



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**ITALLO DIRCEU COSTA SILVA**

**ATRIBUTOS DO SOLO INFLUENCIADOS PELA  
MANUTENÇÃO DA PALHA EM ÁREA DE CANA-  
DE-AÇÚCAR SOB DIFERENTES TIPOS DE SOLOS**

CAMPINAS

2020

**ITALLO DIRCEU COSTA SILVA**

**ATRIBUTOS DO SOLO INFLUENCIADOS PELA  
MANUTENÇÃO DA PALHA EM ÁREA DE CANA-  
DE-AÇÚCAR SOB DIFERENTES TIPOS DE SOLOS**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Agrícola, da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, na Área de Gestão de Sistemas na Agricultura e Desenvolvimento Rural.

Orientador: Prof. Dr. Zigomar Menezes de Souza

Coorientadora: Dra. Camila Viana Vieira Farhate

ESTE TRABALHO CORRESPONDE À  
VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO  
DEFENDIDA PELO ALUNO ITALLO  
DIRCEU COSTA SILVA, E ORIENTADO  
PELO PROF. DR. ZIGOMAR MENEZES DE  
SOUZA.

CAMPINAS

2020

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

Si38a Silva, Itallo Dirceu Costa, 1992-  
Atributos do solo influenciados pela manutenção da palha em área de cana-de-açúcar sob diferentes tipos de solo / Itallo Dirceu Costa Silva. – Campinas, SP : [s.n.], 2020.

Orientador: Zigomar Menezes de Souza.  
Coorientador: Camila Viana Vieira Farhate.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Solos. 2. Palha. 3. Cana-de-açúcar. 4. Biocombustíveis. 5. Solo - Conservação. I. Souza, Zigomar Menezes de, 1970-. II. Farhate, Camila Viana Vieira, 1989-. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Soil attributes influenced by the maintenance of straw in sugar cane area under different types of soil

**Palavras-chave em inglês:**

Soils

Straw

Sugarcane

Biofuels

Soil - Conservation

**Área de concentração:** Gestão de Sistemas na Agricultura e Desenvolvimento Rural

**Titulação:** Mestre em Engenharia Agrícola

**Banca examinadora:**

Zigomar Menezes de Souza [Orientador]

Edson Eiji Matsura

Rafael Montari

**Data de defesa:** 20-02-2020

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia Agrícola

**Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)**

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0001-8186-9899>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/6766024683605582>

Este exemplar corresponde à redação final da **Dissertação de Mestrado** defendida por **Itallo Dirceu Costa Silva**, aprovada pela Comissão Julgadora em 20 de Fevereiro de 2020, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

**FEAGRI**

---

**Prof. Dr. Zigomar Menezes de Souza – Presidente e Orientador**

---

**Dr. Rafael Montanari – Membro Titular**

---

**Dr. Edson Eiji Matsura – Membro Titular**

Faculdade de  
**Engenharia Agrícola**  
Unicamp

**A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica da discente.**

## **DEDICATÓRIA**

Dedico aos meus pais, Itamar e Lourdes, ao meu irmão, Rafael e minha irmã, Ithamara, que sempre me apoiaram e estiveram ao meu lado durante essa jornada.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus, pelo dom da vida, por me iluminar e proteger em todos os meus dias vividos. Que continue me abençoando e conduzindo para o melhor caminho.

Aos meus pais, Itamar da Silva e Maria de Lourdes Costa Silva, que abriram mão dos seus sonhos para que eu pudesse realizar os meus. Sempre serão meus exemplos de inspiração, princípios e valores. Serei sempre grato a vocês.

Ao meu irmão, Rafael Costa Silva, que apesar da distância sempre esteve ao meu lado e torcendo por mim. À minha irmã, Ithamara Costa Silva, que mesmo morando em outro país, sempre esteve orando e me aconselhando por meio da fé cristã. À minha prima, Raithanha, pelo companheirismo e conselhos enquanto estivemos juntos.

À minha madrinha, Maria Lúcia Mendes, que me acompanhou e esteve presente me apoiando durante o mestrado. À minha Tia Lindalva pelo carinho e por torcer por mim. À minha Tia Maria pelo amor, carinho e por todas as orações em minha trajetória longe de casa. Aos meus primos Raifran e Samia que viveram comigo nessa jornada em São Paulo, me dando suporte, apoio e atenção. Serei sempre grato a todos!

Ao meu orientador, Prof. Dr. Zigomar Menezes de Souza, pela oportunidade e confiança em me orientar no curso de mestrado. Tomarei como exemplo para minha vida toda forma e dedicação de trabalho em conjunto. Um exemplo de orientação!

À minha coorientadora Dra. Camila Viana Vieira Farhate pela amizade, atenção, paciência, ensinamentos da vida profissional e cristã, além da intensa orientação na pesquisa.

Aos meus amigos de laboratório Camila, Ingrid, Mayara, Juca, Diego, Leila, Vagner, Chris, Cecília e Marina, pelo companheirismo durante essa trajetória. Foi bem melhor com vocês.

Aos amigos Wesley e Rosa e o grupo amor e graça, que fazendo parte do meu ciclo de amizade estiveram comigo nos momentos que mais precisei, me fortalecendo com conselhos e orações por meio da fé cristã, isso foi essencial para mim.

À Unicamp e FEAGRI pela infraestrutura fornecida, com agradecimento especial à Ritinha e Profa. Dra. Daniella, pelo exemplo de profissionalismo e bom coração. À FAPESP pela concessão da bolsa no processo 2013/02792-1. Este trabalho é resultado de muita dedicação, que não seria possível sem a ajuda de tantas pessoas. Sou imensamente grato a todos.

Meu muito obrigado!

## EPÍGRAFE

“A utopia está lá no horizonte. Me aproximo dois passos, ela se afasta dois passos. Caminho dez passos e o horizonte corre dez. Por mais que eu caminhe, jamais alcançarei. Para que serve a utopia? Serve para isso: Para que eu nunca deixe de caminhar”.

Eduardo Galeano

## RESUMO

A palha da cana-de-açúcar está inserida em um dos principais cenários agrícolas do Brasil, com a produção de bioetanol e açúcar. Além disso, a produtividade ideal das culturas depende das condições de manejo do solo, estoque de carbono, absorção de nutrientes e quantidade de água do solo. Nesse contexto, o objetivo principal deste trabalho foi avaliar o impacto de diferentes quantidades de palha mantidos na superfície do solo sobre o Intervalo Hídrico Ótimo e estoque de carbono em solos de classes texturais distintas cultivados com cana-de-açúcar. O projeto foi realizado no município de Quatá, centro-leste paulista e Iracemápolis, norte do estado de São Paulo. O delineamento experimental foi de blocos ao acaso, composto pelos tratamentos 0, 5, 10 e 15 Mg ha<sup>-1</sup> de palha com quatro repetições e as parcelas foram compostas por 08 linhas de cana-de-açúcar, com espaçamento de 1,5 m e 10 m de comprimento. A variedade utilizada foi a RB 96 6928. Em ambos os experimentos foram avaliados atributos físicos, granulometria (areia, silte e argila), densidade do solo (Ds), macroporosidade (Ma), resistência do solo à penetração (RP) e Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) e, os atributos químicos do solo, teor de carbono e estoque de carbono (Est. C). Independentemente do tipo de solo, a manutenção de diferentes quantidades de palha na superfície do solo não modificou os atributos físicos e estoque de carbono do solo durante os dois anos agrícolas. Em ambos os solos foi observado que maiores doses de palha promoveram maior produtividade, por exemplo, no primeiro ano agrícola, em área com solo de textura argilosa, a dose de 15 Mg ha<sup>-1</sup> apresentou produtividade máxima 23,8 Mg ha<sup>-1</sup> superior a dose 0 Mg ha<sup>-1</sup> e na área de solo com textura arenosa essa diferença foi da ordem de 20%. A quantidade de palha estabelecida em estudo não foi determinante para influenciar no IHO e na retenção de água do solo, com isso, observou-se que há uma tendência maior de perda da qualidade e estrutura do solo, levando à diminuição da produtividade da cana-de-açúcar. Considerando os diferentes benefícios da palha recomenda-se intensificar os estudos sobre a remoção da palha, sobretudo a longo prazo, a fim de compreender melhor os efeitos desta prática baseando-se nas características específicas das áreas estudadas.

**Palavras-chave:** Bioenergia, colheita mecanizada, solo de textura argilosa, solo de textura arenosa, manejo da palha.



## **ABSTRACT**

Sugarcane straw is inserted in one of the main agricultural scenarios in Brazil, with the production of bioethanol and sugar. In addition, the ideal crop productivity depends on soil management conditions, carbon stock, nutrient absorption and the amount of water in the soil. In this context, the main objective of this work was to evaluate the impact of different amounts of straw kept on the surface of the soil on the optimal water interval and carbon stock in soils of different textural classes cultivated with sugarcane. The project was carried out in Quatá, central-east of state of São Paulo and Iracemápolis, north of São Paulo. The experimental design was four blocks at random, composed of treatments 0, 5, 10 and 15 Mg ha<sup>-1</sup> of straw with four replications and the plots were composed of 8 lines of sugarcane, spacing 1.5 m wide and 10 m long. The variety used was the RB 96 6928. In both experiments, physical attributes (granulometry - sand, clay and silt; soil bulk density - D<sub>s</sub>; macroporosity - Ma, and soil resistance to penetration - RP), soil chemicals (carbon content and carbon stock - Est. C) and Optimal Water Range (IHO) were evaluated. Regardless of the type of soil, maintaining different amounts of straw on the soil surface did not change the physical attributes and carbon stock of the soil during the two agricultural years. In both soils it was observed that higher doses of straw promoted greater productivity, for example, in the first agricultural year, in an area with clayey soil, the dose of 15 Mg ha<sup>-1</sup> showed a maximum productivity of 23.8 Mg ha<sup>-1</sup> higher than the 0 Mg ha<sup>-1</sup> dose and in the soil area with sandy texture this difference was of the order of 20%. The amount of straw established in the study was not determinant to influence IHO and soil water retention, with that, it was observed that there is a greater tendency of loss of soil quality and structure, leading to decreased sugarcane productivity of sugarcane. Considering the different benefits of straw, it is recommended to intensify studies on straw removal, especially in long-term periods, in order to better understand the effects of this practice based on the specific characteristics of the studied areas.

