED TO CHISELING IN A SUGARCANE CROP UNDER MECHANIZED MANAGEMENT

**ABSTRACT** – Soil chiseling conducted only in the planting row is a type of minimal-disturbance soil management practice to prepare fields for planting of sugarcane plantations, and its impact on soil physical quality needs to be evaluated through agricultural experimentation. The objective of this study was to evaluate the physical quality of an Ultisol that was submitted to chiseling as part of sugarcane plantation management. The treatments consisted of soil chiseling only in the planting row (CPR), and chiseling in the total area of the soil of the plantation (CTA). The experiment was carried in Monte Alto, SP, near the coordinates 21° 15 'S and 48° 25' W, average altitude 735 m. Four sampling periods were evaluated. Four periods were evaluated: after soil chiseling, after sugarcane planting, six months after planting, and after mechanized sugarcane harvest. Soil samples were collected within and between planting rows in depths 0.00-0.10, 0.10-0.20, 0.20-0.40, and 0.40-0.60 m. Soil texture was determined along with the following soil physical indicators: bulk density (BD), mechanical penetration resistance (PR), total porosity (TP), macroporosity (MaP), microporosity (MiP). A multivariate factorial analysis was conducted with factor extraction done by the method of principal components analysis. Two extracted factors explained 76% of the total variation. The first factor responsible for 44% of the total variance could be interpreted as the response of soil microporosity formation influenced by the textural nature, since the relevant variables in this factor were MiP, sand and clay. This factor represented the soil intrinsic indicator. The second factor, responsible for 32% of the remaining variance, could be interpreted as the response of the alteration process in the soil mass-volume relationship, since the relevant variables in this factor were MaP, Ds and RP. This remaining factor represented the indicator of soil management.. After factor extraction and using the factorial scores, the index of soil physical quality was determined (SQI), which, together with two factor, aided in the evaluation of soil physical quality. After soil preparation, the planting rows that were submitted to chiseling had better soil physical quality than did the area between the rows that did not receive chiseling in site preparation due to greater pore volume and lower PR and BD. However, the beneficial effect of chiseling did not persist due to subsequent soil reconsolidation, and disappeared soon after the planting of sugarcane, and remained this way up to the post-harvest period wherein the areas within (CPR) and between (CTA) the planting rows had equal soil physical quality.

**Keywords:** agriculture, *Saccharum* spp., soil tillage, minimum tillage, soil physical properties.

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

- CO** – Carbono orgânico  
**DMP** – Diâmetro médio ponderado  
**Ds** – Densidade do solo  
**EAT** – Escarificação em área total.  
**ELP** – Escarificação na linha de plantio  
**IEA** – Índice de estabilidade de agregados  
**IQFS** – Índice de qualidade física do solo  
**MaP** – Macroporosidade  
**MiP** – Microporosidade  
**RP** – Resistência mecânica à penetração

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Página</b>
<b>Figura 1.</b> Mapa de localização da área experimental. Imagem de satélite da área experimental retirada do Google Earth .....	11
<b>Figura 2.</b> Balanço hídrico da região de Monte Alto, SP. Fonte: Dados da estação meteorológica da Usina São Martinho .....	12
<b>Figura 3.</b> Precipitação pluvial (mm) da área experimental no período de 15/02/2015 a 14/04/2015 .....	13
<b>Figura 4.</b> Escarificadores utilizados no preparo mínimo do solo. (a) – escarificador utilizado na escarificação na linha de plantio; e (b) – escarificador utilizado na escarificação em área total. ....	14
<b>Figura 5.</b> Gráfico das cargas fatoriais extraídas por componentes principais do Fator 1 (F1) e Fator 2 (F2) para os atributos areia, argila, microporosidade (MiP), macroporosidade (MaP), resistência (RP) e densidade do solo (Ds) .....	24
<b>Figura 6.</b> Desdobramento da interação escarificação x local de amostragem para F1 (escore fatorial) na camada de 0,00-0,10 m de profundidade do Argissolo avaliado em quatro épocas de amostragem. ....	27
<b>Figura 7.</b> Desdobramento da interação escarificação x local de amostragem para F2 (escore fatorial) nas camadas de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m de profundidade do Argissolo, avaliado em quatro épocas de amostragem .....	30
<b>Figura 8.</b> Desdobramento da interação escarificação x local de amostragem para índice de qualidade física do solo (IQFS) nas camadas de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m de profundidade do Argissolo avaliado em quatro épocas de amostragem .....	34
<b>Figura 9.</b> Produtividade de colmos de cana-de-açúcar ( $t\ ha^{-1}$ ) em Argissolo submetido a escarificação na linha de plantio (ELP) e escarificação em área total (EAT) .....	35

## LISTA DE TABELAS

### Página

<b>Tabela 1.</b> Média dos atributos argila, areia, silte e carbono orgânico (CO) nas camadas de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m nas linhas e entrelinhas de cultivo de Argissolo cultivado com cana-de-açúcar, submetido à escarificação na linha de plantio e escarificação em área total .....	13
<b>Tabela 2.</b> Porcentagem de areia nos diâmetros equivalentes a 2-1 mm, 1-0,5 mm, 0,5-0,25 mm, 0,25-0,125 mm e 0,125-0,05 mm nas camadas de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m de profundidade do Argissolo .....	13
<b>Tabela 3.</b> Média $\pm$ desvio padrão dos atributos, resistência mecânica à penetração (RP) e densidade do solo (Ds) em quatro épocas de amostragem nas camadas de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m de profundidade nas linhas e entrelinhas de cultivo do Argissolo cultivado com cana-de-açúcar, submetido à escarificação na linha de plantio e escarificação em área total .....	20
<b>Tabela 4.</b> Média $\pm$ desvio padrão dos atributos, macroporosidade (MaP) e microporosidade (MiP) em quatro épocas de amostragem nas camadas de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m de profundidade nas linhas e entrelinhas de cultivo do Argissolo cultivado com cana-de-açúcar, submetido à escarificação na linha de plantio e escarificação em área total. ....	21
<b>Tabela 5.</b> Média $\pm$ desvio padrão dos atributos, índice de estabilidade de agregados (IEA) e diâmetro médio ponderado (DMP) em quatro épocas de amostragem nas camadas de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m de profundidade nas linhas e entrelinhas de cultivo do Argissolo cultivado com cana-de-açúcar, submetido à escarificação na linha de plantio e escarificação em área total .....	22
<b>Tabela 6.</b> Matriz de correlação de Pearson dos atributos físicos de Argissolo cultivado com cana-de-açúcar, submetido a escarificação do solo na linha de plantio e em área total (N= 640 amostras) .....	23

<b>Tabela 7.</b> Cargas fatoriais dos fatores extraídos a partir dos seis atributos físicos do solo analisados, autovalor e percentagem da variância explicada .....	23
<b>Tabela 8.</b> Valores do teste F da análise de variância para interação escarificação x local de amostragem das variáveis Fator 1 (F1), Fator 2 (F2) e índice de qualidade física do solo (IQFS) .....	26

## 1 INTRODUÇÃO

O aumento na demanda por alimentos, energia e fibras para os próximos anos, principalmente em países em desenvolvimento deverá cada vez mais ser atendido pelo incremento da produtividade agrícola. O crescimento econômico acompanha o poder de consumo *per capita*, mas todo esse uso deve ser de forma eficiente e eficaz para garantir a sustentabilidade dos recursos naturais visando a manutenção dos bens e serviços ecossistêmicos, pois cada vez mais reduzem-se as áreas de expansão agrícola no planeta Terra.

O aumento populacional, na zona urbana, é um fenômeno que acompanha o processo de crescimento demográfico e impulsiona o consumo de alimentos industrializados, entre eles, os produtos que utilizam como ingrediente o açúcar (OECD/FAO, 2017). Junto a isso, o aumento na frota de veículos nas grandes cidades impõem maior consumo de combustíveis. E o etanol, atualmente, tem sido utilizado como principal biocombustível misturado ou não à gasolina, principalmente no Brasil, que adota uma política obrigatória de adição de etanol à gasolina (Brasil, 2015).

No que se refere à produção de açúcar no país, a principal matéria-prima utilizada para esse fim é oriunda de cultivos de cana-de-açúcar. Além do açúcar, produzido a partir da cana-de-açúcar nas usinas brasileiras, também este se destina à produção de etanol, com incentivo desde 1975, do Programa Nacional do Álcool (Proálcool).

Após sucessivos ciclos de incentivos econômicos para o setor sucroenergético e o enfrentamento de crises econômicas nacionais e internacionais, entre os anos de 1970 até o ano 2000, o setor sucroenergético recebeu novos investimentos privados para a modernização do parque industrial e aumento da produção de cana-de-açúcar. A partir dos anos 2000, a utilização do etanol como biocombustível atraiu a atenção do mercado internacional, influenciado pela menor dependência de petróleo e pelas preocupações ambientais globais, perante a necessidade de redução da emissão de gases do efeito estufa e aquecimento global (FAO, 2017).

No entanto, fatores como a crise econômica mundial, ocorrida em 2008, com limitações de investimentos no setor sucroenergético, reduziu a construção de novas



usinas e o investimento de capital nas unidades existentes. Além disso, problemas climáticos severos que ocorreram nas principais regiões produtoras brasileiras, contribuíram para que ocorresse redução na produtividade de cana-de-açúcar (OECD/FAO, 2015). Aliado a isso, a política de controle de preços de combustíveis adotada pelo governo brasileiro, nos últimos anos, subsidiando o preço da gasolina para conter a inflação crescente, comprometeu a indústria de etanol, que perdeu competitividade devido ao seu preço defasado, promovendo um colapso no setor da indústria do etanol, devido aos subsídios dados à gasolina. Isso ocasionou uma crise generalizada no setor, com endividamento e corte de investimentos. E o principal mecanismo de enfrentamento dessa crise encontrado pelo setor sucroenergético foi diminuir os custos de produção e reduzir as áreas de cultivo que precisavam ser submetidas à renovação do canavial.

Na composição dos custos de produção da cana-de-açúcar, na região Centro-Sul do Brasil, conforme os levantamentos realizados pela Confederação Nacional da Agricultura (CNA) relatam cifras elevadas na renovação do canavial, apontando na safra agrícola 2016/2017 valores na faixa de R\$6.000,00 a R\$ 8.000,00 para cada hectare produzido nessa região, sendo que 33% destinava-se ao preparo do solo (CNA, 2017).

O sistema de preparo do solo, adotado na região Centro-Sul do Brasil, apresenta variabilidade, registrando-se sistemas intensivos, com elevado número de operações e custos financeiros maiores, e sistemas mais conservacionistas, com pouca mobilização do solo e, conseqüentemente, menores custos. Entre os sistemas conservacionistas, destaca-se o preparo mínimo do solo utilizando-se como implemento agrícola o escarificador que, acoplado ao trator, possibilita a escarificação do solo em toda a área de cultivo, sem o revolvimento do solo (Mazurana et al., 2011; Martins-Filho et al., 2015).

Utilizando-se dessa prática, atualmente, algumas empresas do setor sucroenergético no Estado de São Paulo, com o objetivo de redução de custos ainda maiores durante a renovação do canavial, têm realizado o preparo do solo com escarificação onde ocorrerá a abertura do sulco de plantio e o cultivo de cana-de-açúcar. No entanto, nesse sistema de preparo, as entrelinhas de cultivo não são mobilizadas e, continuamente, são submetidas ao tráfego de máquinas e

implementos, principalmente, por ocasião da colheita. Entretanto, isso tem gerado questionamentos em razão da falta de evidência científica que indique se é benéfico para a qualidade física do solo e a produtividade de colmos de cana-de-açúcar.

Portanto, a hipótese desse estudo é que a qualidade do solo, na área submetida à escarificação na linha de plantio, não se diferencia da área submetida à escarificação em área total, resultando em produtividade de colmos de cana-de-açúcar equivalentes.

Este trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar a qualidade física do Argissolo por meio de atributos indicadores da qualidade física do solo, na linha e na entrelinha da cultura, e a produtividade de colmos de cana-de-açúcar em decorrência do preparo do solo com escarificação na linha de plantio e em área total.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é matéria-prima essencial para produção de açúcar e etanol no Brasil. Atualmente, é o principal produtor mundial responsável por uma área cultivada de 10,2 milhões de hectares e produção de 769 milhões de toneladas (FAOSTAT, 2017). Na região Centro-Sul do Brasil, localiza-se o principal complexo produtivo, com uma área de cultivo de aproximadamente 8,13 milhões de hectares, com destaque para o Estado de São Paulo que contribui com 59% da área cultivada no Brasil, o que equivale a 4,77 milhões de hectares (CONAB, 2017).

O cultivo de cana-de-açúcar emprega em todas as fases de produção, desde o preparo do solo até a colheita, a utilização de tratores, implementos agrícolas, colhedoras e veículos de transbordo. Essas máquinas, utilizadas no sistema de produção, exercem pressão sobre o solo, deteriorando a sua estrutura, o que promove condições inadequadas para o crescimento de raízes, transporte e armazenamento de ar e água, com impactos negativos sobre a produtividade do canavial (Martins-Filho et al., 2015).

Em áreas que empregam a colheita mecanizada, o ciclo de cultivo tem duração média de 5 a 6 anos, sendo necessária a renovação do canavial após esse ciclo, devido à baixa produtividade de colmos. Isso ocorre por causa da redução no estande

de plantas influenciado pelo tráfego sobre a soqueira, provocado pela colhedora e o corte de base, que pode ocasionar alguns danos à soqueira, como a remoção de gemas novas, danos ao sistema radicular e a exposição da soqueira ao ataque de pragas e doenças (Voltarelli et al., 2017). Associado a esses fatores, outro importante fator que pode prejudicar a longevidade e produtividade dos canaviais é a compactação do solo resultante do uso de tratores, colhedoras e veículos de transportes que, devido a sua elevada massa, exercem pressão sobre o solo trafegado, ocasionando a degradação física do solo, contribuindo, nos últimos anos, para a baixa produtividade da cana-de-açúcar (Bordonal et al., 2018).

No final do ciclo de cultivo de cana-de-açúcar, em áreas com histórico de colheita mecanizada, vários estudos científicos relatam redução na condição física do solo provocada pelas modificações nos atributos físicos indicadores da qualidade física do solo. Verifica-se nesses estudos que, no final do ciclo de cultivo, ocorrem elevados valores de resistência mecânica à penetração (RP) e densidade do solo (Ds) e, reduzidos valores de macroporosidade (MaP) e porosidade total (Pt) (Camilotti et al., 2005; Centurion et al., 2007; Otto et al., 2011; Lima et al., 2013). No estudo realizado por Torres et al. (2016), avaliando um Latossolo Vermelho textura média cultivado com cana-de-açúcar no sexto corte, os autores observaram valores de Ds na camada de 0,00-0,20 m, variando de 1,68 a 1,75 g cm<sup>3</sup>, e para RP de 3,83 a 5,78 MPa. Associado a isso, esses autores observaram valores de MaP abaixo de 0,10 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, o que poderia limitar a disponibilidade de O<sub>2</sub> para as plantas, pois valores abaixo de 0,10 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> diminuem a taxa de difusão de O<sub>2</sub> no solo (Xu et al., 1992).

No trabalho realizado por Lana et al. (2017), avaliando um Latossolo Vermelho Amarelo (teor de argila = 480 g kg<sup>-1</sup>) cultivado com cana-de-açúcar e no sexto corte, os autores encontraram valores de RP variando de 3,22 a 7,25 MPa entre as camadas de 0,00-0,20 m a 0,20-0,40 m; e essa condição, segundo os autores, relacionou-se com os baixos valores de MaP (0,08 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>) e elevados de Ds (1,40 g cm<sup>-3</sup>). Vischi Filho et al. (2017) verificaram que os valores de Ds na faixa de 1,40 a 1,50 g cm<sup>-3</sup> e a RP entre 2,00 a 3,00 MPa, na camada de 0,00 a 0,30 m de um Latossolo Amarelo e Latossolo Vermelho eutrófico, sob o sexto ano de cultivo de cana-de-açúcar, apresentaram limitações para a movimentação de água e aeração no perfil do solo. Segundo os autores, nessas condições, o solo poderia apresentar impedimento físico

ao crescimento das raízes, comprometendo, posteriormente, a produtividade de colmos de cana-de-açúcar.

Segundo Reichert et al. (2003), quando os valores de  $D_s$  estão no intervalo de 1,30-1,40 g cm<sup>-3</sup> para solos argilosos, e 1,60-1,80 g cm<sup>-3</sup> para solos arenosos a franco-arenosos, há um indicativo de redução da qualidade física do solo, pois esse atributo apresenta relação direta com o aumento da RP e redução do espaço poroso. Materechera et al. (1991) relataram que, quando o valor de RP for maior que 2,0 MPa, o solo pode apresentar limitações para o crescimento das plantas. No entanto, esse valor de RP pode variar em função da espécie vegetal cultivada, a textura do solo e, o conteúdo de água no solo proporcionado pela precipitação pluvial durante o ciclo da cultura, de tal modo que, em condições moderada de compactação e elevado teor de água no solo, os rendimentos das culturas agrícolas podem não ser influenciados negativamente (Girardello et al., 2011).