**Keywords:** Bioenergy, mechanized harvesting, clayey soil, sandy soil, straw management.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Mapa de localização dos municípios Quatá e Iracemápolis em relação ao estado de São Paulo, Brasil.....	21
<b>Figura 2.</b> Temperatura mínima, máxima, média e precipitação mensal do município de Quatá-SP. (A) – (1991-2018) e do município de Iracemápolis-SP (B) – (1995-2018).....	22
<b>Figura 3.</b> Delineamento experimental para avaliação da decomposição de palha de cana-de-açúcar. Adaptado de Santos (2016). ....	23
<b>Figura 4.</b> Esquema de amostragem de solo nas profundidades de 0,00-0,10 e 0,10-0,30 m, nas áreas experimentais localizadas nos municípios de Iracemápolis e Quatá no estado de São Paulo. Adaptado de Santos (2016).....	29
<b>Figura 5.</b> Mapa de localização dos municípios de Quatá e Iracemápolis em relação ao estado de São Paulo, Brasil.....	45
<b>Figura 6.</b> Temperatura mínima, máxima, média e precipitação mensal do município de Quatá-SP. (A) – (1991-2018) e do município de Iracemápolis-SP (B) – (1995-2018).....	45
<b>Figura 7.</b> Valores médios de densidade do solo ( $\text{Mg m}^{-3}$ ) em área submetida a diferentes níveis de palha de cana-de-açúcar (0, 5, 10 e $15 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) mantidos na superfície do solo, em área de textura argilosa e arenosa. *Letras minúsculas correspondem solo de textura argilosa e maiúsculas correspondem ao solo de textura arenosa. *Os valores médios caracterizados pela mesma letra não diferiram significativamente de acordo com o teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). ....	49
<b>Figura 8.</b> Valores médios de porosidade do solo em área submetida a diferentes níveis de palha de cana-de-açúcar (0, 5, 10 e $15 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) mantidos na superfície do solo, em Latossolo Vermelho Eutroférico e Álico (textura argilosa e arenosa, respectivamente). *Os valores médios caracterizados pela mesma letra não diferiram significativamente de acordo com o teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). ....	51
<b>Figura 9.</b> Valores médios da resistência do solo à penetração em área submetida a diferentes níveis de palha de cana-de-açúcar (0, 5, 10 e $15 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) mantidos na superfície do solo, em solo solo com textura argilosa e arenosa. *Os valores médios caracterizados pela mesma letra não diferiram significativamente de acordo com o teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). ....	52
<b>Figura 10.</b> Estoque de carbono do solo para os diferentes níveis de palha de cana-de-açúcar (0, 5, 10 e $15 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) mantidos na superfície do solo, nas profundidades de 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m em Latossolo Vermelho Eutroférico e Álico (textura argilosa e arenosa respectivamente). * ns corresponde aos valores médios com diferenças não significativas de acordo com o teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). ....	53

<b>Figura 11.</b> Análise de componentes principais (PCA) com 95% de confiança para diferentes níveis de palha (0, 5, 10 e 15 Mg ha <sup>-1</sup> ) mantidos na superfície do solo nas camadas de 0,00-0,40 m em área com Latossolo Vermelho Eutroférico (textura argilosa) no município de Iracemápolis-SP. Macro = macroporosidade; Micro = microporosidade; Ds = densidade do solo; RP = resistência do solo à penetração; Est.C = estoque de carbono.....	54
<b>Figura 12.</b> Análise de componentes principais (CP) com 95% de confiança para diferentes níveis de palha (0, 5, 10 e 15 Mg ha <sup>-1</sup> ) mantidos na superfície do solo nas camadas de 0,00-0,40 m em área com Latossolo Vermelho Álico (textura arenosa). Macro = macroporosidade; Micro = microporosidade; Ds = densidade do solo; RP = resistência do solo à penetração; Est.C = estoque de carbono.....	55
<b>Figura 13.</b> Produtividade da cana-de-açúcar nos ciclos cana planta (safra 2013/14), na Figura “A” e soca (2014/15), na Figura “B”, sob a manutenção de 0, 5, 10 e 15 Mg ha <sup>-1</sup> de palha de cana-de-açúcar nos solos solo com textura argilosa e arenosa. *A Figura “A” corresponde aos dados do 1º ano agrícola dos solos de textura argilosa e arenosa; e a Figura “B” corresponde aos dados do 2º ano agrícola dos solos de textura argilosa e arenosa. Médias seguidas da mesma letra, não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade (P < 0,05).....	56
<b>Figura 14.</b> Mapa de localização dos municípios de Quatá e Iracemápolis em relação ao estado de São Paulo, Brasil.....	68
<b>Figura 15.</b> Temperatura mínima, máxima, média e precipitação mensal do município de Iracemápolis-SP. (A) – (1991-2018) e do município de Quatá-SP (B) – (1995-2018).....	69
<b>Figura 16.</b> Delineamento experimental para avaliação da decomposição de palha de cana-de-açúcar. Adaptado de Santos (2016).....	70
<b>Figura 17.</b> Conteúdo de água no solo nas camadas de 0,00-0,10 m e 0,10-0,30 m com os valores da capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e capacidade de água no solo (CAD) em Latossolo Vermelho Eutroférico argiloso (A) e Latossolo Vermelho Álico arenoso (B). .....	75
<b>Figura 18.</b> Intervalo Hídrico ótimo nas camadas de 0,00-0,10 m e 0,10-0,30 m em relação à densidade do solo em um Latossolo Vermelho Eutroférico argiloso sob cultivo de cana-de-açúcar em níveis de capacidade de campo (CC = -10 KPa), ponto de murcha permanente (PMP = -1500 kPa), porosidade de aeração (PA = 0,10 m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) e resistência do solo à penetração (RP = -2000 kPa). A área sombreada representa o IHO. ....	76
<b>Figura 19.</b> Intervalo Hídrico Ótimo do solo nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,30 m em relação à densidade do solo em um Latossolo Vermelho Álico arenoso sob cultivo de cana-de-açúcar em níveis de capacidade de campo (CC = -10 KPa), ponto de murcha permanente (PMP = -	

1500 kPa), porosidade de aeração ( $PA = 0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) e resistência do solo à penetração ( $RP = 2000 \text{ kPa}$ ). A área sombreada representa o IHO. .... 76

**Figura 20.** Produtividade da cana-de-açúcar nos ciclos cana planta (safra 2013/14), na Figura “A” e soca (safra 2014/15), na Figura “B”, sob a manutenção de 0, 5, 10 e 15  $\text{Mg ha}^{-1}$  de palha de cana-de-açúcar nos solos solo com textura argilosa e arenosa. Médias seguidas da mesma letra, não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade ( $P < 0,05$ ). .... 77

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Localização e características climáticas e de solo das áreas avaliadas nas duas usinas. .....	22
<b>Tabela 2.</b> Caracterização granulométrica do solo nas áreas implantadas em maio/junho de 2013 nas usinas localizadas no município de Iracemápolis (solo argiloso) e Quatá (solo arenoso) no estado de São Paulo. ....	24
<b>Tabela 3.</b> Caracterização química das áreas implantadas em maio/junho de 2013 nas usinas localizadas no município de Iracemápolis (solo argiloso) e Quatá (solo arenoso) no estado de São Paulo. ....	25
<b>Tabela 4.</b> Atributos físicos do solo nas camadas em estudo nas áreas implantadas em maio/junho de 2013 nas usinas localizadas no município de Iracemápolis (solo argiloso) e Quatá (solo arenoso) no estado de São Paulo. ....	26
<b>Tabela 5.</b> Caracterização das áreas experimentais localizada nos municípios de Iracemápolis (solo de textura argilosa) e Quatá (solo de textura arenosa), no estado de São Paulo, Brasil. .	46
<b>Tabela 6.</b> Atributos físicos do solo nas camadas em estudo nas áreas implantadas em maio/junho de 2013 em Latossolo Vermelho Eutroférico (solo argiloso) e Latossolo Vermelho Álico (solo arenoso) no estado de São Paulo. ....	74

## SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	16
1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA .....	16
2. HIPÓTESE DO ESTUDO .....	19
3. OBJETIVOS .....	19
3.1 Geral .....	19
3.2 Objetivos específicos .....	19
4. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	20
5. METODOLOGIA GERAL.....	21
5.1 Localização do experimento .....	21
5.2 Delineamento experimental e tratamentos .....	22
5.3 Descrição das áreas experimentais.....	23
5.4 Caracterizações das áreas experimentais .....	24
5.5 Plantio e adubação .....	26
5.6 Colheita .....	27
5.7 Avaliações de solo .....	27
5.8 Análises químicas do solo.....	28
5.9 Análises físicas do solo .....	28
5.10 Produtividade .....	32
6. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	32
6.1 Produção de cana-de-açúcar e utilização da palha no Brasil .....	32
6.2 Utilização da palha para produção de bioenergia .....	35
6.3 A palha de cana-de-açúcar e atributos físicos e químicos do solo .....	36
6.4 Intervalo Hídrico Ótimo e quantidade de água no solo.....	38
7 CAPÍTULO 2 – IMPACTO DA REMOÇÃO DA PALHA DE CANA-DE-AÇÚCAR EM DIFERENTES TIPOS DE SOLOS DO SUDESTE DO BRASIL .....	41
7.1 INTRODUÇÃO .....	43
7.2 MATERIAL E MÉTODOS .....	44
7.2.1 Descrição da área de estudo .....	44
7.2.2 Delineamento experimental .....	47
7.2.3 Amostragem de solo e análises dos atributos físicos e químicos.....	47
7.2.4 Estoque de carbono no solo .....	48
7.2.5 Produtividade da cana-de-açúcar .....	48
7.2.6 Análise estatística.....	48
7.3 RESULTADOS .....	49
7.3.1 Atributos físicos do solo .....	49
7.3.2 Estoque de carbono do solo .....	52
7.3.3 Análise multivariada dos atributos do solo com a remoção da palha em solo de textura argilosa e arenosa .....	53
7.3.4 Produtividade da cana-de-açúcar .....	55
7.4 DISCUSSÃO .....	57
7.4.1 Impactos da remoção da palha em curto prazo nos atributos físicos .....	57

7.4.2 Efeitos da manutenção da palha no estoque de carbono do solo .....	58
7.4.3 Produtividade da cana-de-açúcar .....	61
7.5 CONCLUSÕES .....	63
8. CAPÍTULO 3 – INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO EM ÁREAS DE CANA-DE- AÇÚCAR COM A MANUTENÇÃO DE DIFERENTES DOSES DE PALHA .....	64
8.1 INTRODUÇÃO .....	66
8.2 MATERIAL E MÉTODOS .....	67
8.2.1 Descrição da área experimental .....	67
8.2.2 Delineamento experimental e tratamentos .....	69
8.2.3 Coleta e análise de solo .....	70
8.2.4 Análise do intervalo hídrico ótimo do solo (IHO) .....	71
8.2.5 Produtividade da cultura de cana-de-açúcar .....	73
8.2.6 Análise dos dados .....	73
8.3 RESULTADOS .....	73
8.3.1 Atributos físicos do solo .....	73
8.3.2 Intervalo Hídrico Ótimo .....	75
8.3.3 IHO e produtividade da cana-de-açúcar .....	77
8.4 DISCUSSÃO .....	78
8.4.1 Atributos físicos do solo .....	78
8.4.2 Água disponível no solo .....	82
8.4.3 IHO e sua relação com os atributos físicos do solo e a água solo .....	84
8.4.4 IHO e produtividade de cana-de-açúcar .....	87
8.4.5 Sugestão metodológica de adaptação ao IHO .....	88
8.5 CONCLUSÕES .....	90
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	91

## CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

### 1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Atualmente a cana-de-açúcar, é produzida em mais de 115 países do mundo, em que o Brasil, China, Tailândia e Índia geram mais de 50% da produção total (FAO, 2019). Historicamente a cana-de-açúcar é uma das principais matérias-primas produzidas nos campos brasileiros e possui grande importância para o setor agrícola e de bioenergia do Brasil, sendo cultivada principalmente para a geração de etanol e açúcar, o que inclui oportunidades de empregos no cenário agrícola (CONAB, 2019a).