No entanto, como a RP e  $D_s$  possuem correlações inversas com o volume de poros do solo que, por sua vez, influencia diretamente a infiltração de água no perfil do solo, é verificado que, quanto mais intenso for o tráfego de máquinas sobre a superfície do solo, menor será a infiltração de água, devido à compactação na camada superficial (Soracco et al., 2015). Assim, do ponto de vista da sustentabilidade, aumentam-se os riscos de perdas de solo por erosão associado ao escoamento superficial nas épocas de maior precipitação pluvial, principalmente em solos de maior suscetibilidade, como é caso dos que apresentam gradiente textural, como por exemplo, os Argissolos (Martins-Filho et al., 2009). Esses apresentam diferenciação textural no seu perfil, com o incremento de argila em profundidade, condição pedológica que confere ao solo um horizonte superficial arenoso e, na subsuperfície, horizonte argiloso (Breemen e Buurman, 2002). Assim, quanto à dinâmica da água no perfil do solo, ocorre drenagem rápida, na camada superficial, e lenta em subsuperfície, promovendo maior escoamento superficial de água quanto menor for a espessura do horizonte superficial. Nessa condição, como o horizonte superficial apresenta menor agregação entre as partículas, pela menor participação dos agentes de agregação, tais como argila e matéria orgânica (Six e Paustian, 2014), mais intensa será a erosão pelo arraste das partículas do solo.

Com base nas informações anteriormente relatadas, em que o cultivo mecanizado da cana-de-açúcar influencia diretamente a qualidade física do solo e a produtividade e longevidade dos canaviais, deve-se realizar a renovação do canavial quando este começa a apresentar um declínio acentuado na sua produtividade. Nesse sentido, o preparo do solo é uma das principais operações agrícolas, e o sistema de preparo convencional do solo foi por bastante tempo o principal sistema de preparo utilizado na cultura de cana-de-açúcar.

No preparo convencional do solo, realizam-se sucessivas operações com gradagem pesada, subsolagem, gradagem niveladora e sulcação com objetivo de sistematizar o terreno para o plantio da cana-de-açúcar (Barbieri et al., 1997). Todas essas operações têm por objetivo eliminar a soqueira do cultivo anterior, incorporar os corretivos de acidez do solo, realizar o controle de plantas daninhas e pragas, o rompimento de camadas compactadas e o destorroamento da camada superficial, estabelecendo-se uma condição propícia para a brotação das mudas, em função do maior contato dos toletes de cana-de-açúcar com o solo. Com essas sucessivas operações, pretende-se alcançar uma condição física sem impedimento para o crescimento das raízes, com aumento na drenagem e armazenamento de água e ar no solo, para atender o suprimento necessário para o crescimento e desenvolvimento das plantas (Martins-Filho et al., 2015).

No entanto, com a utilização do sistema de preparo convencional, por mais que em curto prazo ocorra um aumento nos valores de MaP e Pt e redução da RP e Ds (Falleiro et al., 2003; Secco et al., 2005), com o decorrer dos anos de cultivo o que se observa é o efeito inverso, com o preparo convencional promovendo a degradação da qualidade estrutural do solo, devido à redução na agregação, aumento na Ds e RP e redução do espaço poroso (Ros et al., 1997; Camilotti et al., 2005).

Essa redução na qualidade estrutural do solo, provocada pelo preparo convencional, ocorre em consequência da destruição mecânica dos agregados em unidades menores, provocada pela ação cisalhante dos implementos agrícolas sobre as camadas de solo revolvidas (Bronick e Lal, 2005). Com a redução da agregação do solo, ocorre a formação de uma maior quantidade de microagregados devido à quebra mecânica dos macroagregados (Vezzani e Mielniczuk, 2011). Essa condição expõe o carbono do solo que, anteriormente, atuava como agente da agregação

(Tisdall e Oades, 1982; Bronick e Lal, 2005) ao processo de oxidação realizada pela atividade microbiana do solo (Oertel et al., 2016), elevando a produção e fluxo de CO<sub>2</sub> do solo para a atmosfera, conseqüentemente, reduzindo os teores de carbono responsável pela agregação (Scala Júnior et al., 2012). Assim, as partículas do solo desagregadas tendem a se rearranjarem e a orientar-se de tal forma que provocam uma redução no volume de poros, principalmente aqueles com diâmetro maior que 0,05 mm (macroporos), comprometendo o desenvolvimento radicular, a condutividade hidráulica e a aeração do solo (Pires et al., 2017).

Em virtude dos aspectos negativos que o preparo convencional pode impor ao solo, uma alternativa para minimizar os problemas do preparo sobre a qualidade estrutural do solo é o emprego do seu manejo com o preparo mínimo. Esse tipo de preparo é realizado com implementos que não revolvem a camada arável, e se executa com menor frequência e intensidade de operações em comparação ao preparo convencional, sendo esse preparo considerado como um método de manejo conservacionista do solo.

Segundo Kuhwald et al. (2017), o preparo mínimo apresenta como vantagens, o incremento na condutividade hidráulica e infiltração; maior estabilidade de agregados; elevação na macroporosidade e continuidade de poros, que compensam os efeitos negativos do aumento da densidade do solo; redução na suscetibilidade da erosão e perdas de solo por escoamento superficial; manutenção da cobertura do solo com resíduos vegetais; menores custos com a diminuição no uso de máquinas e implementos, combustível e horas trabalhadas. Apesar dessas vantagens, o preparo mínimo traz como desvantagens, a longo prazo, o aumento da densidade do solo na camada superficial, estratificação de nutrientes e matéria orgânica, e aumento na infestação de plantas daninhas.

Diante das vantagens que o preparo mínimo pode promover, esse manejo do solo é adotado frequentemente em cultivos de culturas anuais, tais como, milho e soja em sistema de semeadura direta (Abreu et al., 2004; Costa et al., 2006; Calonego et al., 2017). O preparo mínimo nessa situação é realizado com o objetivo de descompactar as camadas superficiais do solo que se formaram devido à pressão exercida por máquinas e implementos durante os anos de cultivo em semeadura direta

(Rossetti e Centurion, 2015), utilizando-se a escarificação como operação de preparo do solo sem revolvimento (Lozano et al., 2016).

Essa escarificação tem por objetivo romper as camadas compactadas do solo, sem promover a inversão delas. Após a escarificação, espera-se que seja criada uma condição física com elevação no espaço poroso e redução na densidade e resistência mecânica à penetração. Esse aumento no volume de poros permite melhor condição para o crescimento radicular, armazenamento e infiltração de água, e as trocas gasosas na camada de solo submetida à escarificação (Abreu et al., 2004; Nunes et al., 2015).

No estudo do manejo do solo para a cultura da cana-de-açúcar, encontram-se, na literatura científica, alguns trabalhos que relatam o uso da escarificação, como alternativa de manejo para melhorar as condições físicas do solo na entrelinha da soqueira da cana-de-açúcar. Nesse caso, a escarificação é realizada na entrelinha de plantio com o objetivo de propiciar uma melhor condição física ao solo, permitindo, assim, incremento no volume explorado pelas raízes da soqueira. No entanto, esses trabalhos concluem que essa técnica não resulta em aumentos nos rendimentos de colmos de cana-de-açúcar (Paulino et al., 2004; Bangita e Rao, 2012; Garbiate et al., 2016; Sá et al., 2016).

Essa ausência do aumento na produtividade das culturas agrícolas, influenciada pelo preparo do solo com escarificação, sempre foi um objeto de questionamento por pesquisadores e produtores, para que justificasse o uso dessa técnica de preparo do solo (Schneider et al., 2017).

A razão disso, está no fato de que a escarificação do solo apresenta como desvantagens à elevada demanda de potência do motor, requerida para realização da operação, o que elevam os custos com o consumo de combustível. Além disso, o efeito benéfico para o solo é temporário, em alguns casos desaparecendo em apenas um ciclo de cultivo, por causa de fenômenos naturais, tais como a reconsolidação do solo, ação das chuvas que caem sobre ele, os ciclos de umedecimento e secagem, e o tráfego de máquinas e implementos sobre a área de cultivo (FAO, 2000; Busscher et al., 2002; Nicoloso et al., 2008; Drescher et al., 2011; Silva et al., 2012; Reichert et al., 2017).

Nos últimos anos, com a intenção de redução de custo de produção, aliado ao uso de sistemas conservacionistas do solo que substituísse o preparo convencional, na reforma do canavial, tem sido empregado o uso da escarificação como opção de preparo mínimo do solo.

No uso do preparo do solo com escarificação, as áreas com cana-de-açúcar a serem renovadas não devem apresentar limitações químicas, como a acidez elevada e baixos teores de nutrientes que restrinjam o crescimento das raízes. Nessas áreas, a soqueira do cultivo anterior é eliminada quimicamente pelo uso de herbicidas ou destruída pelo eliminador mecânico. Em seguida, realiza-se a escarificação até a profundidade de 0,30 m. Isso promove uma menor desestruturação do solo e manutenção dos resíduos do cultivo anterior sobre a superfície. Posteriormente, realiza-se o plantio com o conjunto mecanizado, trator e plantadora, sulcando-se as linhas de plantio da cultura, simultaneamente, distribuindo-se assim, os fertilizantes, os toletes da cana-de-açúcar, os defensivos e a cobertura dos sulcos de plantio.

Com o intuito de maiores reduções de custos, questionou-se a possibilidade de substituição da escarificação em área total pela escarificação na linha de plantio da cultura da cana-de-açúcar. Essa ideia encontra suporte, porque as raízes das plantas de cana-de-açúcar concentram maior volume radicular na linha de plantio, com redução na densidade, comprimento e área de raízes com aumento da distância do eixo central da planta em direção ao espaço entrelinhas de plantio e aumento da profundidade do solo (Costa et al., 2007; Otto et al., 2011). Outro fator que sustenta a ideia, conforme é verificado na literatura científica, é que não se obtém aumento de produtividade com a escarificação na entrelinha da soqueira de cana-de-açúcar, quando é realizada como medida para aliviar a compactação do solo na entrelinha do cultivo (Paulino et al., 2004; Bangita e Rao, 2012; Garbiate et al., 2016; Sá et al., 2016).

Atualmente, encontra-se trabalhos na literatura científica que relatam a utilização da estatística multivariada na avaliação e monitoramento da qualidade da água e solo e, entre as principais técnicas disponíveis está a análise fatorial multivariada (Andrews e Carroll, 2001; Muendo et al., 2006; Arcoverde et al., 2015; Moitinho et al., 2018). Essa análise é uma técnica de interdependência que analisa relações lineares entre variáveis, com o objetivo de redução no número de variáveis comuns dentro de um



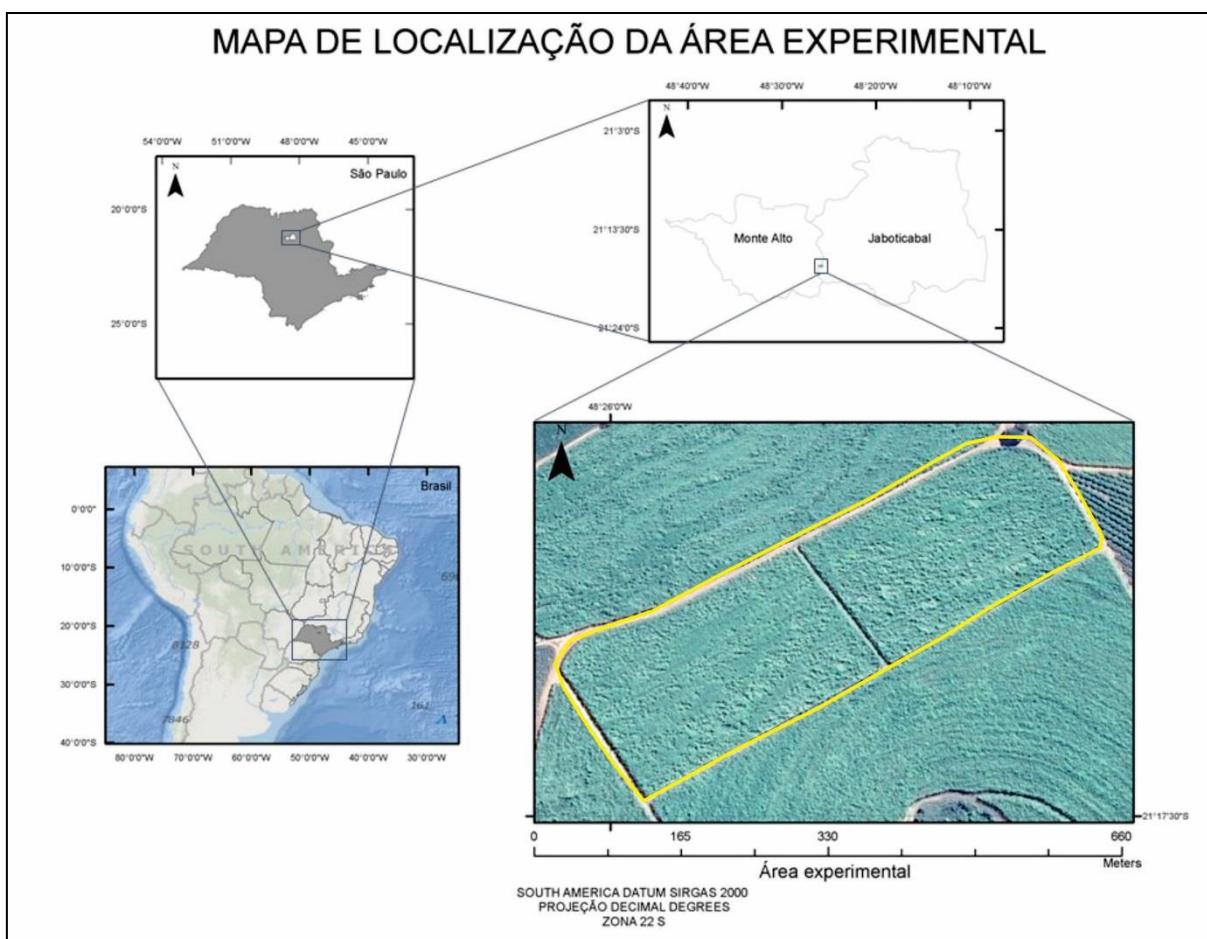
número reduzido de variáveis que formam dimensões latentes, denominadas, fatores (Hair-Jr, 2009). Com base nisso, permite-se interpretar um processo ecológico em resposta a um determinado fenômeno ambiental. Os fatores não têm unidades e normalmente são variáveis padronizadas. O valor de cada fator para cada observação das variáveis originais pode ser calculado e usado como uma nova variável em gráficos, histogramas e análises estatísticas como a análise de variância (Muendo et al., 2006).

A análise fatorial multivariada, também permite, que se obtenha índices construídos a partir dos valores de escores fatoriais, obtidos a partir dos fatores extraídos. Nesse caso, pode ser construído um índice de qualidade do solo a partir de um conjunto de dados com atributos do solo (Andrews e Carroll, 2001; Andrews et al., 2002a; Andrews et al., 2002b; Mukherjee et al., 2014; Arcoverde et al., 2015; Raiesi, 2017). Na maioria desses trabalhos, o conjunto de dados iniciais para análise é formado por indicadores químicos, biológicos e físicos (Vasu et al., 2016; Raiesi e Kabiri, 2016; Cherubin et al., 2016a; Cherubin et al., 2016b; Guo et al., 2017; Biswas et al., 2017), e no final são selecionados somente os indicadores de maior contribuição nas dimensões construídas para a avaliação da qualidade do solo. Uma opinião consensual nesses trabalhos é que se construa um índice de qualidade do solo com dados regionalizados e específicos para cada situação que se pretenda aplicar. Pois, esses índices de qualidade do solo construídos pela técnica da análise fatorial multivariada variam em função das condições específicas de cada região de estudo, tais como, o tipo de solo, o uso e manejo e as práticas agrícolas. Na cultura da cana-de-açúcar são poucos os trabalhos que demonstram a utilização desse índice na avaliação da qualidade física do solo (Cherubin et al., 2016a; Cherubin et al., 2016b). Portanto, a construção do índice permite identificar e avaliar de forma integrada os principais atributos indicadores da qualidade física do solo e as modificações ocorridas em função do manejo do solo.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

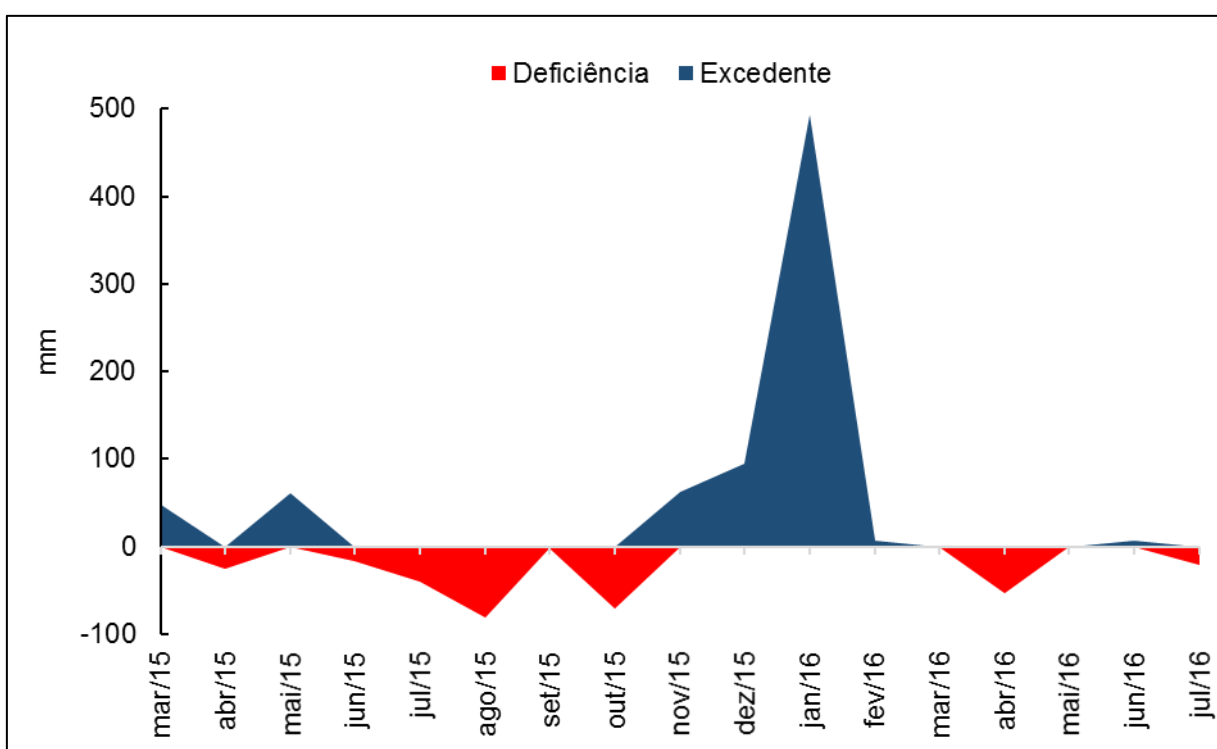
#### 3.1 Caracterização da área de estudo

O experimento foi realizado no Sudeste do Brasil, região considerada como uma das maiores produtoras de cana-de-açúcar no mundo. A área agrícola utilizada no experimento está localizada na cidade de Monte Alto, SP, identificada pelas coordenadas geográficas  $21^{\circ} 17' S$  e  $48^{\circ} 25' W$ , com altitude média de 684 m (Figura 1).



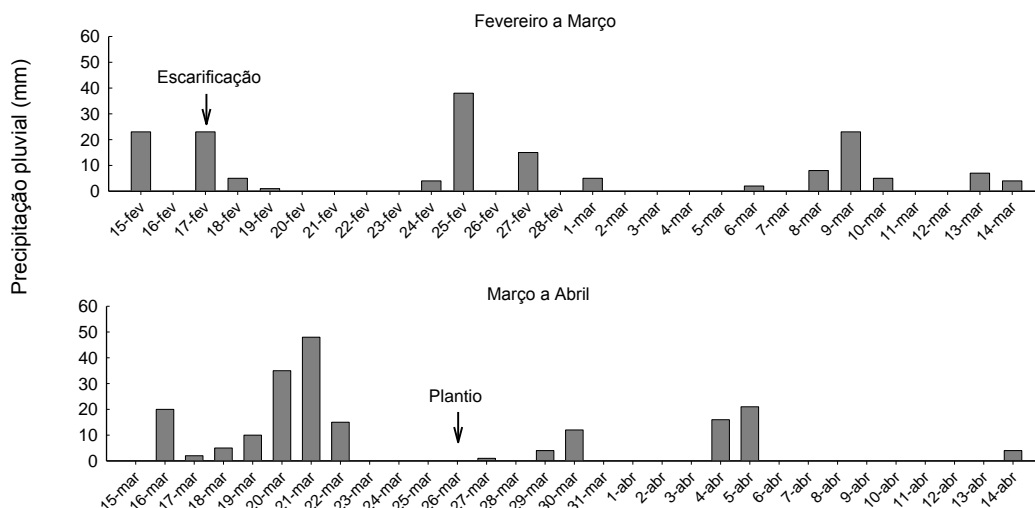
**Figura 1.** Mapa de localização da área experimental. Imagem de satélite da área experimental retirada do Google Earth.

O solo da área experimental é classificado como Argissolo, de acordo com Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2013). A área experimental possui declividade inferior a 3 %. O clima da região é classificado, segundo *Köppen*, como Aw, tipo mesotérmico com inverno seco, com temperatura do mês mais quente superior a 22 °C e a do mês mais frio, superior a 18 °C. A precipitação média anual é de 1.400 mm, com concentração de chuvas no período de outubro a março e relativa seca entre abril e setembro (CEPAGRI, 2018). Na figura 2 está apresentado o balanço hídrico da região referente ao período que o experimento foi realizado.



**Figura 2.** Balanço hídrico da região de Monte Alto, SP. Fonte: Dados da estação meteorológica da Usina São Martinho.

Vale destacar que durante o experimento foram realizadas anotações diárias da precipitação pluvial que ocorreu durante o período após o preparo do solo até o plantio de cana-de-açúcar, quantificada *in loco*, a partir dos volumes coletados no pluviômetro instalado próximo à área experimental. O resultado está apresentado na figura 3.



**Figura 3.** Precipitação pluvial (mm) da área experimental no período de 15/02/2015 a 14/04/2015.

Foram coletadas amostras de solo, onde verificou-se que a composição granulométrica apresenta variação textural de arenoso a franco argilo-arenoso com aumento gradual no conteúdo de argila na camada de 0,00-0,10 m até 0,40-0,60 m (Tabela 1). O fracionamento da areia em diâmetro de classes evidencia que existe uma maior proporção de partículas de areia média a muito fina (Tabela 2).

**Tabela 1.** Média dos atributos argila, areia, silte e carbono orgânico (CO) nas camadas de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m nas linhas e entrelinhas de cultivo de Argissolo cultivado com cana-de-açúcar, submetido à escarificação na linha de plantio e escarificação em área total.

Camada (m)	Areia	Argila	Silte	CO
	----- g kg <sup>-1</sup> -----			
0,00-0,10	794,17	136,14	69,69	7,28
0,10-0,20	798,88	163,15	37,97	6,36
0,20-0,40	763,53	186,91	49,56	5,09
0,40-0,60	682,50	264,96	52,54	5,16

**Tabela 2.** Porcentagem de areia nos diâmetros equivalentes a 2-1 mm, 1-0,5 mm, 0,5-0,25 mm, 0,25-0,125 mm e 0,125-0,05 mm nas camadas de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m de profundidade do Argissolo.

Camada (m)	2-1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,125	0,125-0,05
	----- % da areia total -----				
0,00-0,10	0	2	27	44	27
0,10-0,20	0	2	27	45	26
0,20-0,40	0	2	27	44	27
0,40-0,60	0	1	27	44	28

Areia muito grossa = 2-1 mm, areia grossa = 1-0,5 mm, areia média = 0,5-0,25 mm, areia fina = 0,25-0,125 mm e areia muito fina = 0,125-0,05 mm.

### 3.2 Delineamento experimental e condução do experimento

O delineamento experimental foi realizado em parcelas grandes pareadas (Perecin, 2008; Perecin et al., 2015). Os tratamentos utilizados consistiram na operação de preparo do solo com a escarificação na linha de plantio (ELP) e em área total (EAT).

A escarificação ocorreu em 17 de fevereiro de 2015, com a umidade do solo igual a  $0,11 \text{ g g}^{-1}$ . A área experimental foi de 9 ha, sendo cada área composta por 20 parcelas, sendo 10 parcelas para cada escarificação avaliada (ELP e EAT), nas quais cada parcela mediu 0,45 ha.

A escarificação na linha de plantio (ELP) foi realizada com a utilização de escarificador com dois pares de hastes, onde a distância do centro de um par de hastes ao outro par corresponde a 1,0 m, devido ao espaçamento do plantio da cana-de-açúcar que foi de 1,5 m (Figura 4). A distância entre as hastes que compõem cada par é de 0,50 m. A cada passagem da barra com as quatro hastes, duas linhas de plantio foram preparadas.



**Figura 4.** Escarificadores utilizados no preparo mínimo do solo. (a) – escarificador utilizado na escarificação na linha de plantio; e (b) – escarificador utilizado na escarificação em área total.

Em área total (EAT), a escarificação do solo foi realizada com escarificador com cinco hastes espaçadas a 0,50 m. Para os dois escarificadores, o comprimento da haste foi de 0,80 m, a ponteira com 0,25 m de comprimento e 0,04 m de largura, que possibilitou uma profundidade de trabalho de 0,30 m. Ambos possuem rolos

destorreadores localizados atrás das hastas com a função de destorrear e nivelar o solo (Figura 4).

O plantio da cana-de-açúcar (variedade CTC 4) foi realizado no dia 26/03/2015 pelo conjunto mecanizado trator e plantadora. No plantio, a sulcação foi realizada no espaçamento entre sulcos de 1,50 m, com aplicação de fertilizante, distribuição das mudas, aplicação de defensivos e cobertura. Os tratos culturais realizados após o plantio da cana-de-açúcar foram: a operação mecanizada de cultivo de nivelamento (também denominado de operação de quebra lombo), que consiste em destorrear e nivelar a leira do solo ao longo do centro da entrelinha, resultante da operação de abertura de sulcos para o plantio. E a aplicação de herbicidas pós-plantio com pulverizador autopropeleado para controle de plantas daninhas.

### **3.3 Amostragem e determinação dos atributos físicos do solo**

As amostragens para a determinação dos atributos físicos do solo e conteúdo de carbono orgânico foram realizadas nas camadas de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m em dois locais: na linha de plantio e na sua entrelinha. As coletas na linha de plantio foram realizadas a 0,20 m distante das touceiras de cana-de-açúcar. Na entrelinha de plantio foram realizadas, na parte central das zonas sem tráfego dos rodados das máquinas, aproximadamente a 0,60 m distante das touceiras de cana-de-açúcar. Entretanto, após a colheita da cana-de-açúcar, não foi possível realizar o controle de tráfego na área. Sendo assim, as amostras foram coletadas nas entrelinhas sobre influência da zona de tráfego da colhedora e transbordo. Quatro épocas de amostragem foram realizadas: 1ª amostragem, após a escarificação do solo; 2ª amostragem, após o plantio da cana-de-açúcar, correspondendo a 37 dias após o preparo do solo; 3ª amostragem, seis meses após o plantio; e 4ª amostragem após a colheita da cana-planta (16 meses após o plantio).

Amostras de solo deformadas foram coletadas com auxílio de trado holandês, coletando-se 10 subamostras por parcela para formar uma amostra composta. Nessas amostras, foram determinados os teores de areia, argila e silte (Claessen, 1997),

carbono orgânico (CO) (Yeomans e Bremmer, 1988) e índice de estabilidade de agregados (IEA) (Nimmo e Perkins, 2002).

Amostras de solo indeformadas foram coletadas, utilizando-se anéis volumétricos (diâmetro = 0,05 m e altura = 0,05 m) coletados com o trado tipo Uhland. Em cada parcela foram retirados três anéis volumétricos, contendo as amostras de solo indeformadas. Nessas amostras, foram determinados: resistência mecânica à penetração (RP), densidade do solo (Ds), macroporosidade (MaP) e microporosidade (MiP). A RP foi determinada com a utilização do penetrômetro eletrônico estático de laboratório, após aplicar em cada amostra uma tensão de 100 hPa, conforme descrito por Tormena et al. (1998), cuja amostra, após a aplicação da tensão de 100 hPa, foi submetida ao penetrômetro eletrônico estático de laboratório. A Ds, a MaP e a MiP foram determinadas conforme Claessen (1997). Amostras indeformadas de solo foram coletadas com auxílio de enxadão nas camadas de 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m para determinação do diâmetro médio ponderado (DMP) (Nimmo e Perkins, 2002).

### **3.4 Colheita da cana-de-açúcar e determinação da produtividade de colmos**

A cana-de-açúcar foi colhida sem queima prévia com colhedora, 16 meses após o plantio (18/07/2016) e transportada por um trator e um reboque equipado com uma célula de carga que permitiu determinar a massa de colmos colhidos em cada linha de plantio e, assim, obter a produtividade. Nas parcelas de cada tratamento estudado foi determinada a produção de colmos por área, que permitiu calcular a produtividade de colmos ( $t\ ha^{-1}$ ) nas duas áreas avaliadas.

### **3.5 Análise fatorial multivariada**

Respeitando a estrutura de dependência no conjunto das variáveis, inicialmente, foi realizada a estatística descritiva e a análise da matriz de correlação de Pearson, para a avaliação do grau de associação entre os atributos. A verificação da adequação dos dados foi realizada pelo índice KMO (*Kaiser-Meyer-Olkin Measure*

*of Sampling Adequacy*) e o teste estatístico de esfericidade de Bartlett, que testa a hipótese nula de que as variáveis analisadas não são correlacionadas (Hair-Jr et al., 2009). Nessa etapa da análise, excluíram-se os atributos silte, DMP, IEA e CO, pois apresentaram correlação com baixo grau de associação e não significativo com as demais variáveis, portanto, considerados inadequados para a inclusão na análise fatorial.

Posteriormente, realizou-se a análise fatorial pelo método dos componentes principais, utilizando-se a rotação varimax normalizada, de modo a analisar a estrutura de correlações entre as variáveis (atributos físicos do solo), que definiu um conjunto de dimensões latentes comuns denominadas de fatores. O objetivo de utilização desse método de rotação é avaliar a redistribuição da variância dos primeiros fatores para os demais, até que seja atingido um padrão fatorial simples e significativo, tornando o resultado mais facilmente interpretável, e conservando-se as suas propriedades estatísticas (Hair-Jr et al., 2009). Os fatores extraídos foram escolhidos obedecendo ao critério de Kaiser, cuja sugestão é que devem ser extraídos apenas os fatores com autovalores superiores ao valor 1,0. Após esse procedimento, foi obtida a matriz de cargas fatoriais dos fatores extraídos e os escores fatoriais rotacionados que representam as estimativas das contribuições dos vários fatores a cada observação original e são utilizados em classificação de amostras (Landim, 2011). Nos procedimentos de análise fatorial multivariada, o programa estatístico utilizado foi Statistica 7.0 (*StatSoft Inc.*, Tulsa, OK, USA).

### **3.6 Índice de qualidade física do solo**

Os procedimentos para definir o índice de qualidade física do solo (IQFS) foram realizados conforme os pressupostos de Andrews e Carroll (2001), Andrews et al. (2002a), Santana (2007) e Cherubin et al. (2016a).

O índice foi definido como uma combinação linear dos escores fatoriais e a proporção da variância explicada em cada fator em relação à variância comum.

A seguinte expressão matemática pode ser assim representada:



$$IQFS = \sum_{j=1}^q \left[ \frac{\lambda_j}{\Sigma \lambda_j} \cdot FP_{ij} \right], i = 1, 2, \dots, n$$

$\lambda_j$  é a variância explicada para cada fator e  $\Sigma \lambda_j$  é a soma total da variância explicada pelos fatores.  $FP_i$  é o escore fatorial padronizado de que se obtém os valores positivos de escores fatores originais e, com ele, é possível hierarquizar os valores de IQFS entre zero e um. A padronização consiste em encontrar o  $F_{\min}$  e  $F_{\max}$  que são valores de mínimo e máximo, observados nos escores fatoriais associados para cada observação original em razão dos tratamentos estudados (Santana, 2007). Nesse caso, adotou-se a seguinte equação :

$$FP = \frac{FP_i - FP_{\min}}{FP_{\max} - FP_{\min}}$$

Em que,  $F_{\min}$  e  $F_{\max}$  são, respectivamente, os valores mínimo e máximo dos escores fatoriais observados e associados aos tratamentos estudados. No cálculo do IQFS foi utilizado o software Microsoft Excel®.