Atualmente, o EUA lidera a produção mundial de bioetanol baseada na cultura do milho (58%), seguido pelo Brasil baseado na produção de cana-de-açúcar (28%) (BORDONAL *et al.*, 2018). Nesse contexto, o Brasil exerce um papel importante na produção de bioetanol, principalmente no que diz respeito às perspectivas futuras relacionadas a esse produto (SATIRO *et al.*, 2017). O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar da América do Sul, ocupando pouco mais de nove milhões de hectares do centro-sul do país, para produção de biocombustível (CONAB, 2019b). Além disso, esta produção é realizada sob plantio convencional que geram impactos no clima, por conta da conversão de terras para plantio de cana-de-açúcar. Esta conversão apresenta alto potencial de intensificar as emissões de dióxido de carbono, afetando diretamente aspectos relacionados a mudanças climáticas (MELLO *et al.*, 2014).

O acordo climático de Paris é uma das principais políticas mundiais que tem como objetivo a mitigação das mudanças climáticas. Além disso, a Contribuições Nacionalmente Determinadas ou Nationally Determined Contribution (NDC), foi estabelecida como instrumento político para avaliar como os países estão contribuindo com a redução das emissões de gases de efeito estufa (HEIN *et al.*, 2018). Nesse sentido, o Brasil criou o RenovaBio, um programa pelo qual os produtores de bioenergia recebem títulos financeiros, à medida que o volume de produção e eficiência do bioetanol atende à legislação ambiental e, dessa forma contribui com a mitigação de mudanças no clima (GRASSI *et al.*, 2019).

Para contribuir com a mitigação das mudanças climáticas o Brasil tem como meta fortalecer o setor de biocombustíveis baseado na produção e colheita sustentável de cana-de-açúcar (LISBOA *et al.*, 2018). No passado, a cana-de-açúcar era colhida manualmente depois da queima, no entanto, por conta da intensa emissão de gases de efeito estufa (GEE), além de afetar a saúde dos produtores do campo, o Brasil passou a adotar a colheita mecanizada (CAPAZ *et al.*, 2013; GALDOS *et al.*, 2013; LISBOA *et al.*, 2018).

Nas últimas décadas, o cultivo de cana-de-açúcar vem passando por mudanças



tecnológicas, como a utilização de máquinas agrícolas de grande porte para a colheita devido a proibição da queima, porém, a intensificação da mecanização tem afetado os atributos físicos do solo, levando à compactação do solo (SOUZA *et al.*, 2014).

Por um lado, a intensificação da colheita de cana-de-açúcar mecanizada no Brasil nos últimos anos, direcionado pela legislação que não permite a queima, pode aumentar a compactação do solo em áreas de cana-de-açúcar. Por outro, essa prática de colheita gerou maiores quantidades de palha de cana-de-açúcar, em termos de volume, acima do solo. No estado de São Paulo, um dos principais estados produtores de cana-de-açúcar do país, a quantidade média de palha que permanece acima do solo varia de 10 a 30 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, o que significa grande potencial para diminuição do contato do rodado com a superfície do solo (SOANE, 1990; CASTIONI *et al.*, 2018) e ciclagem de nutrientes no solo (RAMOS *et al.*, 2016).

O sistema de cana crua possui propriedades que podem ser maximizadas com vistas a reduzir o processo de compactação e suas consequências (SOUZA *et al.*, 2015). Entre essas, destaca-se a contínua adição superficial de resíduos orgânicos, que formam uma cobertura morta que enriquece as camadas superficiais com matéria orgânica. Esses materiais orgânicos podem atuar de duas formas na atenuação do processo de compactação: primeiro, quando na superfície do solo, por dissiparem parte da pressão exercida pelos rodados das máquinas; segundo, quando incorporados e decompostos podem elevar o teor de matéria orgânica do solo, aumentando a elasticidade e resistência à compactação e, aumentando os limites de umidade em que o solo pode ser trabalhado mecanicamente (SOANE, 1990; CASTIONI *et al.*, 2018).

A palha da cana é caracterizada por partes verdes e folhas secas, em senescência, que por sua vez apresentam fortes potenciais como aumento do carbono no solo, menor exigência de fertilizantes devido à ciclagem de nutrientes, regulagem da umidade do solo e principalmente para o setor energético para geração de energia (RAZAFIMBELO *et al.*, 2006; CANELLAS *et al.*, 2010; MENANDRO *et al.*, 2017; CHERUBIN *et al.*, 2018). No Brasil, vêm sendo utilizado a palha da cana-de-açúcar principalmente para produção de energia e, por gerar benefícios aos atributos físicos, químicos e biológicos do solo (GRAHAM-ROWE, 2011; FRANZLUEBBERS, 2015; CARVALHO *et al.*, 2017a; STAVI *et al.*, 2016).

O conhecimento das doses adequadas de palha a serem retiradas acima do solo para geração de energia é fundamental para que haja sustentabilidade dos solos (CHERUBIN *et al.*, 2016). Carvalho *et al.* (2017b) avaliaram a contribuição da palha e raízes para determinar o estoque de carbono proveniente dos resíduos de cana-de-açúcar, milho e capim elefante e os efeitos da remoção de tais resíduos para o preparo do solo. A remoção da palha acima do solo

diminuiu o estoque de carbono no cultivo por rotação de milho e soja sob plantio convencional. Para a cana-de-açúcar, o estoque de carbono diminuiu quando a palha total acima do solo foi removida.

Nesse contexto, a remoção total deste material na superfície do solo, pode causar efeitos prejudiciais para os atributos químicos, físicos e biológicos do solo, como no teor de carbono, na ciclagem de nutrientes, nos processos de erosão, na vida biológica do solo, bem como, no Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) do solo. De acordo com Letey (1985), o IHO é a faixa de umidade do solo em que o limite estabelecido está relacionado com a capacidade de campo e ponto de murcha permanente, a capacidade mecânica de penetração e a porosidade de aeração do solo. De acordo com Lier e Gubiani (2015) o IHO caracteriza a faixa de conteúdo de água presente no solo em que o potencial matricial, a aeração e a mecânica do solo não seriam fatores limitantes para o crescimento das plantas.

A caracterização da resistência do solo à penetração em função da densidade e umidade do solo está diretamente relacionada ao IHO, que caracteriza o crescimento de culturas agrícolas (KLEIN, 2012). Um dos maiores desafios é a determinação do teor de resistência que limita as raízes das plantas, em que o limite mais utilizado é de 2,0 MPa. Gonçalves *et al.* (2014) estudaram o IHO, incluindo a resistência do solo à penetração, na avaliação da compactação em um latossolo do cerrado brasileiro cultivado com cana-de-açúcar e, verificaram que os efeitos negativos causados ao solo pelas máquinas agrícolas se limitaram à entrelinha de cultivo das soqueiras na parte superficial do solo. O IHO reduziu em valores próximos de zero com 20 passadas do trator, nas áreas com cana-de-açúcar.

Ainda que os resíduos sejam utilizados como um material de alto potencial para produção de bioenergia e etanol, ainda existem questionamentos sobre a quantidade de doses ideais para remoção da palha dos campos brasileiros (CARVALHO *et al.*, 2017b). No Brasil, ainda são escassos estudos que difundem o conhecimento sobre os efeitos da remoção da palha acima do solo em doses certas.

Dessa maneira, é importante destacar que estudos sobre os atributos do solo estão diretamente ligados à quantidade de palha que deve permanecer sobre a superfície do solo, bem como com a quantidade de água retida no solo, ainda são pouco difundidos no país. Além disso, é de grande importância enfatizar que esta pesquisa, fornecerá subsídios para estudos futuros sobre o uso da palha de cana-de-açúcar, de modo que possa orientar os produtores nos aspectos do manejo agrícola, qualidade do solo e produtividade de cana-de-açúcar no Brasil.

## **2. HIPÓTESE DO ESTUDO**

A hipótese deste estudo é que a manutenção de maiores dose de palha na superfície do solo aumenta o estoque de carbono no solo e o intervalo hídrico ótimo.

## **3. OBJETIVOS**

### **3.1 Geral**

O objetivo deste projeto foi avaliar o impacto de diferente quantidades de palha mantidos na superfície do solo sobre o estoque de carbono do solo e intervalo hídrico ótimo em áreas de classes texturais distintas cultivados com cana-de-açúcar.

### **3.2 Objetivos específicos**

- i) Avaliar o potencial de ciclagem de carbono da palha de cana-de-açúcar.
- ii) Estudar as faixas críticas de umidade do solo que limitam o crescimento da planta e, qual o intervalo que fornece melhores condições à planta com base na metodologia do Intervalo Hídrico Ótimo do solo com diferentes doses de palha mantidas na superfície do solo.

#### **4. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

O primeiro capítulo foi desenvolvido com o propósito de realizar uma contextualização ao tema de interesse, por meio da introdução e justificativa, definição da hipótese, o objetivo geral, os objetivos específicos, procedimentos metodológicos e revisão bibliográfica.

O segundo capítulo apresenta o primeiro artigo científico que corresponde aos “Atributos do solo influenciados pela manutenção da palha em área de cana-de-açúcar sob diferentes tipos de solos” incluindo a metodologia e os resultados obtidos na pesquisa.

No terceiro capítulo é apresentado o segundo artigo científico intitulado como “Intervalo hídrico ótimo em áreas de cana-de-açúcar com a manutenção de diferentes doses de palha” que inclui as análises e resultados dos atributos físicos, o conteúdo de água disponível no solo e intervalo hídrico ótimo (IHO), produtividade de cana-de-açúcar durante dois anos agrícolas, bem como os resultados gerados durante o desenvolvimento desta pesquisa.