### **3.7 Análise estatística das variáveis latentes, iqfs e produtividade de colmos de cana-de-açúcar**

Os efeitos dos tratamentos de escarificação (ELP e EAT) e local de amostragem (linha e entrelinha de plantio) sobre os escores fatoriais dos fatores extraídos (variáveis latentes) pela análise fatorial multivariada e o índice de qualidade física do solo (IQFS) construído, nas diferentes camadas estudadas ao longo das quatro épocas de amostragem, foram analisados a partir da análise de variância, utilizando-se o procedimento GLM. Quando os valores de F foram significativos, as médias foram comparadas pelo teste Tukey a  $p < 0,05$ . Os valores de produtividade de colmos de cana-de-açúcar foram submetidos à análise de variância e teste de comparação de média pelo teste Tukey a  $p < 0,05$ . A análise de variância e o teste de Tukey foram realizados com auxílio do programa estatístico SAS 9.2 (versão 9.2, SAS Institute, Cary, NC, USA).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A estatística descritiva dos atributos físicos do solo e carbono orgânico determinados na camada de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m de profundidade, nas quatro épocas de amostragem, indicam uma tendência no aumento dos valores de densidade do solo (Ds), resistência mecânica à penetração (RP) e redução nos valores de macroporosidade (MaP), considerando-se após o preparo do solo até a colheita (Tabela 3 e 4).

Os valores de microporosidade (MiP) apresentaram reduzidas variações na camada de 0,00-0,10 m de profundidade (Tabela 4). Em razão dos baixos teores de carbono orgânico orgânica e argila principalmente nas camadas superficiais (Tabela 1), a agregação do solo foi baixa, conforme se verifica pelos baixos valores de índice de estabilidade de agregados (IEA) e diâmetro médio ponderado (DMP) (Tabela 5). Isso resultou na menor contribuição dos atributos CO, IEA e DMP para a construção de fatores na análise fatorial multivariada.

Na análise de correlação, verifica-se, que dos 15 coeficientes, todos os pares apresentaram valores significativos, indicando que a aplicação da análise fatorial, utilizando-se os atributos RP, Ds, MaP, MiP, areia e argila adequou-se ao conjunto de dados (Hair-Jr et al., 2009) (Tabela 6).

**Tabela 3.** Média  $\pm$  desvio padrão dos atributos, resistência mecânica à penetração (RP) e densidade do solo (Ds) em quatro épocas de amostragem nas camadas de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m de profundidade nas linhas e entrelinhas de plantio do Argissolo cultivado com cana-de-açúcar, submetido à escarificação na linha de plantio e escarificação em área total.

Camada amostrada (m)	Local de amostragem	Após o preparo	Após o plantio	6 meses após o plantio	Após a colheita
----- RP (MPa) -----					
Escarificação na linha de plantio					
0,00-0,10	Linha	0,89 $\pm$ 0,21	1,21 $\pm$ 0,44	2,17 $\pm$ 0,82	2,43 $\pm$ 1,25
	Entrelinha	2,65 $\pm$ 0,62	2,46 $\pm$ 0,64	2,83 $\pm$ 0,78	4,46 $\pm$ 1,20
0,10-0,20	Linha	1,23 $\pm$ 0,57	1,51 $\pm$ 0,38	3,51 $\pm$ 1,46	4,02 $\pm$ 0,92
	Entrelinha	3,08 $\pm$ 0,37	2,61 $\pm$ 0,34	4,24 $\pm$ 1,09	5,08 $\pm$ 1,64
0,20-0,40	Linha	1,35 $\pm$ 0,56	1,63 $\pm$ 0,52	3,34 $\pm$ 1,08	4,86 $\pm$ 0,82
	Entrelinha	2,88 $\pm$ 0,39	2,9 $\pm$ 0,32	3,94 $\pm$ 0,76	5,81 $\pm$ 1,17
0,40-0,60	Linha	1,87 $\pm$ 0,48	1,81 $\pm$ 0,31	2,55 $\pm$ 0,74	4,82 $\pm$ 1,67
	Entrelinha	1,96 $\pm$ 0,37	2,43 $\pm$ 0,68	2,70 $\pm$ 0,96	4,93 $\pm$ 1,18
Escarificação em área total					
0,00-0,10	Linha	1,54 $\pm$ 0,64	1,44 $\pm$ 0,32	2,33 $\pm$ 0,62	2,25 $\pm$ 0,70
	Entrelinha	1,32 $\pm$ 0,69	1,77 $\pm$ 0,32	2,24 $\pm$ 0,39	4,02 $\pm$ 1,40
0,10-0,20	Linha	1,74 $\pm$ 0,52	1,87 $\pm$ 0,53	3,54 $\pm$ 0,60	5,49 $\pm$ 1,99
	Entrelinha	1,48 $\pm$ 0,64	2,46 $\pm$ 0,60	3,80 $\pm$ 0,81	6,42 $\pm$ 1,77
0,20-0,40	Linha	1,81 $\pm$ 0,69	1,63 $\pm$ 0,51	2,71 $\pm$ 0,44	5,75 $\pm$ 1,26
	Entrelinha	1,69 $\pm$ 0,44	2,39 $\pm$ 0,55	3,34 $\pm$ 0,84	5,83 $\pm$ 1,5
0,40-0,60	Linha	1,60 $\pm$ 0,31	2,03 $\pm$ 0,25	2,24 $\pm$ 0,30	5,54 $\pm$ 1,00
	Entrelinha	1,76 $\pm$ 0,27	2,09 $\pm$ 0,35	2,82 $\pm$ 0,53	5,14 $\pm$ 0,61
----- Ds (g cm <sup>-3</sup> ) -----					
Escarificação na linha de plantio					
0,00-0,10	Linha	1,66 $\pm$ 0,03	1,66 $\pm$ 0,05	1,71 $\pm$ 0,08	1,71 $\pm$ 0,04
	Entrelinha	1,82 $\pm$ 0,03	1,68 $\pm$ 0,04	1,64 $\pm$ 0,09	1,75 $\pm$ 0,09
0,10-0,20	Linha	1,71 $\pm$ 0,05	1,78 $\pm$ 0,04	1,81 $\pm$ 0,06	1,85 $\pm$ 0,03
	Entrelinha	1,87 $\pm$ 0,02	1,84 $\pm$ 0,03	1,86 $\pm$ 0,04	1,89 $\pm$ 0,04
0,20-0,40	Linha	1,74 $\pm$ 0,04	1,76 $\pm$ 0,04	1,82 $\pm$ 0,06	1,88 $\pm$ 0,04
	Entrelinha	1,87 $\pm$ 0,03	1,87 $\pm$ 0,02	1,85 $\pm$ 0,03	1,91 $\pm$ 0,04
0,40-0,60	Linha	1,72 $\pm$ 0,04	1,74 $\pm$ 0,03	1,78 $\pm$ 0,07	1,87 $\pm$ 0,07
	Entrelinha	1,75 $\pm$ 0,03	1,81 $\pm$ 0,02	1,79 $\pm$ 0,07	1,89 $\pm$ 0,05
Escarificação em área total					
0,00-0,10	Linha	1,68 $\pm$ 0,05	1,70 $\pm$ 0,03	1,70 $\pm$ 0,07	1,70 $\pm$ 0,07
	Entrelinha	1,71 $\pm$ 0,05	1,63 $\pm$ 0,07	1,72 $\pm$ 0,05	1,77 $\pm$ 0,07
0,10-0,20	Linha	1,77 $\pm$ 0,03	1,80 $\pm$ 0,03	1,83 $\pm$ 0,04	1,89 $\pm$ 0,06
	Entrelinha	1,75 $\pm$ 0,03	1,83 $\pm$ 0,03	1,86 $\pm$ 0,04	1,94 $\pm$ 0,04
0,20-0,40	Linha	1,75 $\pm$ 0,05	1,78 $\pm$ 0,03	1,81 $\pm$ 0,06	1,92 $\pm$ 0,03
	Entrelinha	1,77 $\pm$ 0,04	1,83 $\pm$ 0,04	1,84 $\pm$ 0,04	1,94 $\pm$ 0,02
0,40-0,60	Linha	1,73 $\pm$ 0,03	1,74 $\pm$ 0,07	1,79 $\pm$ 0,05	1,90 $\pm$ 0,03
	Entrelinha	1,75 $\pm$ 0,04	1,79 $\pm$ 0,03	1,82 $\pm$ 0,05	1,90 $\pm$ 0,03

**Tabela 4.** Média  $\pm$  desvio padrão dos atributos, macroporosidade (MaP) e microporosidade (MiP) em quatro épocas de amostragem nas camadas de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m de profundidade nas linhas e entrelinhas de plantio do Argissolo cultivado com cana-de-açúcar, submetido à escarificação na linha de plantio e escarificação em área total.

Camada amostrada (m)	Local de amostragem	Após o preparo	Após o plantio	6 meses após o plantio	Após a colheita
----- MaP (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) -----					
Escarificação na linha de plantio					
0,00-0,10	Linha	0,11 $\pm$ 0,02	0,12 $\pm$ 0,02	0,08 $\pm$ 0,03	0,08 $\pm$ 0,02
	Entrelinha	0,04 $\pm$ 0,01	0,05 $\pm$ 0,01	0,06 $\pm$ 0,02	0,05 $\pm$ 0,01
0,10-0,20	Linha	0,07 $\pm$ 0,01	0,05 $\pm$ 0,01	0,06 $\pm$ 0,02	0,05 $\pm$ 0,01
	Entrelinha	0,03 $\pm$ 0,01	0,05 $\pm$ 0,01	0,05 $\pm$ 0,01	0,05 $\pm$ 0,02
0,20-0,40	Linha	0,05 $\pm$ 0,01	0,05 $\pm$ 0,01	0,05 $\pm$ 0,02	0,04 $\pm$ 0,01
	Entrelinha	0,05 $\pm$ 0,03	0,04 $\pm$ 0,01	0,04 $\pm$ 0,01	0,03 $\pm$ 0,01
0,40-0,60	Linha	0,08 $\pm$ 0,10	0,05 $\pm$ 0,01	0,04 $\pm$ 0,01	0,03 $\pm$ 0,01
	Entrelinha	0,04 $\pm$ 0,01	0,04 $\pm$ 0,01	0,04 $\pm$ 0,01	0,03 $\pm$ 0,01
Escarificação em área total					
0,00-0,10	Linha	0,09 $\pm$ 0,03	0,09 $\pm$ 0,02	0,06 $\pm$ 0,02	0,08 $\pm$ 0,02
	Entrelinha	0,08 $\pm$ 0,02	0,07 $\pm$ 0,02	0,06 $\pm$ 0,02	0,05 $\pm$ 0,01
0,10-0,20	Linha	0,06 $\pm$ 0,01	0,05 $\pm$ 0,01	0,04 $\pm$ 0,01	0,04 $\pm$ 0,01
	Entrelinha	0,06 $\pm$ 0,01	0,05 $\pm$ 0,01	0,04 $\pm$ 0,01	0,04 $\pm$ 0,01
0,20-0,40	Linha	0,05 $\pm$ 0,01	0,05 $\pm$ 0,01	0,04 $\pm$ 0,02	0,04 $\pm$ 0,01
	Entrelinha	0,05 $\pm$ 0,01	0,04 $\pm$ 0,01	0,04 $\pm$ 0,01	0,04 $\pm$ 0,01
0,40-0,60	Linha	0,05 $\pm$ 0,01	0,05 $\pm$ 0,01	0,04 $\pm$ 0,02	0,03 $\pm$ 0,01
	Entrelinha	0,07 $\pm$ 0,11	0,05 $\pm$ 0,01	0,03 $\pm$ 0,01	0,03 $\pm$ 0,01
----- MiP (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) -----					
Escarificação na linha de plantio					
0,00-0,10	Linha	0,23 $\pm$ 0,02	0,23 $\pm$ 0,01	0,24 $\pm$ 0,02	0,26 $\pm$ 0,01
	Entrelinha	0,25 $\pm$ 0,01	0,29 $\pm$ 0,03	0,28 $\pm$ 0,03	0,27 $\pm$ 0,03
0,10-0,20	Linha	0,26 $\pm$ 0,02	0,24 $\pm$ 0,02	0,23 $\pm$ 0,02	0,24 $\pm$ 0,01
	Entrelinha	0,24 $\pm$ 0,01	0,23 $\pm$ 0,01	0,22 $\pm$ 0,01	0,23 $\pm$ 0,01
0,20-0,40	Linha	0,27 $\pm$ 0,02	0,26 $\pm$ 0,02	0,24 $\pm$ 0,03	0,24 $\pm$ 0,02
	Entrelinha	0,24 $\pm$ 0,03	0,23 $\pm$ 0,01	0,24 $\pm$ 0,02	0,24 $\pm$ 0,02
0,40-0,60	Linha	0,30 $\pm$ 0,02	0,29 $\pm$ 0,01	0,27 $\pm$ 0,02	0,26 $\pm$ 0,04
	Entrelinha	0,30 $\pm$ 0,01	0,26 $\pm$ 0,02	0,27 $\pm$ 0,02	0,26 $\pm$ 0,02
Escarificação em área total					
0,00-0,10	Linha	0,25 $\pm$ 0,02	0,22 $\pm$ 0,01	0,27 $\pm$ 0,02	0,25 $\pm$ 0,02
	Entrelinha	0,24 $\pm$ 0,02	0,28 $\pm$ 0,04	0,27 $\pm$ 0,03	0,26 $\pm$ 0,03
0,10-0,20	Linha	0,25 $\pm$ 0,02	0,24 $\pm$ 0,01	0,24 $\pm$ 0,02	0,23 $\pm$ 0,01
	Entrelinha	0,26 $\pm$ 0,01	0,23 $\pm$ 0,02	0,23 $\pm$ 0,02	0,22 $\pm$ 0,01
0,20-0,40	Linha	0,26 $\pm$ 0,01	0,26 $\pm$ 0,01	0,25 $\pm$ 0,02	0,24 $\pm$ 0,02
	Entrelinha	0,27 $\pm$ 0,02	0,24 $\pm$ 0,02	0,24 $\pm$ 0,02	0,23 $\pm$ 0,02
0,40-0,60	Linha	0,29 $\pm$ 0,02	0,28 $\pm$ 0,01	0,27 $\pm$ 0,02	0,26 $\pm$ 0,01
	Entrelinha	0,29 $\pm$ 0,02	0,27 $\pm$ 0,02	0,27 $\pm$ 0,03	0,26 $\pm$ 0,01

**Tabela 5.** Média  $\pm$  desvio padrão dos atributos, índice de estabilidade de agregados (IEA) e diâmetro médio ponderado (DMP) em quatro épocas de amostragem nas camadas de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m de profundidade nas linhas e entrelinhas de plantio do Argissolo cultivado com cana-de-açúcar, submetido à escarificação na linha de plantio e escarificação em área total.

Camada amostrada (m)	Local de amostragem	Após o preparo	Após o plantio	6 meses após o plantio	Após a colheita
----- IEA (%) -----					
Escarificação na linha de plantio					
0,00-0,10	Linha	39,9 $\pm$ 15,3	42,3 $\pm$ 11,9	40,7 $\pm$ 7,9	30,4 $\pm$ 14,6
	Entrelinha	53,1 $\pm$ 13,9	42,0 $\pm$ 14,5	47,3 $\pm$ 11,8	41,9 $\pm$ 2,4
0,10-0,20	Linha	27,3 $\pm$ 7,9	36,4 $\pm$ 7,8	41,5 $\pm$ 7,8	22,8 $\pm$ 5,1
	Entrelinha	42,7 $\pm$ 10,9	39,9 $\pm$ 5,6	47,6 $\pm$ 6,1	43,6 $\pm$ 4,9
0,20-0,40	Linha	23,6 $\pm$ 5,2	29,6 $\pm$ 7,2	36,3 $\pm$ 10,3	19,0 $\pm$ 3,7
	Entrelinha	29,6 $\pm$ 12,2	34,8 $\pm$ 14,4	42,7 $\pm$ 9,5	35,8 $\pm$ 3,5
0,40-0,60	Linha	17,8 $\pm$ 4,67	27,9 $\pm$ 7,0	30,5 $\pm$ 3,6	17,1 $\pm$ 4,4
	Entrelinha	30,0 $\pm$ 11,3	29,7 $\pm$ 9,1	31,9 $\pm$ 3,9	30,0 $\pm$ 3,2
Escarificação em área total					
0,00-0,10	Linha	52,4 $\pm$ 10,3	52,9 $\pm$ 14,6	45,7 $\pm$ 5,4	33,0 $\pm$ 4,2
	Entrelinha	40,4 $\pm$ 15,1	53,8 $\pm$ 8,4	51,9 $\pm$ 4,0	31,3 $\pm$ 7,9
0,10-0,20	Linha	44,8 $\pm$ 12,7	44,0 $\pm$ 6,5	40,5 $\pm$ 10,1	17,7 $\pm$ 8,7
	Entrelinha	37,8 $\pm$ 9,5	43,8 $\pm$ 6,7	52,3 $\pm$ 11,3	35,6 $\pm$ 8,1
0,20-0,40	Linha	34,7 $\pm$ 11,6	26,6 $\pm$ 6,2	38,1 $\pm$ 5,5	19,7 $\pm$ 5,4
	Entrelinha	28,3 $\pm$ 19,1	28,4 $\pm$ 6,0	39,6 $\pm$ 4,1	26,3 $\pm$ 3,7
0,40-0,60	Linha	32,0 $\pm$ 8,4	22,2 $\pm$ 3,8	31,1 $\pm$ 7,4	15,2 $\pm$ 4,7
	Entrelinha	23,0 $\pm$ 10,7	21,6 $\pm$ 5,2	30,1 $\pm$ 7,7	23,7 $\pm$ 5,4
----- DMP (mm) -----					
Escarificação na linha de plantio					
0,00-0,10	Linha	1,80 $\pm$ 1,22	0,88 $\pm$ 0,31	1,34 $\pm$ 0,33	1,57 $\pm$ 0,65
	Entrelinha	1,79 $\pm$ 0,55	2,15 $\pm$ 0,68	1,08 $\pm$ 0,26	1,44 $\pm$ 0,56
0,10-0,20	Linha	1,15 $\pm$ 0,44	0,62 $\pm$ 0,10	0,89 $\pm$ 0,25	0,94 $\pm$ 0,31
	Entrelinha	1,56 $\pm$ 0,44	1,20 $\pm$ 0,38	0,74 $\pm$ 0,23	0,93 $\pm$ 0,28
Escarificação em área total					
0,00-0,10	Linha	1,86 $\pm$ 1,03	1,05 $\pm$ 0,31	1,16 $\pm$ 0,33	1,64 $\pm$ 0,40
	Entrelinha	1,53 $\pm$ 0,47	1,55 $\pm$ 0,54	0,81 $\pm$ 0,13	1,72 $\pm$ 0,46
0,10-0,20	Linha	1,10 $\pm$ 0,45	0,93 $\pm$ 0,25	1,13 $\pm$ 0,25	1,12 $\pm$ 0,52
	Entrelinha	1,19 $\pm$ 0,58	0,99 $\pm$ 0,41	0,72 $\pm$ 0,10	1,04 $\pm$ 0,39

**Tabela 6.** Matriz de correlação de Pearson dos atributos físicos do Argissolo cultivado com cana-de-açúcar, submetido a escarificação do solo na linha de plantio e em área total (N= 640 amostras).