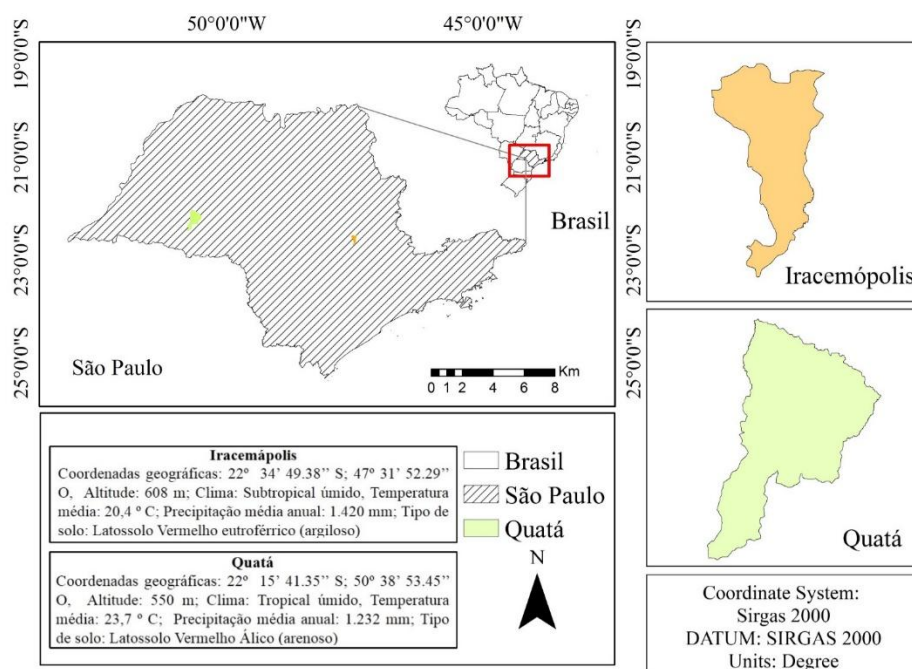
## 5. METODOLOGIA GERAL

Este projeto foi realizado a partir de um banco de dados pré-existente, resultante da tese de Doutorado (FAPESP 2013/02792-1) intitulada “Manutenção da palha em superfície e seus efeitos nos atributos do solo e na produtividade do canavial”, executado entre os anos de 2013 e 2016 por Ana Paula Guimarães Santos, sob orientação do Prof. Dr. Zigomar Menezes de Souza, na Faculdade de Engenharia Agrícola – FEAGRI/UNICAMP. Tal projeto teve como objetivo avaliar a manutenção de quantidades de palha na superfície do solo e os seus efeitos nos atributos físicos, químicos, no conteúdo de água no solo, nos estoques de carbono do solo e na produtividade do canavial, por meio de análises físicas e químicas do solo visando estabelecer estratégias de manejo do solo. Nesse sentido, este projeto de pesquisa constitui-se no aprimoramento e continuação quanto às análises dos dados gerados pela Dra. Ana Paula Guimarães Santos, no que diz respeito à manutenção da palha em superfície do solo e seus efeitos no estoque de carbono do solo e intervalo hídrico ótimo.

### 5.1 Localização do experimento

Os experimentos foram conduzidos nas usinas Iracema (Grupo São Martinho) e Zilor (Grupo Zilor), localizadas nos municípios de Iracemápolis-SP e Quatá-SP, respectivamente (Figura 1).

**Figura 1.** Mapa de localização dos municípios Quatá e Iracemápolis em relação ao estado de São Paulo, Brasil.



A escolha destes locais esteve relacionada a localização das usinas e suas características edafoclimáticas, que podem influenciar na decomposição da palha e consequentemente na cobertura do solo durante os anos agrícolas de avaliação (Tabela 1).

**Tabela 1.** Localização e características climáticas e de solo das áreas avaliadas nas duas usinas.

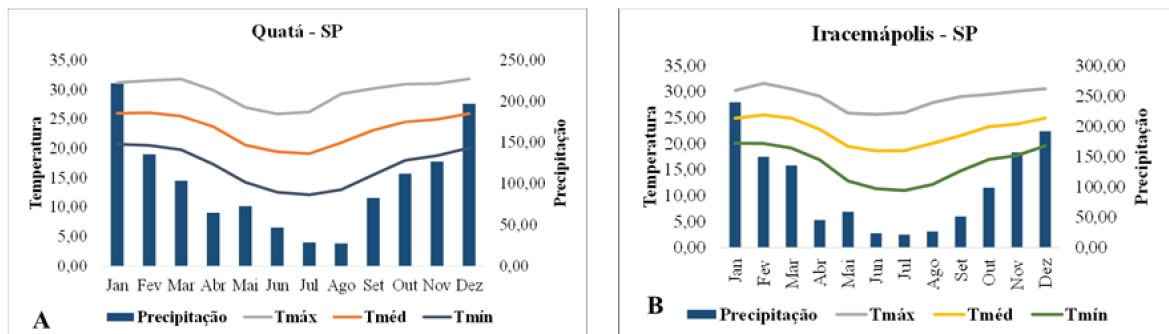
Características	Usinas	
	Iracema	Zilor
Coordenadas geográficas	22°34' S e 47°31' O	22°14' S e 50°41' O
Altitude (m)	608	550
Precipitação média anual (mm)	1.420	1.232
Tipo de solo	*Latossolo Vermelho eutroférico	Latossolo Vermelho álico
Textura	Argilosa	Arenosa
Ambiente de Produção	A	D

\*Classificação segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2018).

## 5.2 Delineamento experimental e tratamentos

Em determinadas épocas do ano o canavial necessita de maior quantidade de palha na superfície do solo, visando proteção contra erosão, suprimento de nutrientes, proteção contra a incidência direta da radiação solar no solo, retenção de umidade e redução da incidência de plantas daninhas. Somado a isto, a taxa de decomposição da palha tende a ser diferente dependendo da época da colheita do canavial e das características climáticas do local (Figura 2).

**Figura 2.** Temperatura mínima, máxima, média e precipitação mensal do município de Quatá-SP. (A) – (1991-2018) e do município de Iracemápolis-SP (B) – (1995-2018).



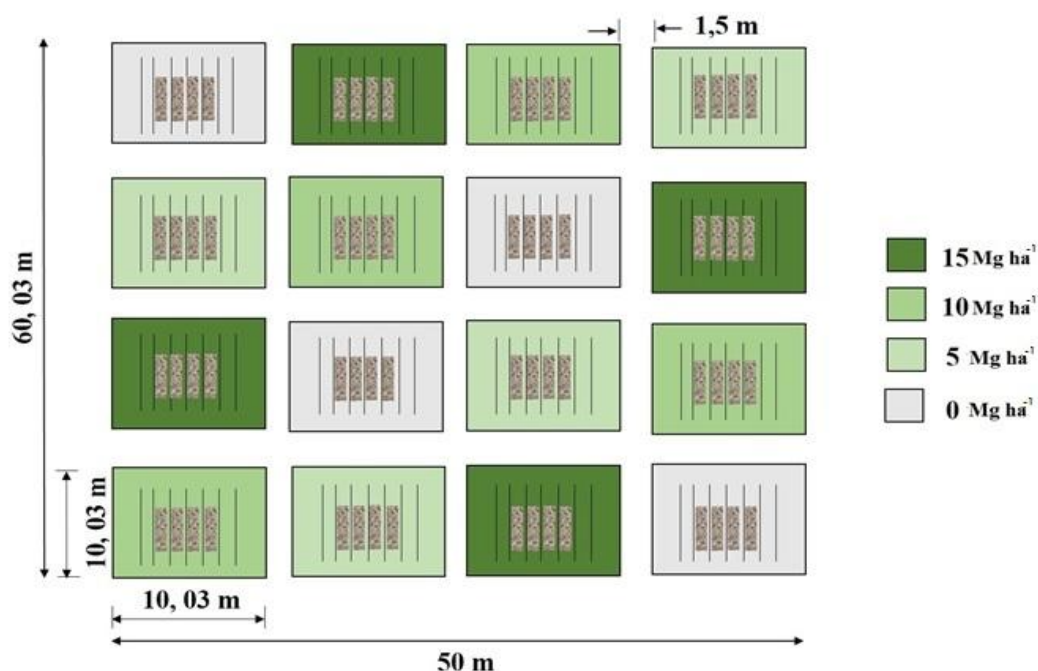
Neste sentido, foram instalados dois experimentos de campo nas usinas Iracema e Zilor, visando avaliar o efeito de diferentes doses de palha no estoque de carbono no solo,

atributos físicos do solo, Intervalo Hídrico Ótimo e na produtividade do canavial.

Em cada uma destas duas usinas foram selecionadas áreas de cana crua de primeiro corte cultivadas com a variedade RB 96 6928, a qual apresenta como característica principal a precocidade, rusticidade, estabilidade e boa soca para colheita mecânica. Após a colheita mecanizada das áreas, a quantidade de palha mantida no solo e a umidade deste material foram determinadas. Após a obtenção da umidade da palha foram corrigidos os valores de modo a depositar ao solo os valores das quatro quantidades de massa seca de palha ( $0, 5, 10$  e  $15 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) em todas as áreas e durante as safras de 2013 (colheita de cana planta) e 2014 (colheita da primeira soqueira) (Figura 3).

Estes experimentos foram instalados considerando um delineamento de blocos ao acaso com quatro repetições (Figura 3). Cada parcela foi composta por 08 linhas de cana-de-açúcar, com espaçamento de  $1,5 \text{ m}$  e  $10 \text{ m}$  de comprimento.

**Figura 3.** Delineamento experimental para avaliação da decomposição de palha de cana-de-açúcar. Adaptado de Santos (2016).



### 5.3 Descrição das áreas experimentais

As áreas experimentais avaliadas apresentavam diferentes históricos de manejo e implantação. A área experimental localizada na usina Iracema era cultivada com cana-de-açúcar, a mais de 70 anos e no momento de instalação do experimento encontrava-se no seu primeiro corte, com colheita mecanizada e solo classificado como Latossolo Vermelho Eutroférico, com textura argilosa. A área experimental localizada

na usina Zilor, até 1987 foi manejada com pastagem e cultivada com cana-de-açúcar a cerca de 26 anos e a renovação do canavial se deu após o sexto ciclo, com todas as práticas de manejo também sendo realizadas mecanicamente.

#### 5.4 Caracterizações das áreas experimentais

A caracterização física e química dos solos das áreas experimentais, anteriores a instalação do experimento, encontram-se descritas nas Tabelas 2, 3 e 4. Observa-se na Tabela 2 a heterogeneidade entre as duas áreas com relação à classe textural segundo a metodologia de Camargo *et al.* (2009). Os valores de densidade do solo, resistência do solo à penetração e porosidade do solo foram baseados de acordo com os limites ideais em solos argilosos e arenosos utilizados por Visch Filho *et al.* (2015) e Oliveira *et al.* (2017).

**Tabela 2.** Caracterização granulométrica do solo nas áreas implantadas em maio/junho de 2013 nas usinas localizadas no município de Iracemápolis (solo argiloso) e Quatá (solo arenoso) no estado de São Paulo.

Camadas(m)	Areia (g kg <sup>-1</sup> )			Argila (g kg <sup>-1</sup> )	Silte	Classe Textural
	AG	AF	AT			
Solo Argiloso (Iracemápolis)						
0,00-0,10	103,0	151,5	254,3	556,2	190,0	Argilosa
0,10-0,20	100,0	161,5	261,2	577,7	161,1	Argilosa
0,20-0,30	95,3	159,0	254,1	588,1	158,0	Argilosa
0,30-0,40	93,0	151,0	244,0	605,4	151,0	Muito Argilosa
0,40-0,60	70,0	146,2	216,0	632,7	151,4	Muito Argilosa
0,60-1,00	69,0	141,3	210,0	628,4	161,6	Muito Argilosa
Solo Arenoso (Quatá)						
0,00-0,10	370,0	479,0	849,0	91,6	60,0	Areia Franca
0,10-0,20	347,0	500,0	846,5	100,3	53,2	Areia Franca
0,20-0,40	333,3	447,0	780,3	142,0	78,0	Areia Franca
0,40-0,60	299,0	451,2	750,0	170,3	80,0	Areia Franca
0,60-1,00	343,0	406,3	749,0	177,6	73,4	Areia Franca

AG = Areia grossa; AF= Areia fina; AT= Areia total.

Quanto a caracterização química foi possível observar as diferenças em atributos como CTC, SB e V%, além dos elementos como o potássio e cálcio em que apresentam valores bem mais elevados na área argilosa (Tabela 3). Assim como os valores de carbono e nitrogênio, elementos chave para a decomposição da palha apresentam-se melhores na área argilosa, em comparação os valores da área arenosa. A caracterização química foi realizada no laboratório de Química e Fertilidade do Solo da Esalq em Piracicaba, em parceria com a instituição.