Variável	RP	Ds	MiP	MaP	Areia	Argila
RP	1					
Ds	0,736**	1				
MiP	-0,318**	-0,485**	1			
MaP	-0,486**	-0,639**	-0,186**	1		
Areia	-0,144**	-0,385**	-0,227**	0,523**	1	
Argila	0,078*	0,237**	0,347**	-0,431**	-0,955**	1

\* e \*\* significativo a  $p < 0,05$  e  $p < 0,01$ , respectivamente; RP, resistência mecânica à penetração; Ds, densidade do solo; MaP, macroporosidade; MiP, microporosidade.

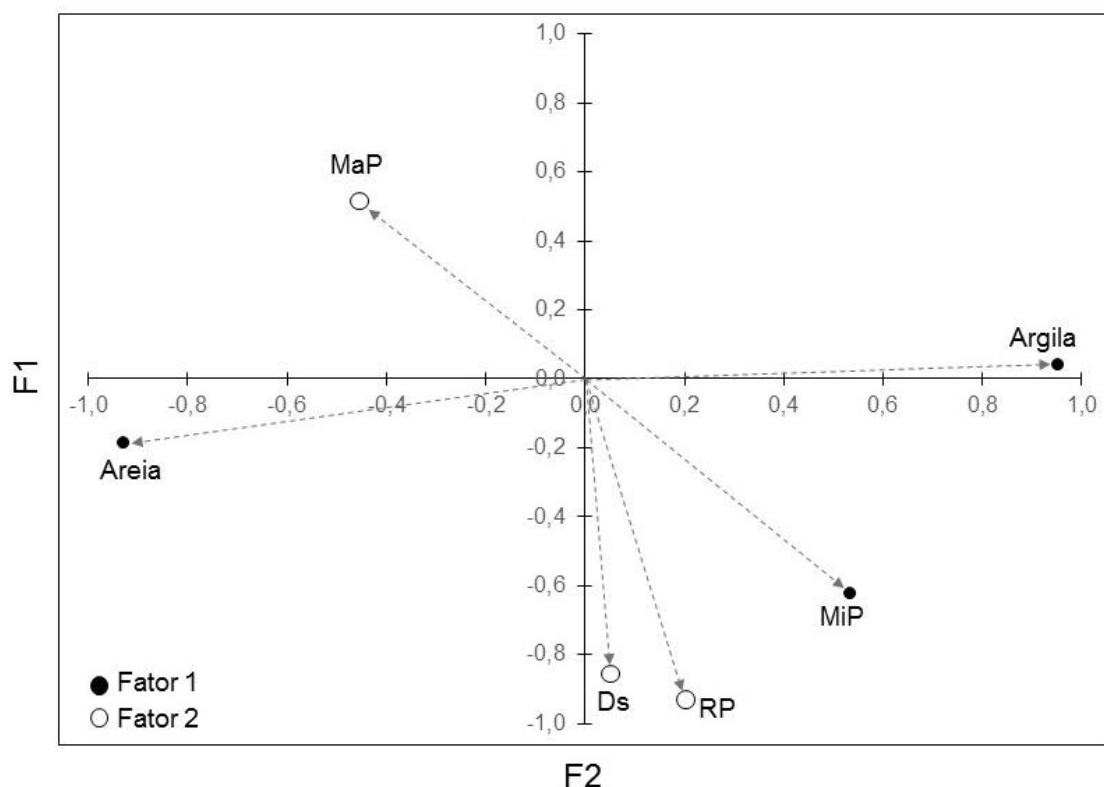
Na comprovação da adequação da análise fatorial, o teste de Bartlett ( $\chi^2 = 3170,54$ ;  $p < 0,001$ ) e teste de KMO (igual a 0,53) indicaram que as variáveis se correlacionaram e que os dados se adequaram à análise fatorial multivariada para extração dos fatores e estimativa dos escores fatoriais.

Dois fatores foram extraídos (F1 e F2) e explicaram 44 e 32 % da variância total contida nos dados que ocorreram na camada de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m de profundidade (Tabela 7 e Figura 5).

**Tabela 7.** Cargas fatoriais dos fatores extraídos a partir dos seis atributos físicos do solo analisados, autovalor e percentagem da variância explicada.

	F1	F2
Areia	<b>-0,930</b>	-
Argila	<b>0,950</b>	-
MiP	<b>0,532</b>	-
MaP	-	<b>0,519</b>
RP	-	<b>-0,854</b>
Ds	-	<b>-0,933</b>
Autovalor	2,645	1,944
Variância explicada (%)	44,000	32,000

F1 - processo de formação de microporosidade do solo influenciada pela natureza textural (indicador intrínseco do solo); F2 - processo de alteração na relação massa-volume do solo (indicador do manejo do solo); MiP, microporosidade; MaP, macroporosidade; RP, resistência mecânica à penetração; Ds, densidade do solo. Cargas fatoriais superiores a 0,50 foram utilizadas como relevantes.



**Figura 5.** Gráfico das cargas fatoriais extraídas por componentes principais do Fator 1 (F1) e Fator 2 (F2) para os atributos areia, argila, microporosidade (MiP), macroporosidade (MaP), resistência (RP) e densidade do solo (Ds).

Com base nas cargas fatoriais dos atributos físicos do solo que compuseram cada fator extraído (Tabela 7 e Figura 5), pôde-se dar uma interpretação dos processos físicos representados pelos fatores extraídos. O primeiro fator extraído (F1) foi o processo de formação de microporosidade do solo, influenciado pela natureza textural, que pôde ser utilizado com um indicador intrínseco do solo. Isso é explicado devido à propriedade intrínseca que ocorre nos solos, onde os argilosos apresentam maior proporção de partículas com diâmetro menores que 0,002 mm, e tendem a se organizarem em unidades estruturais porosas, formando agregados com elevado volume de microporos em seu interior (Brady e Weil, 2013). Por outro lado, em solos arenosos, o volume de microporos é menor em relação ao volume de macroporos. Isso ocorre devido a maior proporção de partículas de areia (diâmetro entre 0,05 a 2,00 mm) que formam espaço poroso entre si e proporcional ao diâmetro de suas partículas, o que resulta em maior volume de macroporos ( $\emptyset > 0,05$  mm). Além disso, as partículas são maciças e não formam unidades estruturais semelhantes às partículas de argila, o que não permite a formação de poros em seu interior. Essas

características dos solos arenosos permitem que eles sejam bem arejados e soltos, porém propensos ao déficit de umidade em razão da elevada drenagem de água. Além disso, apresentam uma baixa retenção de nutrientes disponíveis às plantas, menor teor de carbono orgânico devido ao baixo teor de argila e pouca agregação do solo. Essas condições podem conferir ao solo uma qualidade física inferior em relação a solos mais argilosos (Brady e Weil, 2013; Mukherjee et al., 2014).

O segundo fator extraído (F2) identifica um processo de alteração na relação massa-volume do solo, formado pela interação entre os atributos MaP, RP e Ds, e pôde ser utilizado como um indicador do manejo do solo. Nesse fator, estão representados os atributos físicos do solo que foram influenciados pelas modificações causadas pelo impacto do seu manejo. Nesse caso, quando ocorre mobilização do solo (por exemplo, pela ação mecânica da escarificação ou pela ação da haste de sulcação da plantadora na abertura do sulco de plantio) há uma elevação nos valores de MaP e redução nos valores de Ds e RP. Por outro lado, com a ausência de mobilização, reconsolidação do solo e a pressão exercida pelo tráfego de máquinas e implementos, os valores de Ds e RP tendem a ser elevados, e MaP reduzida.

A redução do espaço poroso promove um incremento na Ds que aumenta a fricção entre as partículas sólidas e a coesão do solo, que atuam como principais mecanismos para o aumento da RP (Pacheco e Cantalice, 2011). Esse comportamento foi observado por Arcoverde et al. (2015) quando avaliaram a qualidade de 24 solos com diferentes classes texturais, por análise fatorial multivariada, verificaram que, dentro de um mesmo fator, o volume de poros do solo se associou de forma oposta aos atributos Ds e RP.

Utilizando-se o índice de qualidade do solo determinado por análise fatorial multivariada a partir de sete indicadores físicos, Ortiz et al. (2017) verificaram que as áreas com maior tempo de cultivo com cana-de-açúcar apresentaram menor índice de qualidade física em função de valores elevados de Ds e RP e reduzidos de MaP. Segundo Cherubin et al. (2016b), as forças de compressão que são aplicadas ao solo pelo uso de tratores, reboques e colhedoras utilizados durante todo o ciclo de produção da cultura da cana-de-açúcar são as principais causas da redução no espaço poroso do solo, pois promove um incremento na Ds e RP que podem prejudicar o crescimento das raízes, afetando diretamente o crescimento das plantas



de cana-de-açúcar e redução na produtividade de colmos. Ao contrário disso, logo após a fase de renovação do canavial, a operação de preparo do solo com utilização da escarificação, como é o caso desse experimento, mobilizam as camadas de solo compactadas em função da ação mecânica das hastes do implemento, podendo aumentar a MaP e reduzir a Ds e a RP (Cortez et al., 2011).

O Fator 1 foi influenciado significativamente ( $p < 0,05$ ) pelo efeito da interação escarificação x local de amostragem na camada de 0,00-0,10 m, desde o preparo do solo até 6 meses após o plantio (Tabela 8).

**Tabela 8.** Valores do teste F da análise de variância para interação escarificação x local de amostragem das variáveis Fator 1 (F1), Fator 2 (F2) e índice de qualidade física do solo (IQFS).

Variável	Camada (m)	Época de amostragem			
		Após preparo	Após plantio	6 meses após plantio	Após colheita
F1	0,00-0,10	11,42*	4,62*	10,94*	0,10
	0,10-0,20	0,06	0,44	0,03	1,02
	0,20-0,40	0,45	0,77	1,01	0,08
	0,40-0,60	1,42	1,28	0,03	0,02
F2	0,00-0,10	32,90*	8,07*	1,37	0,42
	0,10-0,20	74,07*	0,80	2,60	0,37
	0,20-0,40	30,59*	0,77	1,01	0,08
	0,40-0,60	1,85	1,65	0,31	0,29
IQFS	0,00-0,10	0,03	62,87*	5,46*	0,31
	0,10-0,20	109,72**	1,33	0,95	0,73
	0,20-0,40	19,07*	3,62	0,54	0,34
	0,40-0,60	0,40	1,07	0,07	0,12

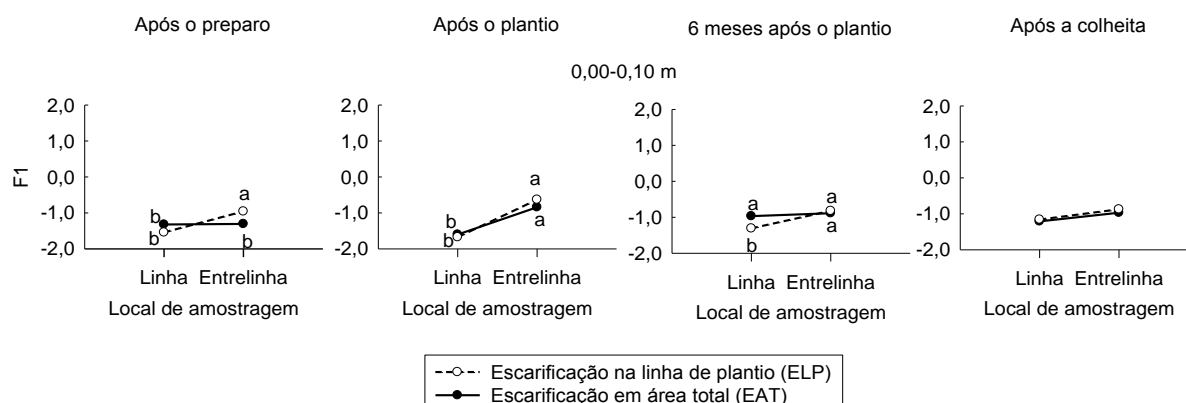
\* e \*\* significativo a  $p < 0,05$  e  $p < 0,01$ , respectivamente.

Nas camadas abaixo de 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m de profundidade não houve efeito significativo ( $p > 0,05$ ) para a interação escarificação x local de amostragem em todas as épocas de amostragem.

Na camada de 0,40-0,60 m não houve efeito significativo ( $p > 0,05$ ) para interação escarificação x local de amostragem sobre o Fator 1, assim como para o Fator 2 e IQFS, em todas as épocas de avaliação, o que confirma que a escarificação não atingiu essa camada do solo.

Na camada de 0,00-0,10 m de profundidade, as diferenças existentes entre os locais de amostragem indicaram que o F1 foi sensível as alterações que ocorreram

na superfície do solo, resultantes da reorganização das partículas do solo e alteração no volume de microporos do solo. Isso ocorreu devido à desagregação do solo provocada pelo efeito do impacto das gotas da chuva sobre a superfície do solo, onde essa desagregação foi maior nos locais mobilizados pela escarificação do solo. Isso colaborou para que ocorresse menor volume de microporos, reduzindo o valor de escore fatorial nesses tratamentos (Figura 6).



**Figura 6.** Desdobramento da interação escarificação x local de amostragem para F1 (escore fatorial) na camada de 0,00-0,10 m de profundidade do Argissolo avaliado em quatro épocas de amostragem.

Por outro lado, como na entrelinha da área ELP não houve mobilização do solo, a estrutura do solo se manteve sem alterações, contribuindo para o maior valor de escore fatorial e, assim maior volume de microporos. Na interpretação do processo que ocorre no F1, quanto mais negativo for o valor de escore fatorial (aproximando-se do valor de escore igual a -2,0), mais ele se associa a valores baixos de MiP (Tabela 7 e Figura 5).

Após o plantio, os menores valores de escore fatorial foram observados nos solos sob as linhas da área ELP e EAT que permitiu um menor volume de microporos nesses locais. Isso ocorreu em função da desagregação provocada pelas chuvas que ocorreram durante o período e, intensificadas pela mobilização do solo durante a abertura dos sulcos de plantio da cana-de-açúcar, (Figura 6).

Verifica-se que, no solo da entrelinha da área EAT, o escore fatorial não diferiu da entrelinha da área ELP, indicando que, nesse local de amostragem, houve reacomodação das partículas do solo, que promoveu um novo rearranjo e elevação da microporosidade. Esse comportamento, ocorreu até após a colheita da

cana-de-açúcar, onde foi possível observar que não houve diferenças significativas entre os locais de amostragem das áreas escarificadas (Figura 6).

Após a colheita, a ausência de diferença, entre os locais de amostragem das áreas avaliadas, deve-se ao fato do tráfego da colhedora, trator e transbordo que exerceram pressão sobre a superfície do solo das linhas e entrelinhas de plantio, o que permitiu que o volume de microporos fosse igual em todos os locais de amostragem.

É importante destacar que, apesar da camada de 0,00-0,10 m até 0,20-0,40 m de profundidade possuir maior proporção de areia, essas partículas são predominantemente formadas de areia média a fina (Tabela 2). Segundo Ribeiro et al. (2007), isso promove elevação nos valores de microporosidade do solo, em razão das partículas estabelecerem um contato face a face e, os grãos de areia fina ocuparem os espaços dos poros formados pela areia média e grossa, fazendo com que ocorra uma elevação no volume de microporos entre as partículas.

Nas camadas abaixo de 0,10 m de profundidade, a ausência de efeito significativo para a interação escarificação x local de amostragem sobre o F1, ocorreu porque a microporosidade não foi modificada pela escarificação do solo. Assim, o volume de microporos do solo não foi sensível ao manejo do solo com escarificação e permaneceu constante, em ambos os locais e épocas de amostragem. Estudos realizados em áreas de cultivo de cana-de-açúcar, relatam que a ausência do efeito do manejo do solo sobre o volume de microporos, está no fato de que a textura do solo é o atributo que mais influencia a sua microporosidade (Centurion et al., 2007; Cavalieri et al., 2011).

É importante destacar que, no caso do solo deste experimento, a camada superficial possui elevado teor de areia em relação à argila (Tabela 1), em função disso ocorre menor conteúdo de carbono orgânico e, reduzida agregação, como pode ser verificado pelos menores valores de DMP e IEA (Tabela 5).

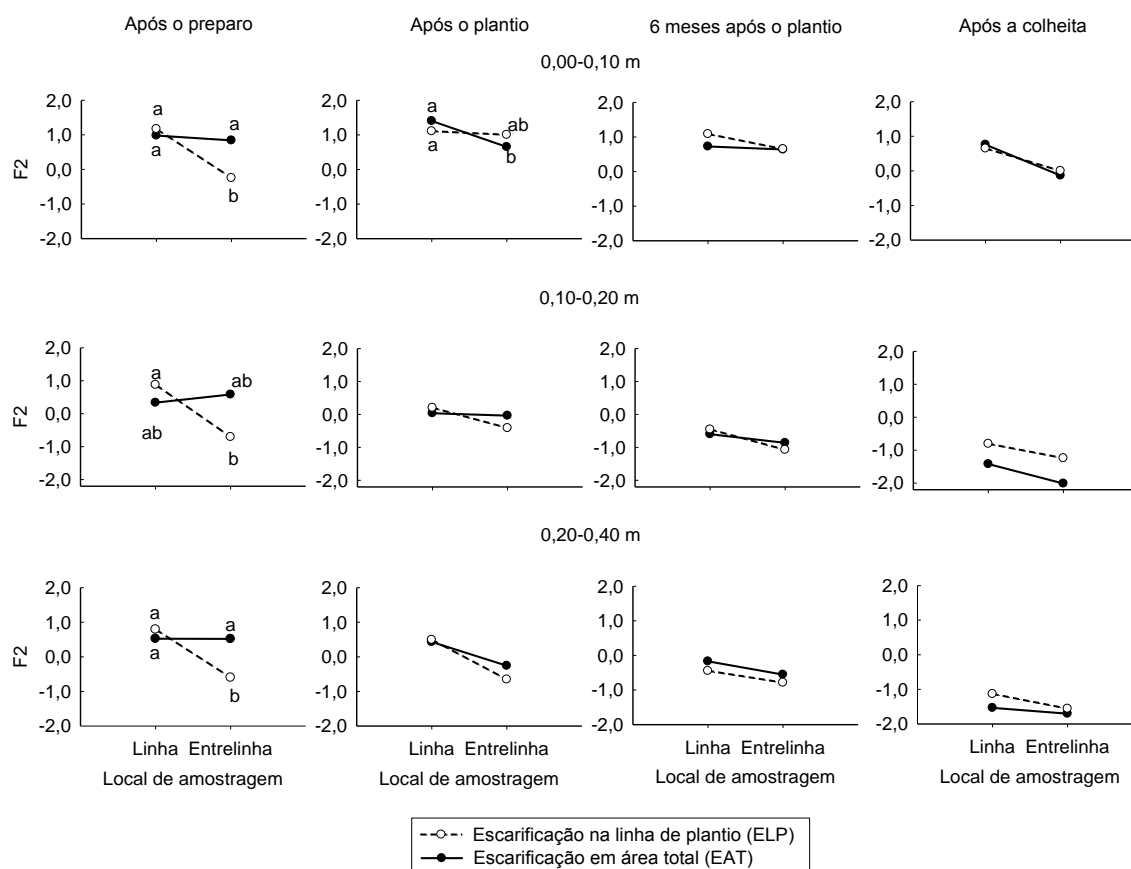
A baixa agregação e estabilidade dos agregados que ocorrem na camada superficial do solo desse experimento, chama a atenção em relação ao manejo que se deve adotar na área. A razão disso está no fato de que esse solo apresenta uma alta suscetibilidade à erosão hídrica, evidenciada pela reduzida agregação nas camadas superficiais. Associado a isso, o maior volume de microporos e, o gradiente

textural presente no Argissolo com drenagem lenta na camada subsuperficial, em função do aumento do teor de argila em profundidade (com início do horizonte B a 0,35 m de profundidade), pode contribuir no aumento do escoamento superficial de água, devido a menor velocidade de infiltração no perfil do solo, aumentando as perdas de solo por erosão. Nesse sentido, as técnicas de manejo e conservação do solo e o menor revolvimento durante o seu preparo e, a manutenção dos resíduos vegetais sobre a superfície são estratégias importantes para diminuir as perdas de solo por erosão e manter a capacidade produtiva deste solo.

Os resultados dos valores de F, obtidos pela análise de variância, mostram que houve efeito significativo ( $p < 0,05$ ) da interação escarificação x local de amostragem para o F2, nas camadas 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m de profundidade após o preparo do solo (Tabela 8). Após o plantio, o efeito significativo ( $p < 0,05$ ) da interação foi verificado somente na camada de 0,00-0,10 m. E aos seis meses após o plantio e, após a colheita da cana, não houve mais efeito da escarificação sobre o F2 em todas as camadas amostradas.

Após o preparo do solo, nas camadas de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m os menores valores de escore fatorial para o F2 foram observados na entrelinha da área ELP em comparação aos demais tratamentos com escarificação (linha da área ELP e linha e entrelinha de plantio da área EAT) (Figura 7).

Na interpretação do F2, denominado de processo de alteração na relação massa – volume do solo, o tratamento com valor de escore fatorial mais próximo de +2,0, indica que o solo apresenta maior volume de macroporos e menores valores de Ds e RP. E quando os valores de escore fatorial tendem para -2,0, ocorre o processo inverso (Tabela 7 e Figura 5). Portanto, como a entrelinha da área ELP não foi submetida à escarificação, a sua estrutura não foi modificada. Por outro lado, nas áreas escarificadas houve alterações que provocaram mudanças na relação massa-volume do solo, resultando em maiores valores de escores fatoriais para o F2, por causa do aumento no volume de macroporos e redução de valores de Ds e RP.



**Figura 7.** Desdobramento da interação escarificação x local de amostragem para F2 (escore fatorial) nas camadas de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m de profundidade do Argissolo, avaliado em quatro épocas de amostragem.

As mudanças que ocorreram nos atributos físicos do solo após a escarificação, são conseqüências dos efeitos das hastes do escarificador durante a operação de preparo, que promoveram a mobilização do solo com rupturas dos agregados nos seus pontos de resistência, alterando a estrutura do solo. Esse resultado é semelhante aos obtidos em outros experimentos relatados na literatura. Em experimento realizado por Rosa et al., (2011), verificou-se que o efeito da escarificação em Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico aumentou de 7,03 a 10,47  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  o volume de macroporosidade e reduziu de 1,83 a 1,74  $\text{g cm}^{-3}$  a Ds na camada de 0,23-0,26 m. Prevedello et al. (2013) em Argissolo Vermelho distrófico arênico verificaram após a escarificação a redução de 1,48 a 1,38 nos valores de Ds na camada de 0,00-0,10 m, sendo que esse efeito não persistiu aos 12 meses após a escarificação nas camadas de 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m de profundidade. Resultado contrário foi observado por Nagahama et al. (2016), ao avaliar o efeito da escarificação sobre os atributos físicos

do Argissolo Amarelo distrófico (argila= 90 g kg<sup>-1</sup> e areia= 878 g kg<sup>-1</sup>), não verificaram efeito benéfico da escarificação do solo sobre o volume de poros, Ds e RP nas camadas de 0,20 m a 0,40 m, observando-se apenas a redução de RP na camada de 0,00-0,10 m. Lana et al. (2017) avaliando o efeito de sistemas de preparo do solo sobre a qualidade física de Latossolo Vermelho Amarelo distrófico cultivado com cana-de-açúcar (argila = 480 g kg<sup>-1</sup> e areia = 361 g kg<sup>-1</sup>), verificaram que no solo preparado com a escarificação, após o plantio a condição física foi semelhante à área cultivada com cana-de-açúcar sem operação de preparo do solo. Segundo os autores, isso ocorreu devido a haste do sulcador na operação de plantio utilizado nas duas áreas, provocar uma mobilização até a camada 0,40 m de profundidade.

Os efeitos do manejo do solo sobre os atributos físicos, podem variar devido a diferentes fatores, tais como clima, textura do solo, camada avaliada, conteúdo de matéria orgânica, sistemas de cultivo, intensidade de tráfego de máquinas e época de amostragem do solo (Moraes et al., 2016). Isso pode levar a discrepâncias nas comparações entre os resultados de experimentos disponíveis na literatura, entre elas, observa-se o tempo de duração do efeito da escarificação do solo sobre os seus atributos físicos.

O efeito benéfico da escarificação, neste experimento, não foi observado após o plantio da cana-de-açúcar, verificando-se a ausência de diferença estatística significativa entre as linhas e entrelinhas de cultivo nas camadas de 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m (Figura 7); e na camada de 0,00-0,10 m, apesar de haver uma diferença significativa, do ponto de vista prático, o efeito da escarificação foi praticamente nulo.

A melhoria do solo após a escarificação, traduzida pela diminuição da RP e Ds e a elevação no volume de poros são importantes para o estabelecimento inicial e funcionamento do sistema radicular da cana-de-açúcar (Otto et al., 2011). Porém, neste experimento, o efeito na melhoria dos atributos foi efêmero e não persistiu após o plantio. Segundo Reichert et al. (2017), o efeito temporário da escarificação sobre os atributos físicos do solo em curto prazo, provavelmente é causado pela reconsolidação do solo que ocorre rapidamente em solos de textura arenosa a franco-argilo-arenoso. Drescher et al. (2016) afirmam que isso é um fenômeno natural do rearranjo das partículas do solo, e a persistência dos efeitos de intervenções mecânicas com a escarificação é reduzida em pouco tempo de cultivo, por causa de

ciclos de umedecimento e secagem no perfil do solo, promovendo a acomodação das partículas e dos agregados do solo. Silva et al. (2012) explicam que esses ciclos de umedecimento e secagem foram os principais responsáveis pela reconsolidação do solo e a curta persistência do efeito da escarificação em Latossolo Vermelho distrófico, resultando no aumento nos valores de Ds e grau de compactação do solo seis meses após a escarificação.

Conforme se verifica nos dados diários de precipitação pluvial (Figura 3), após o preparo do solo até o plantio (período compreendido de 17/02/2015 a 25/03/2015), ocorreram quatro eventos sem ocorrência de evento pluvial.

Nesse intervalo de tempo, infere-se que a reconsolidação do solo ocorreu pelo processo semelhante ao relatado por Busscher et al. (2002). Esses autores verificaram que a reconsolidação do solo franco-arenoso, após subsolagem, detectada pelo aumento dos valores de resistência mecânica à penetração, correlacionava-se com a quantidade acumulada de chuvas e com a água que se infiltrava no solo.

Esse fenômeno pode ser explicado pela teoria da consolidação do solo (Terzaghi, 1943), no qual a aplicação de uma tensão em solo saturado (nesse caso a tensão é exercida pela própria força interna do peso das camadas de solo sobre a camada subjacente) é suportada pelo somatório das forças contrárias exercidas pela água que ocupa o espaço poroso e as partículas do solo, ressaltando que a compressibilidade das partículas do solo e da água são nulas. Portanto, com a expulsão de parte da água que preenche os poros, ocorre o processo de transfêrencia gradual da pressão aplicada dos espaços vazios preenchidos com água para a estrutura do solo, provocando uma variação de volume por meio da redução do índice de vazios e, conseqüentemente, aumento sobre Ds e RP. Esse fenômeno, em solos arenosos, ocorre de forma mais rápida, comparada aos solos argilosos, pois a elevada permeabilidade permite que a água possa escoar mais rapidamente nesses solos (Hillel, 1998; Reichert et al., 2010)

A partir da amostragem realizada, seis meses após o plantio até a colheita da cana-de-açúcar, a condição física do solo permaneceu igual na linhas e entrelinhas de plantio, independentemente se ocorreu escarificação na linha de plantio ou em área total. Após a colheita da cana-de-açúcar, o tráfego da colhedora e do conjunto trator

e transbordo contribuíram para que os locais de amostragem apresentassem condição física igual. Ressaltando-se que, na cultura da cana-de-açúcar, o efeito do tráfego da colhedora e do veículo de transbordo usado na colheita mecanizada contribuem para a redução da qualidade física do solo ao longo do ciclo de cultivo da cultura (Oliveira et al., 2014; Vischi Filho et al., 2017).

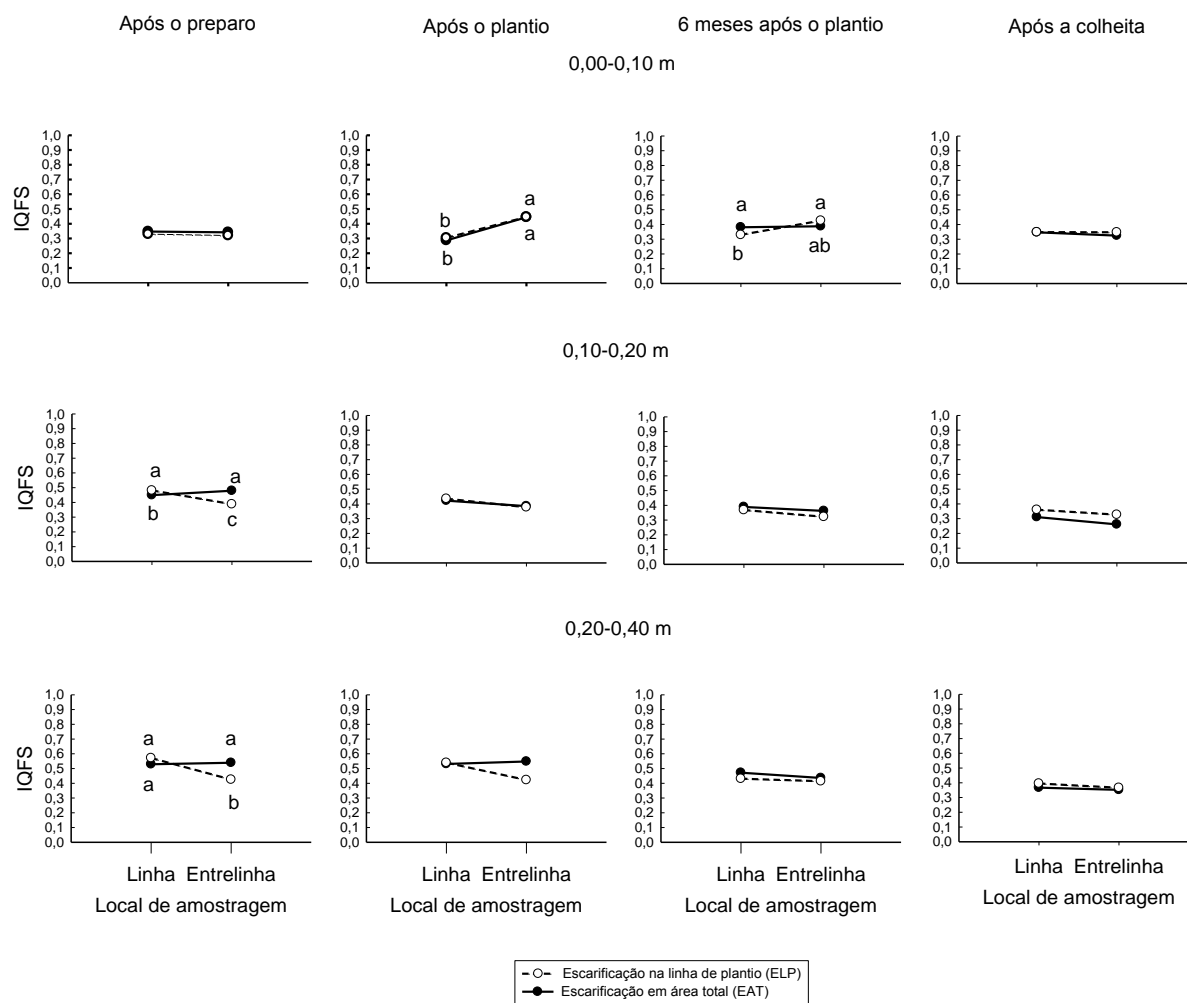
Os resultados de valores de F obtidos pela análise de variância (Tabela 8) mostram que houve efeito significativo ( $p < 0,05$ ) da interação escarificação x local de amostragem para o Índice de Qualidade Física do Solo (IQFS) após o preparo do solo nas camadas de 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m de profundidade. Seis meses após o plantio, a interação escarificação x local de amostragem foi significativa ( $p < 0,05$ ) somente na camada de 0,00-0,10 m. Após a colheita, em todas as camadas amostradas não houve efeito significativo ( $p > 0,05$ ) da interação escarificação x local de amostragem.