**Tabela 3.** Caracterização química das áreas implantadas em maio/junho de 2013 nas usinas localizadas no município de Iracemápolis (solo argiloso) e Quatá (solo arenoso) no estado de São Paulo.

Camadas	pH	P (mg dm <sup>-3</sup> )	S	K	Ca	Mg (mmolc dm <sup>-3</sup> )	Al	H+Al	SB	CTC	V (%)	m	C (g kg <sup>-1</sup> )	N	C:N
Iracemápolis															
0,0-0,1	5,47	104,00	28,67	20,02	58,00	21,83	0,90	15,67	99,88	115,80	85,50	0,00	2,74	0,19	14,65
0,1-0,2	5,27	70,50	66,83	20,52	49,83	21,83	0,90	16,00	92,10	108,33	83,50	0,17	2,44	0,17	14,52
0,2-0,3	4,98	33,60	160,80	23,64	34,00	13,40	1,52	18,20	70,66	88,96	76,40	2,00	2,07	0,15	13,57
0,3-0,4	4,93	15,00	196,67	20,53	24,00	9,33	0,90	17,67	53,77	71,47	74,00	0,33	1,67	0,13	13,39
0,4-0,6	4,77	4,00	265,00	15,10	30,67	8,50	3,28	16,33	54,05	70,45	73,17	8,50	1,37	0,10	14,38
0,6-1,0	4,55	1,83	301,50	13,23	24,20	7,17	4,63	16,83	40,98	57,97	67,83	11,50	1,10	0,07	15,73
Quatá															
0,0-0,1	5,45	13,50	6,43	0,78	41,50	5,33	0,90	9,00	47,50	56,23	67,17	0,17	0,65	0,04	16,82
0,1-0,2	5,18	4,33	1,33	0,69	33,17	3,17	0,90	9,83	36,80	46,35	54,67	0,00	0,50	0,03	15,16
0,2-0,4	4,73	3,17	4,96	0,69	27,67	2,32	5,13	10,00	30,42	40,17	50,50	12,00	0,43	0,03	16,05
0,4-0,6	4,27	7,00	22,23	0,69	20,72	1,08	16,33	12,33	22,27	34,63	26,00	46,83	0,39	0,02	17,49
0,6-1,0	4,23	1,50	33,33	0,69	21,72	1,27	16,33	12,00	23,57	35,52	27,17	45,00	0,32	0,02	18,41

P = fósforo por calorimetria extraído com resina trocável de íons; pH = obtido em peagômetro com o extrator CaCl<sub>2</sub>; K = potássio por espectrofotômetro de emissão atômica com resina trocável de íons; Ca = cálcio extraído em espectrofotômetro de absorção atômica com resina trocadora de íons; (Mg) = magnésio extraído espectrofotômetro de absorção atômica com resina trocadora de íons; Al = alumínio trocável por calorimetria com cloreto de potássio; H+Al = acidez potencial em solução tampão SMP; S = enxofre por turbidimetria em fosfato de cálcio; SB = soma de bases trocáveis; CTC = capacidade de troca de cátions; V = saturação por bases; m = saturação por alumínio. As determinações de carbono e nitrogênio total e relação C:N foram feitas em equipamento analisador CNHS e analisador elementar Flash EA1112.

A caracterização dos atributos físicos como agregados e porosidade das áreas implantadas encontram-se na Tabela 4. Em consequência da classe textural e maiores níveis de carbono encontrado na área argilosa os valores de diâmetro médio ponderado dos agregados (DMP) foram maiores em comparação a área arenosa. Os valores de densidade do solo estão altos nas duas áreas experimentais com baixo valor de macroporosidade em todas as profundidades estudadas indicando compactação.

**Tabela 4.** Atributos físicos do solo nas camadas em estudo nas áreas implantadas em maio/junho de 2013 nas usinas localizadas no município de Iracemápolis (solo argiloso) e Quatá (solo arenoso) no estado de São Paulo.

Camadas (m)	Macro	Micro	PT	Densidade	DMP	RP
	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>			Mg m <sup>-3</sup>	mm	MPa
Solo Argiloso						
0,00-0,10	0,06	0,22	0,28	1,32	2,10	1,69
0,10-0,20	0,07	0,20	0,27	1,33	1,98	1,82
0,20-0,40	0,11	0,15	0,26	1,39	1,18	2,51
0,40-0,60	0,08	0,22	0,31	1,39	0,99	1,63
0,60-1,00	0,10	0,23	0,33	1,36	0,87	1,99
Solo Arenoso						
0,00-0,10	0,10	0,24	0,34	1,63	0,56	1,50
0,10-0,20	0,11	0,19	0,30	1,72	0,34	2,38
0,20-0,40	0,11	0,20	0,31	1,68	0,31	6,15
0,40-0,60	0,09	0,23	0,32	1,62	0,35	2,64
0,60-1,00	0,09	0,22	0,31	1,56	0,33	1,28

Macro = macroporosidade; Micro = microporosidade; PT = porosidade total; DMP = diâmetro médio ponderado; RP = resistência do solo à penetração.

A resistência do solo à penetração foi caracterizada utilizando um penetrômetro de impacto, a qual a resistência à penetração foi obtida conforme a equação descrita por Stolf *et al.* (2014). Verifica-se na Tabela 4 que a na área arenosa apresentou camadas mais compactadas a partir da profundidade de 0,10-0,20 m crescente até a camada de 0,50-0,60 m. Para área argilosa observa-se o início da camada compactada em 0,20-0,30 m.

## 5.5 Plantio e adubação

As parcelas foram cultivadas com espaçamento simples distanciadas a 1,50 m. O plantio foi realizado a 0,30 m de profundidade, com densidade de 18 gemas m<sup>-1</sup> linear. Essa operação foi realizada por uma plantadora de cana picada da DMB, modelo PCP 6000, com tração realizada por um trator Valtra BH 185 intercooler, com bitola traseira e dianteira de 2,10

m e 1,80 m, respectivamente. O implemento possui capacidade de volume de 24 m<sup>3</sup>, massa de 9320 kg, altura de 4,30 m, comprimento de 7,60 m e largura de 3,65 m em operação (SANTOS, 2016).

A plantadora apresenta um reservatório de aço inoxidável provido de um sensor de nível, com capacidade para receber 1.250 kg de adubo. Possui também, um sistema de distribuição do tipo “rosca sem fim”, que é acionado por um motorhidráulico com válvula de regulagem de fluxo e óleo, o qual permitiu aplicar 0,45 Mg ha<sup>-1</sup> e 0,50 Mg ha<sup>-1</sup> do formulado 05-25-23 + 1,5% de zinco + 0,4% de boro, para a área arenosa e de textura média, respectivamente. Na ocasião do plantio, em cada área, foram aplicados 0,25 kg ha<sup>-1</sup> de Regente 800 WG e 0,5 L ha<sup>-1</sup> de Comet, para controle de insetos e fungos, respectivamente. Ressalta-se que as áreas já encontravam-se com o pH corrigido, tendo sido realizada a aplicação de 1,40 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário dolomítico na entrelinha em todas as áreas após cada corte. Houve aplicação de torta de filtro e de vinhaça nas áreas experimentais (SANTOS, 2016).

## 5.6 Colheita

A colheita foi realizada por uma colhedora da marca CASE, modelo 8000, que conta com um sistema de corte formado por cortadores de pontas, cortadores de base, disco de corte lateral e um conjunto picador. Possui esteira com corrente engraxada, sapatas com design agrícola e guias Heavy Duty. Conta ainda, com rolo de tombamento, rolo alimentador, rolo transportador e levantador, com massa aproximada de 15 toneladas. Para o transporte da cana-de-açúcar utilizou-se uma carreta de transbordo da linha de implementos ANTONIOSI, modelo 8000D, com capacidade para transportar 8,50 toneladas num volume de 20 m<sup>3</sup>. O implemento possui aproximadamente 6,50 toneladas, largura máxima de 3,30 m, altura mínima de 3,50 m e altura de basculamento de 4,70 m, com pneus 600/50-22,5 de baixa pressão. O tracionamento do transbordo foi realizado por reboque, utilizando um trator HB 185 intercooler da Valtra (SANTOS, 2016).

## 5.7 Avaliações de solo

Durante a caracterização das áreas foram coletadas amostras de solo em seis trincheiras de até 1,0 m de profundidade, em cada área avaliada subdivididas nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40, 0,40-0,60 e 0,60-1,00 m. Para compreender os efeitos da manutenção da palha sobre os atributos físicos do solo, após dois anos de condução das áreas experimentais, foram coletadas amostras indeformadas e deformadas nas camadas de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m. Além disso, para avaliar os efeitos no estoque de carbono no solo,

foram realizadas adicionalmente a coleta amostras deformadas na camada de 0,00-0,05 m. Para o intervalo hídrico ótimo foram coletadas amostras indeformadas de solo em cada unidade experimental, na entrelinha de cultivo da cana-de-açúcar, nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,30 m (SANTOS, 2016).

### 5.8 Análises químicas do solo

Foram realizadas determinações do pH do solo ( $\text{CaCl}_2$  0,01 mol L<sup>-1</sup>), fósforo disponível, cátions trocáveis ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^+$ ), acidez potencial, CTC potencial e saturação de bases de acordo com metodologia proposta por Raij *et al.* (2001).

Para quantificação do estoque de carbono, foram coletadas amostras até 0,40 m de profundidade, subdivididas em camadas de 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m. A determinação do teor total de carbono no solo ocorreu por combustão via seca em um analisador elementar, conforme a metodologia descrita por Nelson e Sommers (1996). Os estoques foram calculados com base em massa equivalente, de acordo com a metodologia proposta por Ellert e Bettany (1995).

O estoque de carbono em cada uma das camadas amostradas foi estimado a partir da expressão  $C_{ac} = (C \times Ds \times e)/1000$ , onde o  $C_{ac}$  = C acumulado (Mg ha<sup>-1</sup>); C = teor de carbono na camada (%); Ds = densidade do solo (kg dm<sup>-3</sup>); e = espessura da camada em análise, em metro.

### 5.9 Análises físicas do solo

**Análise granulométrica:** foram determinadas as frações de areia, silte e argila utilizando terra fina seca ao ar pelo método da pipeta com solução de Hidróxido de Sódio 0,1 (NaOH) com agente dispersante (CAMARGO *et al.*, 2009).

**Densidade e porosidade do solo:** a densidade do solo foi calculada pela relação entre a massa do solo seco em estufa a 105 °C e volume da amostra, segundo metodologia da Embrapa (TEIXEIRA *et al.*, 2017). A macroporosidade foi calculada a partir da mesa de tensão e a microporosidade correspondeu à umidade volumétrica da amostra submetida a uma tensão de 0,006 MPa, após saturação (TEIXEIRA *et al.*, 2017). A porosidade total foi obtida segundo Teixeira *et al.* (2017) e a macroporosidade por diferença entre a porosidade total e a microporosidade.