Após o preparo do solo, os locais que foram escarificados (linha de ELP e linha e entrelinha de EAT) apresentaram valores de IQFS estatisticamente maiores em relação ao local sem escarificação (entrelinha de ELP) (Figura 8).

Conforme foi discutido anteriormente para o F2 (indicador de manejo do solo), como a entrelinha da área ELP não foi escarificada, a sua estrutura não foi alterada, mantendo assim uma condição física do solo com elevados valores de Ds e RP e macroporosidade reduzida. Por outro lado, as áreas escarificadas apresentaram melhoria na condição física, devido à ruptura dos agregados do solo, com desagregação e rearranjo das partículas, provocando aumento na macroporosidade e redução nos valores de Ds e RP. Isso promoveu melhoria na qualidade física do solo e, conseqüentemente, aumentou os valores do IQFS.

Na análise do IQFS, se dois fatores extraídos forem significativos, a tendência entre eles é apresentar um valor de IQFS médio e sem diferença significativa entre os tratamentos estudados. Por essa razão, o valor de IQFS na camada de 0,00-0,10 m após o preparo do solo não apresentou diferença significativa entre as médias de escore fatorial.





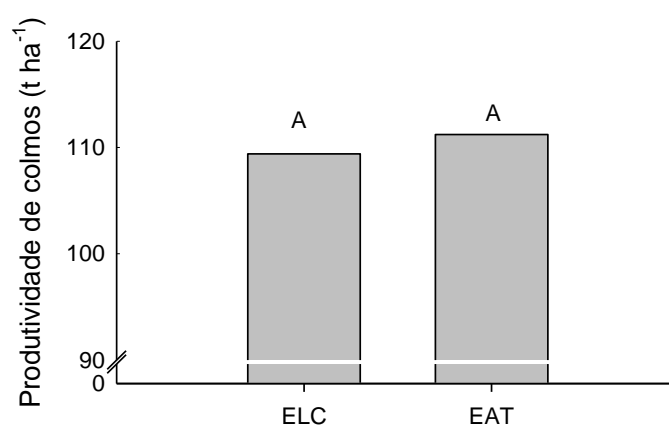
**Figura 8.** Desdobramento da interação escarificação x local de amostragem para índice de qualidade física do solo (IQFS) nas camadas de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m de profundidade do Argissolo avaliado em quatro épocas de amostragem.

Arcoverde et al. (2015), avaliando a qualidade física de solos agrícolas, verificaram que o índice de qualidade física do solo determinado, a partir da análise fatorial multivariada, foi menor naqueles solos com textura superficial arenosa, com baixa estabilidade de agregados, e baixa capacidade de retenção de água, categorizando os solos como qualidade regular àqueles na faixa de  $0,65 > \text{IQFS} > 0,35$ , representado por Argissolo, Neossolo, Latossolo e Planossolo. Os valores de IQFS, obtidos nas camadas até 0,40 m neste experimento, estiveram dentro da faixa obtida por Arcoverde et al. (2015), e também foram semelhantes ao obtido por Cherubin et al. (2016b) que obtiveram um índice de qualidade do solo igual a 0,47 em área de Argissolo cultivado com cana-de-açúcar.

Até seis meses após o plantio, houve diferenças significativas para o IQFS entre os tratamentos avaliados na camada de 0,00-0,10 m, em virtude das alterações já discutidas para o processo que ocorreu no F1, influenciadas pelo manejo e a desagregação do solo provocada pela ação das chuvas sobre a sua superfície. Desse modo, a linha de plantio apresentou valores de IQFS menores em relação à entrelinha, por causa do menor volume de microporos (Figura 7).

Após a colheita da cana-de-açúcar, essa diferença estatística não foi mais observada, com os valores de IQFS estatisticamente semelhantes em todos os tratamentos estudados e camadas amostradas. Isso foi resultante dos processos ocorridos no F1 e F2, influenciados pela reconsolidação do solo ao longo do tempo e a compressão provocada pelo tráfego da máquina colhedora, trator e transbordo, utilizados na colheita da cana-de-açúcar (Drescher et al., 2012; Oliveira et al., 2014). Portanto, a qualidade física da área com escarificação do solo na linha de plantio (ELP), até a primeira colheita, equiparou-se à área com escarificação em área total (EAT).

Essa qualidade do solo, semelhante entre as áreas com ELP e EAT resultou em valores de produtividade dos colmos estatisticamente iguais, com média de 110 t ha<sup>-1</sup> (Figura 9), indicando que a qualidade física do solo nas áreas de ELP e EAT propiciaram condições semelhantes para o crescimento das plantas de cana-de-açúcar.



**Figura 9.** Produtividade de colmos de cana-de-açúcar (t ha<sup>-1</sup>) em Argissolo submetido a escarificação na linha de plantio (ELP) e escarificação em área total (EAT).

Ressalta-se que, esta produtividade de colmos refere-se a cana-planta e, segundo o Centro de Tecnologia Canavieira, a variedade utilizada neste experimento, considerando as variações edafoclimáticas de cada região de cultivo, possui potencial para alcançar uma produtividade média de  $116 \text{ t ha}^{-1}$  no primeiro corte (CTC, 2018). Portanto, as produtividades alcançadas nas duas áreas foram abaixo da média de produtividade potencial da variedade CTC 4.

Gomes (2012) trabalhando com modelos de estimativa de produtividade de colmos para a região de Bauru (SP), em que as condições físicas de solo e clima são semelhantes a área deste experimento, verificou que, a variedade CTC 4 simulada pelo modelo DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer/CAGRO*), que integra o sistema solo, planta e atmosfera como fatores de análise, obteve estimativas de produtividades nos sistemas irrigado e sequeiro de  $140$  e  $108 \text{ t ha}^{-1}$ , respectivamente. Segundo o autor, a diferença entre as produtividades resultou do déficit hídrico na região estudada, no período de abril a setembro que, impactou negativamente a produtividade de colmos de cana-de-açúcar dos plantios realizados entre janeiro a março, para cana de ano e meio. Portanto, os resultados obtidos de produtividades neste experimento, abaixo do potencial que a variedade possui no primeiro corte, pode ser explicado pelo déficit hídrico entre os meses de junho a outubro de 2015, ocorrido na região onde o experimento foi realizado, conforme é mostrado no gráfico de balanço hídrico (Figura 3). Segundo Inman-Bamber e Smith (2005) na fase inicial de crescimento da cana-de-açúcar ocorre o alongamento do colmo e aumento na necessidade hídrica da cultura. Se nessa fase ocorrer estresse hídrico, a cultura sofrerá com redução na produtividade de colmos.

Com base nos resultados obtidos e nas condições edafoclimáticas e época de plantio deste experimento, dois pontos de vista agrônômicos são importantes a se destacar. Primeiro, se houver a escarificação do solo, a operação de plantio de cana-de-açúcar deverá ser imediatamente realizada. Pois, dependendo do tempo decorrido após a escarificação até o plantio, o volume e a intensidade de chuvas podem contribuir para reconsolidação do solo. Além disso, existe a necessidade de avaliar qual a consequência que a imobilização das entrelinhas de cultivo pode trazer para o solo ao longo dos anos de ciclo de cultivo, pois as máquinas utilizadas na colheita poderão causar compactação da área nas zonas trafegáveis, e diminuir a infiltração e

armazenamento de água. Nesse sentido, uma alternativa para contornar esse problema seria, após o término do ciclo produtivo da cultura, realizar uma alternância no preparo do solo com a escarificação. Em um ciclo produtivo nas linhas e em outro nas entrelinhas, permitindo, que a cada dois ciclos produtivo seja possível que toda a área de cultivo seja mobilizada pela escarificação do solo.

Como foi verificado que a escarificação apresentou efeito temporário, outro ponto importante é a substituição do preparo do solo pelo plantio direto dos toletes de cana-de-açúcar (sulcação direta sem preparo do solo, desde que, a condição física do solo não apresente compactação), pois, durante a abertura dos sulcos à ação mecânica das hastes da plantadora até 0,30 m de profundidade promove efeito de mobilização do solo semelhante ao seu preparo com escarificação.

## 5 CONCLUSÕES

O preparo do solo com escarificação na linha de plantio no Argissolo é uma alternativa que pode substituir o modelo atualmente utilizado com escarificação em área total. Uma vez que, não há diferença na qualidade física do solo e na produção de colmos da cana-de-açúcar.

A densidade do solo, a resistência mecânica à penetração e a macroporosidade foram os atributos físicos que melhor se destacaram como indicadores, para avaliar a qualidade física do solo.

## 6 REFERÊNCIAS

Abreu SL, Reichert JM, Reinert DJ (2004) Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 28:519–531. doi: 10.1590/S0100-06832004000300013

Andrews SS, Carroll C (2001). Designing a Soil Quality Assessment Tool for Sustainable. **Ecological Applications** 11:1573–1585. doi: 10.1890/1051-0761(2001)011[1573:DASQAT]2.0.CO;2

Andrews SS, Karlen DL, Mitchell JP (2002a) A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. **Agriculture, Ecosystems and Environment** 90:25–45. doi: 10.1016/S0167-8809(01)00174-8

Andrews SS, Mitchell JP, Mancinelli R, Karlen DL, Hartz TK, Horwath WR, Pettygrove GS, Scow KM, Munk DS (2002b) On-Farm Assessment of Soil Quality in California 's Central Valley. **Agronomy Journal** 94:12–23. doi: 10.2134/agronj2002.1200

Arcoverde NS, Salviano AM, Olszewski N, Melo SB de, Cunha TJF, Giongo V, Pereira J de S (2015) Qualidade física de solos em uso agrícola na região semiárida do estado da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 39:1473–1482. doi: 10.1590/01000683rbc20140282

Bangita B, Rao BKR (2012) Impacts of compaction relief treatments on soil physical properties and performance of sugarcane (*Saccharum spp.*) under zonal tillage system. **Geoderma** 189–190:351–356. doi: 10.1016/j.geoderma.2012.07.002.

Barbieri JL, Alleoni LRF, Donzelli JL (1997) Avaliação agrônômica e econômica de sistemas de preparo do solo para cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 21:89–98. doi: 10.1590/S0100-06832005000600001

Biswas S, Hazra GC, Purakayastha TJ, Saha N, Mitran T, Singha Roy S, Basak N, Mandal B (2017) Establishment of critical limits of indicators and indices of soil quality in rice-rice cropping systems under different soil orders. **Geoderma** 292:34–48. doi: 10.1016/j.geoderma.2017.01.003

Bordonal R de O, Carvalho JLN, Lal R, Figueiredo EB de, Oliveira BG de, Scala Júnior NL (2018) Sustainability of sugarcane production in Brazil. A review. **Agronomy for Sustainable Development** 38:13. doi: 10.1007/s13593-018-0490-x

Brady NC, Weil RR (2013) Elementos da natureza e propriedades dos solos. Porto Alegre: Bookman, p. 128-129.

Brasil (2015) Portaria nº 75, de 05 de março de 2015. Fixa a partir da zero hora do dia 16 de março de 2015, o percentual obrigatório de adição de etanol anidro combustível à gasolina. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. Disponível em: <<http://sistemasweb.agricultura.gov.br/sislegis/action/detalhaAto.do?method=gravarAtoPDF&tipo=POR&numeroAto=00000075&seqAto=000&valorAno=2015&orgao=MAPA&codTipo=&desItem=&desItemFim=>>. Acesso em: 15 abr. 2018

Breemen N van, Buurman P (2002) Soil formation. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, p. 199-203.

Bronick CJ, Lal R (2005) Soil structure and management: a review. **Geoderma** 124:3–22. doi: 10.1016/j.geoderma.2004.03.005

Busscher WJ, Bauer PJ, Frederick JR (2002) Recompaction of a coastal loamy sand after deep tillage as a function of subsequent cumulative rainfall. **Soil Tillage Research** 68:49–57. doi: 10.1016/S0167-1987(02)00083-1

Calonego JC, Raphael JPA, Rigon JPG, Oliveira Neto L de, Rosolem CA (2017) Soil compaction management and soybean yields with cover crops under no-till and occasional chiseling. **European Journal of Agronomy** 85:31–37. doi: 10.1016/j.eja.2017.02.001

Camilotti F, Andrioli I, Dias FLF, Casagrande AA, Silva AR da, Mutton MA, Centurion JF (2005) Efeito prolongado de sistemas de preparo do solo com e sem cultivo de soqueira de cana crua em algumas propriedades físicas do solo. **Engenharia Agrícola** 25:189–198. doi: 10.1590/S0100-69162005000100021

Cavaliere KMV, Carvalho LA de, Silva AP da, Libardi PL, Tormena CA (2011) Qualidade física de três solos sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 35:1541–1550. doi: 10.1590/S0100-06832011000500008

Centurion JF, Freddi O da S, Aratani RG, Metzner AFM, Beutler AN, Andrioli I (2007) Influência do cultivo da cana-de-açúcar e da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de latossolos vermelhos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 31:199–209. doi: 10.1590/S0100-06832007000200002

CEPAGRI - centro de Pesquisas Agrometeorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura (2018) Clima dos Municípios Paulistas: a classificação climática de koeppen para o Estado de São Paulo. Disponível em: <<https://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima-dos-municipios-paulistas.html>>. Acesso em: 24 jul. 2018

Cherubin MR, Karlen DL, Cerri CEP, Franco ALC, Tormena CA, Davies CA, Cerri CC (2016a). Soil quality indexing strategies for evaluating sugarcane expansion in Brazil. **PLoS One** 11:1–26. doi: 10.1371/journal.pone.0150860

Cherubin MR, Karlen DL, Franco ALC, Tormena CA, Cerri CEP, Davies CA, Cerri CC (2016b) Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. **Geoderma** 267:156–168. doi: 10.1016/j.geoderma.2016.01.004

Claessen MEC (1997) Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro:Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 212 p.

CNA – Confederação Nacional da Agricultura (2017). Ativos da cana-de-açúcar: custo de produção de cana-de-açúcar na região Centro-Sul – Safra 2016/17. Disponível em: <<http://www.cnabrazil.org.br/boletins/ativos-cana-de-acucar-custo-de-producao-de-cana-de-acucar-na-regiao-centro-sul-safra-201617>> Acesso em: 15 mai. 2018.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento (2017) Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar. Disponível em: <[https://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/170420140431boletim\\_cana\\_portugues1%C2%BA%20levantamento,17-18](https://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/170420140431boletim_cana_portugues1%C2%BA%20levantamento,17-18)>. Acesso em: 20 abr. 2018.

Cortez JW, Alves AD da S, Moura MRD de, Olszewski N, Nagahama H de J (2011) Atributos físicos do argissolo amarelo do semiárido nordestino sob sistemas de preparo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 35:1207–1216. doi: 10.1590/S0100-06832011000400014

Costa EA, Goedert WJ, Gomes M (2006) Qualidade de solo submetido a sistemas de cultivo com preparo convencional e plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 41:1185–1191. doi: 10.1590/S0100-204X2006000700016

Costa MCG, Mazza JA, Vitti GC, Castro Jorge LA de (2007) Distribuição radicular, estado nutricional e produção de colmos e de açúcar em soqueiras de dois cultivares de cana-de-açúcar em solos distintos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 31:1503–1514. doi: 10.1590/S0100-06832007000600027

CTC - Centro de Tecnologia Canavieira (2018) Análise comercial da Variedade CTC 4. Disponível em: <<https://variedadesctc.com.br/produtos/ctc-4/>>. Acesso em: 11 abr. 2018.