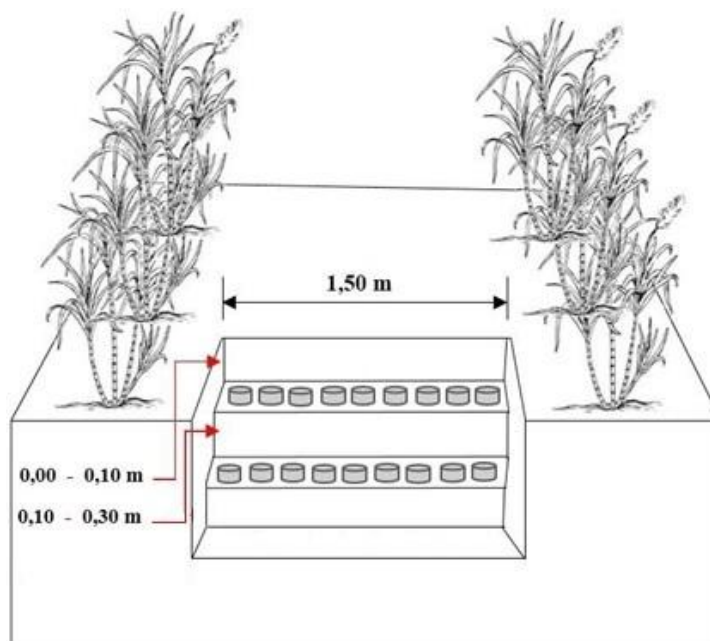
**Teor de água no solo e resistência do solo à penetração:** as medições do teor de água no solo foram realizadas no mesmo dia para todos os tratamentos de uma mesma repetição, buscando-se, dessa forma, eliminar o efeito da variação do teor de água no solo, que foi determinado pelo

método gravimétrico em amostras deformadas (TEIXEIRA *et al.*, 2017). A resistência do solo à penetração foi obtida com um penetrômetro de impacto, a qual a resistência à penetração determinada conforme a equação descrita por Stolf *et al.* (2014).

**Estabilidade de agregados:** a estabilidade de agregados foi medida a partir dos agregados em que foram obtidos mediante manipulação com as mãos, sendo usados para peneiramento em água os agregados que passaram na peneira de 9,52 mm e retidos na de 4,76 mm (KEMPER; CHEPIL, 1965). Após secos ao ar, os agregados foram colocados em contato com a água sobre a peneira de 4,76 mm por dez minutos. Para peneiramento dos agregados em água, foram utilizadas as peneiras com diâmetros de malha 4,76; 2,0; 1,0; 0,5 e 0,25 mm, separando os agregados nas seguintes classes: C1 (9,52-4,76 mm), C2 (4,76-2,0 mm), C3 (2,0-1,0 mm), C4 (1,0-0,5 mm), C5 (0,5-0,25 mm) e C6 (< 0,25 mm).

**Intervalo Hídrico ótimo e curva de retenção:** foram coletadas 9 amostras indeformadas em cada parcela nas profundidades de 0,00-0,10 e 0,10-0,30 m para avaliação da curva de retenção e Intervalo Hídrico Ótimo (Figura 4).

**Figura 4.** Esquema de amostragem de solo nas profundidades de 0,00-0,10 e 0,10-0,30 m, nas áreas experimentais localizadas nos municípios de Iracemápolis e Quatá no estado de São Paulo. Adaptado de Santos (2016).



É importante destacar que essas camadas foram determinadas porque o efeito da decomposição da palha concentra-se nas camadas superficiais. A curva de retenção foi obtida

em câmaras de pressão de Richards. Os anéis com as amostras indeformadas foram submetidos às pressões de 0,002, 0,006, 0,01, 0,033, 0,05, 0,075, 0,1, 0,3 e 0,5 MPa. Depois de submetidos à determinadas pressões foram pesados para obtenção da quantidade de água contida no solo nesta pressão, sendo novamente saturados e retornando para a câmara de Richards para a próxima pressão. De posse das quantidades de água em cada pressão, a curva de retenção de água foi ajustada. Para o ajuste das curvas de retenção de água no solo foi utilizado o programa SWRC (Soil Water Retention Curves), desenvolvido por Dourado Neto *et al.* (2001), com base na metodologia de van Genuchten (1980).

Para obtenção do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) no laboratório, as amostras indeformadas foram preparadas e saturadas por meio da elevação gradual de uma lâmina de água pura em uma bandeja, até atingir cerca de 2/3 da altura dos anéis. Em seguida, foram submetidas a diferentes tensões ( $\Psi$ ) 2, 6, 8, 10, 33, 100, 500 e 1.500 kPa, em câmaras de Richards com placas porosas (SILVA *et al.*, 1994). Após atingirem o equilíbrio em cada tensão, as amostras foram pesadas e foi determinada a resistência do solo à penetração, em laboratório, em três pontos para cada amostra, utilizando-se um penetrômetro eletrônico da marca Marconi (modelo MA-933), com velocidade de deslocamento constante de 1,0 cm min<sup>-1</sup>, equipado com uma célula de carga de 200 N, haste com cone de 4,0 mm de diâmetro de base e semi-ângulo de 30°, receptor e interface acoplado a um computador, para registro das leituras por meio de um *software* próprio do equipamento.

Em seguida, as amostras foram secas em estufa a 105 °C até massa constante. O teor de água no solo em base volumétrica foi quantificado pelo quociente do volume de água retida na amostra em cada tensão e o volume do solo de cada amostra. A densidade do solo foi obtida pela relação massa de solo seco e volume do cilindro (TEIXEIRA *et al.*, 2017).

Os dados de resistência do solo à penetração foram ajustados em função da densidade do solo e do teor de água no solo (Equação 1), usando o modelo não linear utilizado por Busscher (1990) e Leão *et al.* (2006):

$$RP = a \theta^b Ds^c \quad (1)$$

ou alternativamente:

$$\ln(RP) = \ln(a) + b(\ln\theta) + c(\ln Ds) \quad (2)$$

em que, RP = resistência do solo à penetração (MPa); DS = densidade do solo (Mg m<sup>-3</sup>);  $\theta$  =

conteúdo volumétrico de água do solo ( $m^3 m^{-3}$ ); e “a”, “b” e “c” = coeficientes do modelo. Foi determinado o teor de água no solo para cada densidade na qual se atinge a resistência do solo à penetração ( $\theta_{RP}$ ) de 2,0; 2,5; 3,0 e 3,5 MPa (SILVA *et al.*, 1994).

A curva de retenção de água no solo, que relaciona o potencial matricial e a umidade volumétrica do solo, foi ajustada ao modelo utilizado por Tormena *et al.* (1998) e Leão *et al.* (2006), conforme Equação 3, utilizando-se o *software* SAS®:

$$\theta = \exp (d + e Ds) * \psi^f \quad (3)$$

ou alternativamente:

$$\ln (\theta) = \ln (a) + b * Ds + c \ln (\psi) \quad (4)$$

em que,  $\theta$  = conteúdo volumétrico de água ( $m^3 m^{-3}$ );  $\psi$  = potencial matricial (MPa); DS = densidade do solo ( $Mg m^{-3}$ ); “d” “e” “f” = coeficientes de ajuste do modelo. Assim, foi determinada a variação da umidade na capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ) na tensão de 0,01 MPa (HAISE *et al.*, 1955) e, no ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ) na tensão de 1,5 MPa (SAVAGE *et al.*, 1996) em função da DS.

A porosidade de aeração (PA) mínima foi de  $0,10 m^3 m^{-3}$ , considerada o valor mínimo responsável por uma taxa de difusão adequada de oxigênio da atmosfera até as raízes (DEXTER, 1988). O teor de água no solo considerando a PA ( $\theta_{PA}$ ) foi calculado pela Equação 5:

$$\theta_{PA} = \left[ 1 - \frac{D_S}{D_P} \right] - 0,1 \quad (5)$$

em que,  $\theta_{PA}$  = conteúdo volumétrico de água ( $m^3 m^{-3}$ ), considerando uma porosidade de aeração de  $0,10 m^3 m^{-3}$ ; DP e DS = densidade de partículas ( $Mg m^{-3}$ ) e do solo ( $Mg m^{-3}$ ), respectivamente. A densidade de partícula foi medida pelo método do balão volumétrico (TEIXEIRA *et al.*, 2017).

Para determinar o IHO, foi utilizado o método descrito por Silva *et al.* (1994) e Tormena *et al.* (1998). Os valores de  $\theta_{RP}$ ,  $\theta_{CC}$  e  $\theta_{PMP}$  foram linearizados, utilizando-se a transformação logarítmica.

O limite superior do IHO foram  $\theta_{CC}$  e/ou  $\theta_{PA}$ , enquanto o limite inferior foram  $\theta_{PMP}$  e/ou  $\theta_{RP}$ . A densidade do solo crítica ao crescimento e desenvolvimento das plantas

(DSC) foi considerada como o valor de DS em que o IHO foi igual a zero. Na realização do cálculo do IHO, conforme Wu *et al.* (2003), podem ser quatro as possibilidades e que dependem dos valores de quatro parâmetros: quantidade de água na porosidade de aeração, na capacidade de campo, na resistência do solo à penetração e quantidade de água no ponto de murcha permanente. As possibilidades são: se  $(\theta_{PA} \geq \theta_{CC})$  e  $(\theta_{RP} \leq \theta_{PMP})$ , então  $IHO = \theta_{CC} - \theta_{PMP}$ ; se  $(\theta_{PA} \geq \theta_{CC})$  e  $(\theta_{RP} \geq \theta_{PMP})$ , o  $IHO = \theta_{CC} - \theta_{RP}$ ; se  $(\theta_{PA} \leq \theta_{CC})$  e  $(\theta_{RP} \leq \theta_{PMP})$ , o  $IHO = \theta_{PA} - \theta_{PMP}$ ; e se  $(\theta_{PA} \leq \theta_{CC})$  e  $(\theta_{RP} \geq \theta_{PMP})$ :  $IHO = \theta_{PA} - \theta_{RP}$ .

Para análise do Intervalo Hídrico Ótimo, os dados foram avaliados por meio de análises de regressão não linear empregando o algoritmo de Levenberg-Marquardt. Os procedimentos foram realizados por meio da rotina “REG” e “NLIN” do sistema SAS e os gráficos por meio do sistema SAS/GRAPH®. Por meio da regressão dos mínimos quadrados foram estimados valores para os parâmetros da curva de resistência do solo à penetração e a curva de retenção de água no solo e aplicado o teste “t” em cada um dos modelos analisados, de acordo com Leão *et al.* (2006).

## 5.10 Produtividade

A produtividade final de colmos foi determinada via colheita manual em quatro linhas de 10 m de comprimento em cada uma das parcelas. Após a colheita das plantas, foi realizado o desponte na altura da gema apical e à desfolha das plantas e, em seguida esse material foi pesado e os resultados expressos em toneladas de cana-de-açúcar por hectare (TCH).

## 6. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 6.1 Produção de cana-de-açúcar e utilização da palha no Brasil

As mudanças climáticas são um dos atuais desafios no mundo e, no Brasil estas modificações estão diretamente relacionadas às mudanças e uso das terras, em que cerca de 80% do dióxido de carbono ( $CO_2$ ) são provenientes de cultivos agrícolas para a produção de energia (LAPOLA *et al.*, 2014). A produção de bioenergia é uma das alternativas mais promissoras para controlar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) (IPCC, 2007). Nesse sentido, a perspectiva futura é que aumente cada vez mais a produção de bioenergia (IRENA, 2016). De acordo com Karlen *et al.* (2014) o setor de bioenergia mundial vem intensificando os investimentos e interesses na utilização da palha da cana-de-açúcar para a produção de biocombustível por ser um material sustentável.



No Brasil, os campos agrícolas são definidos pelo cultivo de cana-de-açúcar para fins de produção de biocombustível e açúcar. Nesse contexto, foram estimadas em nove milhões hectares incluindo os principais estados produtores do país na região sudeste (São Paulo, Minas Gerais, Rio de Janeiro e Espírito Santo). Dessa maneira, tais estados geram mais de 80% da produção do país, e dentre eles o estado de São Paulo lidera a produção de cana-de-açúcar com mais de quatro mil hectares plantados (CONAB, 2019a).

Historicamente, durante os anos de 2014 e 2015 a produção de açúcar proveniente da cana-de-açúcar chegou a 35 milhões de toneladas. Para a safra 2015/16 a expectativa foi de um aumento de 5%, atingindo quase 40 milhões de toneladas. A região sudeste, gerou cerca de 70% do açúcar nacional, seguida pela região centro-oeste, região nordeste, região sul e região norte, respectivamente (CONAB, 2019b). Entretanto, as estimativas indicam que a produção do país tende a aumentar para mais de 920 milhões de toneladas de cana-de-açúcar em 2020 (BRASIL, 2011).

Na safra de 2018 e 2019 o Brasil liderou a produção de cana-de-açúcar, estimando um total de mais de nove milhões de hectares plantados, incluindo a principal região produtora do país, a região centro-sul. Nesse mesmo período, o país atingiu cerca de 71 mil kg ha<sup>-1</sup> como produtividade média (CONAB, 2019a). Entretanto, com a crescente necessidade pela geração de bioenergia, o Brasil poderá ultrapassar a produção de etanol atual de 30 bilhões de litros para cerca de 60 bilhões de litros de etanol em 2021 (GOLDEMBERG *et al.*, 2014; CONAB, 2019a). De acordo com Pereira *et al.* (2015) a produção futura de bioenergia gerada pelo Brasil, incluindo o etanol secundário, será proveniente da palha orgânica e do bagaço vegetal como uma alternativa para aumentar e atender as demandas futuras por etanol.

Desde meados dos anos 2000 diversas pesquisas agrícolas em distintas áreas, como a produção de bioenergia (GOLDEMBERG *et al.*, 2014), mudanças no clima (MOITINHO *et al.*, 2013), e uso das terras (BORDONAL *et al.*, 2018) mostram a intensificação e mercantilização do setor agrícola no Brasil. Nesse sentido, o cultivo de culturas agrícolas vem fortalecendo este cenário com uma importante participação na matriz agrícola, em que o Brasil está voltado principalmente para atender grandes exportações de bioetanol em escala global (LAPOLA *et al.*, 2014).

O aumento da produção de bioetanol vem sendo objeto central de pesquisas devido aos efeitos negativos gerados pelo meio de produção, como os efeitos nos atributos físicos do solo e preços de alimentos elevados (GOLDEMBERG *et al.*, 2008). Dessa maneira, uma alternativa recomendável para o setor é a utilização da colheita mecanizada, que vêm substituindo a colheita com queima nas regiões canavieiras, por ser uma técnica moderna em

escala global com retornos sustentáveis e economicamente viáveis (VISCHI FILHO *et al.*, 2015).

Nesse contexto, a colheita de cana-de-açúcar mecanizada é atualmente o principal meio de corte sem que haja queima da palha. Por outro lado, este meio requer uma atenção maior por incluir altos custos de investimentos e retorno de até 50% da produção, desenvolvimento de tecnologia e efeitos como a degradação do solo (SOUZA *et al.*, 2014). A colheita mecanizada pode gerar grande quantidade de resíduo orgânico, como a palha, que permanecem acima do solo após a colheita (LAL, 2005; CARVALHO *et al.*, 2017b).

A palha é considerada uma das mais importantes matérias primas utilizadas para geração de bioenergia, que vem fortalecendo o setor energético brasileiro, intensificando a produção agrícola do Brasil (SOUZA *et al.*, 2005; SATIRO *et al.*, 2017). Com o objetivo de fortalecer a produção de energia e reduzir os danos ao solo, atualmente vêm sendo desenvolvidas tecnologias capazes de gerar etanol, que utilizam a palha da cana-de-açúcar (GRAHAM-ROWE, 2011).

A palha pode fornecer benefícios para os atributos do solo, aumentar a produtividade agrícola; além de ser importante para a preservação do solo por apresentar mais de 29% do potencial de energia das plantas (SANTOS *et al.*, 2012; SATIRO *et al.*, 2017; SOUSA JUNIOR *et al.*, 2017). Por conta disso, existe uma grande demanda e interesse do setor canavieiro do Brasil pela utilização da palha para geração de bioenergia.

Nos próximos anos, o Brasil tem o compromisso de intensificar a produção de bioenergia por meio da produção de cana-de-açúcar, utilizando a palha que sobra após a colheita (PANOUTSOU *et al.*, 2013; GOLDEMBERG *et al.*, 2014). O que justifica este compromisso é que a produção de bioenergia utilizando este material pode contribuir de forma sustentável para o equilíbrio das emissões de gases de efeito estufa e mudanças climáticas, entre outros fatores (CARVALHO *et al.*, 2017b). A palha da cana-de-açúcar é bastante predominante nos campos brasileiros.

De acordo com Lal (2005) a palha acima do solo pode melhorar a biota do solo, capaz de diminuir ameaças de erosão do solo, além de melhorar a produtividade agrícola. Apesar da intensa utilização deste material para a geração de bioenergia, a remoção da palha total acima do solo pode afetar negativamente os atributos do solo, como a degradação do solo e a perda de macro e micronutrientes (CAMPBELL *et al.*, 2014; CARVALHO *et al.*, 2017b). Assim, quantificar as doses de resíduos agrícolas necessárias para manter a perda total ou aumentar os estoques de carbono no solo no setor de bioenergia é uma questão importante. Isso requer quantificar a contribuição relativa dos resíduos orgânicos acima e abaixo do solo para o

funcionamento sustentável do solo.

## 6.2 Utilização da palha para produção de bioenergia

Os resíduos orgânicos, como a palha de cana-de-açúcar são matérias-primas valiosas que são aproveitadas para a produção de biocombustíveis no mundo inteiro (LISKA *et al.*, 2014). A palha é gerada após a colheita de cana-de-açúcar e, a manutenção deste material pode contribuir com a preservação do solo, além de ser capaz de atenuar os impactos da colheita na estrutura do solo (CASTIONI *et al.*, 2018). Por conta disso, compreender os efeitos da remoção de palha na quantidade do carbono orgânico do solo é crucial para sustentar as funções do solo e gerar rendimentos economicamente viáveis para produção de cana-de-açúcar.

A remoção da palha da cana-de-açúcar vem sendo uma das principais questões desafiadoras dos campos brasileiros, pois este material é considerado uma forma secundária para se produzir biocombustíveis. Por isso, a remoção da palha acima do solo vem sendo alvo de novas pesquisas e, no Brasil este cenário ainda é incipiente no contexto agrícola. Ainda que a palha forneça benefícios ao funcionamento do solo, este material é uma alternativa promissora para o setor canavieiro do Brasil, sobretudo com o manejo de resíduos orgânicos (LAL, 2005; BORDONAL *et al.*, 2018).

O uso da palha da cana-de-açúcar para a produção de bioenergia é capaz de potencializar a produção de bioenergia, sem que haja o aumento de áreas plantadas e a disputa de culturas agrícolas (TILMAN *et al.*, 2009). Entretanto, um estudo realizado por Satiro *et al.* (2017) sobre os efeitos da remoção da palha de cana-de-açúcar em Argissolos e Latossolos no centro-sul do Brasil, demonstrou que as camadas superficiais do solo são as mais afetadas pela remoção da palha e que a magnitude das alterações é determinada pelas condições do local, como por exemplo, o tipo de solo.

A palha deixada no campo pode fornecer diferentes benefícios ao sistema do solo. Segundo Carvalho *et al.* (2017b) mesmo que as raízes das plantas forneçam carbono ao solo, a palha da cana-de-açúcar é considerada a principal fornecedora de carbono ao solo nas áreas com cana-de-açúcar, sendo responsável por quase 80% do carbono presente no solo. Khatiwada *et al.* (2016), avaliaram uso da palha de cana-de-açúcar para produção de energia: bioeletricidade *versus* produção de etanol e, observaram que os preços da energia, o tipo de eletricidade substituída, o apoio de biocombustíveis e o teor de carbono influenciaram na produção de energia.

A remoção da palha pode afetar diretamente o teor de carbono no solo (CERRI *et al.*, 2011). Yamaguchi *et al.* (2017), estudaram a decomposição da palha de cana-de-açúcar e

balanço de carbono em função da massa inicialmente aportada sobre o solo e da aplicação de vinhaça. O estudo mostrou que a decomposição da palha não foi influenciada pela biomassa aportada inicialmente, mas com a adição de vinhaça os valores foram de 70% e 94%, enquanto nos tratamentos sem vinhaça os valores foram de 68% a 75%. Chegando à conclusão que a decomposição da palha não dependeu da biomassa aportada inicialmente sobre o solo e que a aplicação de vinhaça acelerou a decomposição da palha.

A remoção da palha de cana-de-açúcar proveniente da colheita no campo vem ganhando destaque na pesquisa. Cerri *et al.* (2011), relataram que cultivo de cana-de-açúcar sob colheita mecanizada produz elevada quantidade de palha e podendo acumular em média 1,5 Mg C ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> em comparação com aqueles sem resíduos, nos quais taxas mais altas de sequestro (2,0 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>) foram observados em solos argilosos em comparação com solos arenosos (0,7 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>).

Dessa maneira, o entendimento da dinâmica da palha é essencial para estabelecer doses sustentáveis de remoção de palha para produção de energia, sem comprometer o solo. Pois, a manutenção da palha de cana-de-açúcar é fundamental para sustentabilidade dos solos, uma vez que, aumentam a ciclagem de nutrientes e o estoque de carbono, mantém a qualidade física do solo, diminui a perda de água e o processo de erosão.

### **6.3 A palha de cana-de-açúcar e atributos físicos e químicos do solo**

A palha que permanece na superfície do solo após a colheita da cana-de-açúcar é de suma importância para as atividades físicas e químicas do solo, além de ser o principal fornecedor de energia, retenção de água e nutrientes do solo (SATIRO *et al.*, 2017). Além disso, a palha orgânica está diretamente relacionada com os agregados, densidade e aeração do solo, em que a combinação desses elementos contribui para o bom funcionamento do solo (SIX *et al.*, 2002).