Drescher MS, Eltz FLF, Denardin JE, Faganello A (2011) Persistência do efeito de intervenções mecânicas para a descompactação de solos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 35:1713–1722. doi: 10.1590/S0100-06832011000500026

Drescher MS, Eltz FLF, Denardin JE, Faganello A, Drescher GL (2012) Resistência à penetração e rendimento da soja após intervenção mecânica em latossolo vermelho sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 36:1836–1844. doi: 10.1590/S0100-06832012000600018

Drescher MS, Reinert DJ, Denardin JE, Gubiani PI, Faganello A, Drescher GL (2016) Duração das alterações em propriedades físico-hídricas de latossolo argiloso decorrentes da escarificação mecânica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 51:159–168. doi: 10.1590/S0100-204X2016000200008

Falleiro RM, Souza CM, Silva CSW, Sediyaama CS, Silva AA, Fagundes JL (2003) Influência dos sistemas de preparo nas propriedades químicas e físicas do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 27:1097–1104. doi: 10.1590/S0100-06832003000600014

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations (2000) Manual on integrated soil management and conservation soil practices. Roma: IITA, 214 p.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations (2017) The future of food and agriculture: Trends and challenges. Rome: FAO. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/a-i6583e.pdf>> Acesso em: 28 mai. 2018.

FAOSTAT (2017) Crop statistics. Rome: FAO. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>> Acesso em: 15 mai. 2018.

Garbiate MV, Vitorino ACT, Prado EAF do, Mauad M, Pellin DMP (2016) Hydrophysical Quality of an Oxisol and Sugarcane Yield in Chisel Plow-Based Sugarcane Ratoon Management. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 40:1–13. doi: 10.1590/18069657rbcS20150411

Girardello VC, Amado TJC, Nicoloso R da S, Hörbe T de AN, Ferreira A de O, Tabaldi FM, Lanza Nova ME (2011) Alterações nos atributos físicos de um latossolo vermelho sob plantio direto induzidas por diferentes tipos de escarificadores e o rendimento da soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 35:2115–2126. doi: 10.1590/S0100-06832011000600026

Gomes AWA (2012) Simulação da produtividade de cana-de-açúcar nas regiões nordeste e sudeste do Brasil, utilizando o modelo DSSAT. 67 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

Guo L, Sun Z, Ouyang Z, Han D, Li F (2017) A comparison of soil quality evaluation methods for Fluvisol along the lower Yellow River. **Catena**. 152:135–143. doi: 10.1016/j.catena.2017.01.015

Hair-Jr JF, Black WC, Babin BJ, Anderson RE, Tatham RL (2009) Análise multivariada de dados. Porto Alegre: Bookman, 688 p.

Hillel D (1998) Environmental Soil Physics. San Diego: Academic Press, 771 p.

Inman-Bamber NG, Smith DM (2005) Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research** 92:185–202. doi: 10.1016/j.fcr.2005.01.023



Kuhwald M, Blaschek M, Brunotte J, Duttmann R (2017) Comparing soil physical properties from continuous conventional tillage with long-term reduced tillage affected by one-time inversion. **Soil Use and Management** 33:611–619. doi: 10.1111/sum.12372

Lana RMQ, Domingues LA da S, Torres JLR, Mageste JG, Moraes ER de (2017) Soil physical attributes and productivity of sugarcane under different cropping systems in the savannah goiano. **Australian Journal of Crop Science** 11:149–155. doi: 10.21475/ajcs.17.11.02.p182

Landim PMB (2011) Análise estatística de dados geológicos multivariados. Oficina de. São Paulo: Oficina de textos, 208 p.

Lima RP de, León MJ de, Silva AR da (2013) Compactação do solo de diferentes classes texturais em áreas de produção de cana-de-açúcar. **Revista Ceres** 60:16–20. doi: 10.1590/S0034-737X2013000100003

Lozano LA, Soracco CG, Villarreal R, Ressia JM, Sarli GO, Filgueira RR (2016) Soil physical quality and soybean yield as affected by chiseling and subsoiling of a no-till soil. **Revista Brasileira Ciência do Solo** 40:1–12. doi: 10.1590/18069657rbc20150160

Martins-Filho M V, Liccioti TT, Pereira GT, Marques Júnior J, Sanchez RB (2009) Perdas de solo e nutrientes por erosão num Argissolo com resíduos vegetais de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola** 29:8–18. doi: 10.1590/S0100-69162009000100002

Martins-Filho MV, Siqueira DS, Marques Júnior J (2015) Preparo dos solos tropicais: a importância de se conhecer a variabilidade dos atributos do solo. In: Belardo GC, Cassia MT, Silva RP (Eds.) **Processos agrícolas e mecanização da cana-de-açúcar**. Jaboticabal: SBEA, p. 149–176

Materechera SA, Dexter AR, Alston AM (1991). Penetration of very strong soils by seedling roots of different plant species. **Plant and Soil** 135:31–41. doi: 10.1007/BF00014776

Mazurana M, Levien R, Müller J, Conte O (2011) Sistemas de preparo de solo: Alterações na estrutura do solo e rendimento das culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 35:1197–1206. doi: 10.1590/S0100-06832011000400013

Moitinho MR, Padovan MP, Bicalho E da S, Ferraudo AS, Teixeira DDB, Bahia ASR de S, Pinheiro DP, Vasquez LN, Scala Jr NL (2018) Short-Term Soil CO<sub>2</sub> Emission and Soil Attributes Under Contrasting Sugarcane Cultivars. **Sugar Tech** 20:1-11 doi: 10.1007/s12355-018-0595-1

Moraes MT de, Debiassi H, Carlesso R, Franchini JC, Silva VR da, Luz FB da (2016) Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades in the subtropical region of Brazil. **Soil and Tillage Research** 155:351–362. doi: 10.1016/j.still.2015.07.015

Muendo PN, Milstein A, Dam AA Van, Gamal E, Stoorvogel JJ, Verdegem MCJ (2006) Exploring the trophic structure in organically fertilized and feed-driven tilapia culture environments using multivariate analyses. **Aquaculture research** 37:151–163. doi: 10.1111/j.1365-2109.2005.01413.x

Mukherjee A, Lal R, Witkowska-Walczak B, Alekseev A, Hajnos M (2014) Comparison of Soil Quality Index Using Three Methods. **Plos One** 9:e105981. doi: 10.1371/journal.pone.0105981

Nagahama H de J, Granja GP, Cortez JW, Ramos RL, Arcoverde SNS (2016) Efeitos da escarificação mecânica nos atributos físicos do solo e agronômicos do capim elefante. **Revista Ceres** 63:741–746. doi: 10.1590/0034-737X201663050020

Nicoloso R da S, Amado TJC, Schneider S, Lanzasova ME, Girardello VC, Bragagnolo J (2008) Eficiência da escarificação mecânica e biológica na melhoria dos atributos físicos de um latossolo muito argiloso e no incremento do rendimento de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 32:1723–1734. doi: 10.1590/S0100-06832008000400037

Nimmo JR, Perkins KS (2002) Aggregate stability and size distribution. In.: Dane JH, Topp C (Eds.) **Methods of soil analysis: Physical methods**. Madison: Soil Science Society of America, p. 317–328.

Nunes MR, Denardin JE, Pauletto EA, Faganello A, Pinto LFS (2015) Effect of soil chiseling on soil structure and root growth for a clayey soil under no-tillage. **Geoderma** 259–260:149–155. doi: 10.1016/j.geoderma.2015.06.003

OCDE/FAO - Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico/Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (2015) Perspectivas agrícolas no Brasil: desafios da agricultura brasileira 2015-2024. Roma: FAO. Disponível em: <[https://www.oecd-ilibrary.org/agriculture-and-food/oecd-fao-agricultural-outlook-2015\\_agr\\_outlook-2015-en](https://www.oecd-ilibrary.org/agriculture-and-food/oecd-fao-agricultural-outlook-2015_agr_outlook-2015-en)> Acesso em: 27 mai. 2018.

OCDE/FAO - Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico/Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (2017) Agricultural Outlook 2017-2026. Paris: OECD Publishing. Disponível em:< [https://www.oecd-ilibrary.org/agriculture-and-food/oecd-fao-agricultural-outlook-2017-2026\\_agr\\_outlook-2017-en](https://www.oecd-ilibrary.org/agriculture-and-food/oecd-fao-agricultural-outlook-2017-2026_agr_outlook-2017-en)> Acesso em: 27 mai. 2018.

Oertel C, Matschullat J, Zurba K, Zimmermann F, Erasmi S (2016) Greenhouse gas emissions from soils—A review. **Chemie der Erde - Geochemistry** 76:327–352. doi: 10.1016/j.chemer.2016.04.002

Oliveira APP de, Lima E, Anjos LHC dos, Zonta E, Pereira MG (2014) Sistemas de colheita da cana-de-açúcar: conhecimento atual sobre modificações em atributos de solos de tabuleiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 18:939–947. doi: 10.1590/1807-1929/agriambi.v18n09p939-947

Ortiz PFS, Rolim MM, Lima JLP de, Pedrosa EMR, Dantas MSM, Tavares UE (2017) Physical qualities of an Ultisol under sugarcane and Atlantic forest in Brazil. **Geoderma Regional** 11:62-70. doi: 10.1016/j.geodrs.2017.10.001

Otto R, Silva AP, Franco HCJ, Oliveira ECA, Trivelin PCO (2011) High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. **Soil and Tillage Research** 117:201–210. doi: 10.1016/j.still.2011.10.005

Pacheco EP, Cantalice JRB (2011) Compressibilidade, resistência a penetração e intervalo hídrico ótimo de um Argissolo Amarelo cultivado com cana-de-açúcar nos Tabuleiros Costeiros de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 35:403–415. doi: 10.1590/S0100-06832011000200010

Paulino AF, Medina CC, Azevedo MCB, Silveira KRP, Trevisan AA, Murata IM (2004) Escarificação de um latossolo vermelho na pós-colheita de soqueira de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 28:911–917. doi: 10.1590/S0100-06832004000500013

Perecin D (2008) Experimentação com cana-de-açúcar. In.: Miranda ACMVD, Landell MGA (Eds.) **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, p. 809–819.

Perecin D, Ferraudo GM, Alberto C, Azania M, Schiavetto AR (2015) Statistical Analysis for Correlated Paired-plot Designs. **American Journal of Experimental Agriculture** 9:1–7. doi: 10.9734/AJEA/2015/20722

Pires LF, Borges JAR, Rosa JA, Cooper M, Heck RJ, Passoni S, Roque WL (2017) Soil structure changes induced by tillage systems. **Soil and Tillage Research** 165:66–79. doi: 10.1016/j.still.2016.07.010

Prevedello J, Kaiser DR, Reinert DJ, Vogelmann ES, Fontanela E, Reichert JM (2013) Manejo do solo e crescimento inicial de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden em Argissolo. **Ciência Florestal** 23:129–138. doi: 10.5902/198050988447

Raiesi F (2017) A minimum data set and soil quality index to quantify the effect of land use conversion on soil quality and degradation in native rangelands of upland arid and semiarid regions. **Ecological Indicators** 75:307–320. doi: 10.1016/j.ecolind.2016.12.049

Raiesi F, Kabiri V (2016) Identification of soil quality indicators for assessing the effect of different tillage practices through a soil quality index in a semi-arid environment. **Ecological Indicators** 71:198–207. doi: 10.1016/j.ecolind.2016.06.061

Reichert JM, Brandt AA, Rodrigues MF, da Veiga M, Reinert DJ (2017) Is chiseling or inverting tillage required to improve mechanical and hydraulic properties of sandy clay loam soil under long-term no-tillage? **Geoderma** 301:72–79. doi: 10.1016/j.geoderma.2017.04.012

Reichert JM, Reinert DJ, Braida JA (2003) Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência e Ambiente**. 27:29–48.

Reichert JM, Reinert DJ, Suzuki LEAS, Horn R (2010) Mecânica do solo. In.: Lier Q de J van (Ed.) **Física do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 29–102.

Ribeiro KD, Menezes SM, Mesquita MDGBDF, Sampaio FDMT (2007) Propriedades físicas do solo, influenciadas pela distribuição de poros, de seis classes de solos da região de Lavras-MG. **Ciência e Agrotecnologia** 31:1167–1175. doi: 10.1590/S1413-70542007000400033

Ros CO da, Secco D, Fiorin JE, Petrere C, Cadore MA, Pasa L (1997) Manejo do solo a partir de campo nativo: efeito sobre a forma e estabilidade da estrutura ao final de cinco anos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 21:241–247.

Rosa DP da, Reichert JM, Mentges MI, Barros CAP, Reinert DJ, Vieira DA (2011) Cultivo mínimo: efeito da compactação e deformação abaixo da atuação da ponteira do subsolador. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 15:1199–1205. doi: 10.1590/S1415-43662011001100014

Rossetti KD V, Centurion JF (2015) Estoque de carbono e atributos físicos de um Latossolo em cronossequência sob diferentes manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 19:252–258. doi: 10.1590/1807-1929/agriambi.v19n3p252-258

Sá MAC de, Santos Junior J de DG dos, Franz CAB, Rein TA (2016) Qualidade física do solo e produtividade da cana-de-açúcar com uso da escarificação entre linhas de

plantio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 51:1610–1622. doi: 10.1590/S0100-204X2016000900061

Santana AC de (2007) Análise do Desempenho Competitivo das Agroindústrias de Polpa de Frutas do estado do Pará. **Revista de Economia e Agronegócio** 45:495–524. doi: 10.1590/S0103-20032007000300009

Santos HG, Jacomine, PKT, Anjos, LHC dos, Oliveira, VA de, Lumbreras, JF, Coelho, MR, Almeida JA de, Cunha TJF, Oliveira JB de (Eds.) (2013) Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília: EMBRAPA, 353p.

Scala Júnior NL, Figueiredo EB de, Panosso AR (2012) A review on soil carbon accumulation due to the management change of major Brazilian agricultural activities. **Brazilian Journal of Biology** 72:775–785. doi: 10.1590/S1519-69842012000400012

Schneider F, Don A, Hennings I, Schmittmann O, Seidel SJ (2017) The effect of deep tillage on crop yield – What do we really know? **Soil and Tillage Research** 174:193–204. doi: 10.1016/j.still.2017.07.005

Secco D, Orlando C, Ros D, Koefender J (2005) Atributos físicos e produtividade de culturas em um Latossolo Vermelho argiloso sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 29:407–414. doi: 10.1590/S0100-06832005000300011

Silva SGC, Silva ÁP da, Giarola NFB, Tormena CA, Sá JC de M (2012) Temporary effect of chiseling on the compaction of a Rhodic Hapludox under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 36:547–555. doi: 10.1590/S0100-06832012000200024

Six J, Paustian K (2014) Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool. **Soil Biology and Biochemistry** 68:A4–A9. doi: 10.1016/j.soilbio.2013.06.014

Soracco CG, Lozano LA, Villarreal R, Palancar TC, Collazo DJ, Sarli GO, Filgueira RR (2015) Effects of compaction due to machinery traffic on soil pore configuration. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 39:408–415. doi: 10.1590/01000683rbc20140359

Terzaghi K (1943) Theoretical soil mechanics. New York: Wiley, 510 p.

Tisdall JM, Oades JM (1982) Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science** 33:141–163. doi: 10.1111/j.1365

Tormena CA, Silva AP, Libardi PL (1998) Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um latossolo roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 22:573–581. doi: 10.1590/S0100-06831998000400002

Torres JLR, Silva VR e, Assis RL de, Souza ZM de, Silva DMV da, Tamburús AY (2016) Soil physical quality after the fifth and sixth harvest of sugarcane in Brazilian Cerrado. **Australian Journal of Crop Science** 10:1306–1311. doi: 10.21475/ajcs.2016.10.09.p7776

Vasu D, Singh SK, Ray SK, Duraisami VP, Tiwary P, Chandran P, Nimkar AM, Anantwar SG (2016) Soil quality index (SQI) as a tool to evaluate crop productivity in semi-arid Deccan plateau, India. **Geoderma** 282:70–79. doi: 10.1016/J.GEODERMA.2016.07.010

Vezzani FM, Mielniczuk J (2011) Agregação e estoque de carbono em argissolo submetido a diferentes práticas de manejo agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 35:213–223. doi: 10.1590/S0100-06832011000100020

Vischi Filho OJ, Souza ZM de, Souza GS de, Silva RB da, Torres JLR, Lima ME de, Tavares RLM (2017) Physical attributes and limiting water range as soil quality indicators after mechanical harvesting of sugarcane. **Australian Journal of Crop Science** 11:169–176. doi: 10.21475/ajcs.17.11.02.p215

Voltarelli MA, Silva RP da, Cassia MT, Daloia JGM, Paixão CSS (2017) Qualidade do corte basal de cana-de-açúcar efetuado por facas de diferentes angulações e revestimentos. **Revista Ciência Agronômica** 48:438–447. doi: 10.5935/1806-6690.20170051

Xu X, Nieber JL, Gupta SC (1992) Compaction Effect on the Gas Diffusion Coefficient in Soils. **Soil Science Society of America Journal** 56:1743–1750. doi: 10.2136/sssaj1992.03615995005600060014x

Yeomans JC, Bremmer JM (1988) A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis** 19:1467–1476. doi: 10.1080/00103628809368027