Atualmente, vem sendo desenvolvidos estudos sobre a relação da palha de cana-de-açúcar com os atributos físicos do solo. Castioni *et al.* (2018), estudaram a resposta física da qualidade do solo à remoção da palha de cana-de-açúcar e, avaliaram os atributos como a densidade do solo, macroporosidade, resistência do solo à penetração e agregados do solo e, os autores verificaram que a remoção da palha durante quatro anos influenciou os atributos físicos do solo, principalmente nas parcelas com alta remoção ou remoção total, com exceção da macroporosidade.

A densidade do solo, a macroporosidade, resistência do solo à penetração e agregados do solo são utilizados para identificar e caracterizar os atributos físicos do solo que

vem sendo testados e amplamente utilizados por diversos pesquisadores (ZORNOZA *et al.*, 2015; CHERUBIN *et al.*, 2016; BÜNEMANN *et al.*, 2018). Estes atributos estão relacionados com o armazenamento de água, porosidade, compactação e estrutura física do solo que indicam a qualidade do solo (BÜNEMANN *et al.*, 2018).

Além disso, muitos estudos incluíram os indicadores químicos, tais como o teor de carbono e nutrientes do solo que influenciam no desenvolvimento das plantas (FRANCO *et al.*, 2013; KARLEN *et al.*, 2014). No trabalho desenvolvido por Carvalho *et al.* (2017a), os autores relatam que a remoção parcial da palha proveniente da colheita mecanizada da cana-de-açúcar apresenta como vantagens a reciclagem de nutrientes, aumento da biodiversidade do solo, armazenamento de água e controle da erosão do solo.

Estudos baseados em culturas agrícolas revelam os efeitos sobre o estoque de carbono no solo. Anderson-Teixeira *et al.* (2013) estudaram a relação do milho em Illinois e, verificaram que mais de 84% da entrada de carbono no solo foi proveniente de resíduos orgânicos acima do solo e 15% relacionado as atividades radiculares da cultura. Lisboa *et al.* (2018), estudaram os efeitos da remoção da palha de cana-de-açúcar no crescimento e produtividade de mudas e, observaram que a remoção da palha melhorou a forma das plantas ao longo do ciclo, em que na estação seca as plantas no final de cada ciclo da soca não sofreram alterações por conta da palha e quantidades intermediárias de palha (4 a 9 Mg ha<sup>-1</sup>) acima do solo aumentaram o rendimento de colmos.

Nesse contexto, a palha da cana-de-açúcar vem sendo objeto central de pesquisas sobre os efeitos nos atributos físicos e químicos do solo. Lisboa *et al.* (2018), avaliaram os efeitos da remoção da palha de cana-de-açúcar em argissolos no centro-sul do Brasil e, observaram que os efeitos da remoção da palha se limitaram e variaram em função do tipo do solo. O estudo mostrou que a remoção total da palha gerou a degradação do latossolo e perda de carbono no solo. Em contrapartida, a remoção da palha interferiu somente nos atributos químicos do Argissolo Vermelho, diminuindo o teor de cálcio e magnésio.

Em estudo realizado por Bordonal *et al.* (2018) sobre a produção de cana-de-açúcar e a resposta do carbono do solo quanto à remoção de palha no centro-sul do Brasil, demonstrou que a remoção do resíduo orgânico durante dois anos não interferiu significativamente na produção de cana-de-açúcar em Quatá-SP, mas em Chapadão do Céu-GO, a remoção total da palha resultou na perda de produtividade em 28 e 62 Mg ha<sup>-1</sup> e, concluíram que a resposta do carbono do solo foi relativo ao local durante o período em estudo.

De acordo com Campbell *et al.* (2014) a remoção total da palha da superfície do solo pode ocasionar a compactação do solo e, interferir nos atributos físicos do solo,

principalmente debilitar a entrada de carbono, bem como gerar outros prejuízos ao solo a longo prazo. De acordo com Farhate *et al.* (2018) alguns atributos físicos do solo, tais como densidade, porosidade, resistência do solo à penetração e água disponível são usados para caracterizar o estado físico do solo e avaliar a eficácia de diferentes sistemas de manejo. Um estudo realizado por Castioni *et al.* (2018) em que avaliaram a resposta da qualidade física do solo à remoção da palha de cana-de-açúcar no Brasil, verificaram que a palha afetou todos os atributos físicos do solo, no qual a maior degradação do solo foi observada nas parcelas que ocorreu remoção total.

Assim, compreender os efeitos da manutenção de diferentes doses de palha de cana-de-açúcar nos atributos físicos e químicos do solo é de fundamental importância para o setor agrícola e de bioenergia no Brasil. Isso requer quantificar a contribuição relativa de palha vegetal acima do solo e fortalecer a questão no cenário da pesquisa no país.

#### **6.4 Intervalo Hídrico Ótimo e quantidade de água no solo**

A água é um elemento de extrema importância para as atividades no solo, bem como para o desenvolvimento das plantas e, o manejo adequado do solo é determinante para a produção agrícola final. Dessa maneira, a compreensão da quantidade de água no solo é cada vez mais emergente, pois este elemento interage com as funções do solo (estrutura e filtragem), com a planta (biomassa) bem como a reciclagem de nutrientes e, o conhecimento dessas interações é indispensável para se ter um sistema de produção viável (RABOT *et al.*, 2018). Nesse contexto, o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) é um indicador com um papel importante para avaliar a qualidade do solo.

Com a finalidade de integrar e simplificar o monitoramento da qualidade física do solo, Silva *et al.* (1994), desenvolveram o “Least Limiting Water Range” (LLWR), como um indicador da qualidade estrutural do solo para a produtividade das culturas que foi traduzido para o português e utilizado como Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) por Tormena *et al.* (1998). Esse indicador integra o efeito do potencial matricial, aeração e resistência do solo à penetração das raízes em uma única informação, possibilitando estabelecer as condições de umidade do solo limitantes ao crescimento das plantas.

O IHO incorpora em um único gráfico a amplitude do teor de água do solo em que são mínimas as limitações ao desenvolvimento de plantas associadas à disponibilidade de água, aeração e resistência do solo à penetração unificando os atributos físicos do solo que diretamente influenciam no desenvolvimento das culturas (FIDALSKI, 2015). Estas inter-relações dependem das condições físicas do solo e do grau de degradação da estrutura a que o

solo está submetido (TORMENA *et al.*, 2017).

O IHO é determinado a partir dos limites críticos para os seguintes indicadores de qualidade física do solo: conteúdo de água retido na capacidade de campo a 0,8 MPa para solos textura arenosa e 0,1 MPa textura argilosa ( $\theta_{CC}$ ); conteúdo de água retido no ponto de murcha permanente a 1,5 MPa ( $\theta_{PMP}$ ); porosidade de aeração mínima de 10% ou  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  ( $\theta_{PA}$ ); e conteúdo de água em que a resistência do solo à penetração atinge valores de 2,0 a 3,5 MPa, dependentes da cultura e sistema de manejo de solo (SILVA *et al.*, 1994; TORMENA *et al.*, 2007; LIMA *et al.*, 2012; FITO *et al.*, 2017).

Independentemente do valor crítico da resistência do solo à penetração a ser utilizado, esse atributo se correlacionará diretamente com a densidade do solo e indiretamente com o conteúdo de água no solo (SILVA *et al.*, 1994; TORMENA *et al.*, 1998; TORMENA *et al.*, 2007; GUIMARÃES *et al.*, 2013). Em áreas sob cultivo de cana-de-açúcar, Roque *et al.* (2011), utilizaram o IHO para estudar alterações no conteúdo de água disponível às plantas promovido por diferentes sistemas de colheita. Betioli Júnior *et al.* (2012), avaliaram a qualidade física de uma Latossolo distroférico muito argiloso com histórico de trinta anos sob plantio direto caracterizando a sensibilidade deste atributo como indicador de qualidade estrutural do solo.

Diferentes métodos para avaliar o IHO vêm sendo utilizados, dentre eles o método direto que inclui o método gravimétrico, em que se desenvolve por baixo custo e gera resultados precisos, uma vez que são utilizados dados de campos e aplicados em laboratório (ZHAI *et al.*, 2017). No entanto, para coleta dessas análises no campo, o transporte das amostras requer muita atenção e cuidados, pois a movimentação e qualquer descuido pode interferir nos resultados das amostras. Por conta disso, os métodos indiretos vêm sendo bastante difundidos no Brasil (PROVENZANO *et al.*, 2016).

O entendimento do IHO com o monitoramento da umidade do solo é fundamental para a determinação da qualidade do solo. Nesse contexto, Guimarães Júnnyor *et al.* (2015), avaliaram o desempenho do sorgo sacarino em função da compactação do solo e época de semeadura em safrinha no cerrado brasileiro com base nesses indicadores, no estudo foi avaliado diferentes níveis de compactação, testadas com base no tráfego do trator. A qualidade física do solo foi determinada a partir do menor IHO e limitação hídrica do solo. O estudo indicou que o rendimento da cultura está relacionado ao teor de água no solo, a safra inicial teve maior qualidade, porém, a produtividade de colmos reduziu a medida que a densidade do solo for maior que  $1,26 \text{ Mg cm}^{-3}$ .

Nesse contexto, IHO vem se destacando por meio de sua utilização como indicador

da qualidade estrutural do solo, pois esse indicador integra o efeito do potencial matricial, aeração, as alterações do conteúdo de água disponível às plantas promovido por diferentes sistemas de colheita e resistência do solo à penetração das raízes em um único atributo, possibilitando estabelecer as condições de umidade do solo limitantes ao crescimento das plantas (ROQUE *et al.*, 2011; FIDALSKI, 2015).

Portanto, o monitoramento da qualidade física do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar tornou-se uma das principais práticas no Brasil. Dessa maneira, a determinação do IHO para o entendimento da limitação da faixa de água como indicador de qualidade do solo após colheita mecanizada de cana-de-açúcar é fundamental para apoiar e fortalecer o setor agrícola e o cenário da pesquisa no Brasil.



## **7 CAPÍTULO 2 – IMPACTO DA REMOÇÃO DA PALHA DE CANA-DE-AÇÚCAR EM DIFERENTES TIPOS DE SOLOS DO SUDESTE DO BRASIL**

### **RESUMO**

A cana-de-açúcar é uma das principais culturas cultivadas nos campos agrícolas do Brasil. Esse cultivo tem como principal objetivo fortalecer o setor industrial com base na produção de bioetanol, açúcar e energia limpa. Contudo, a sustentabilidade produtiva do setor sucroenergético é dependente do sistema de manejo adotado nas áreas, que por sua vez, influenciam nos atributos físicos e químicos do solo. Portanto, o objetivo deste artigo foi avaliar o impacto da remoção de palha nos atributos físicos, estoque de carbono e produtividade da cana-de-açúcar em diferentes tipos de solos do sudeste do Brasil. A área de pesquisa corresponde aos municípios de Quatá (Oeste paulista) e Iracemápolis (Norte do estado de São Paulo), nas duas áreas experimentais foram estabelecidas os mesmos tratamentos e manejo do solo em Latossolos Vermelho Eutroférico e Álico. O delineamento experimental foi em blocos casualizados com quatro repetições e os tratamentos avaliados foram quatro quantidades de palha mantidas na superfície do solo: 0, 5, 10 e 15 Mg ha<sup>-1</sup>. Em ambos os experimentos foram avaliados a densidade do solo, macroporosidade, microporosidade, resistência do solo à penetração, o estoque de carbono do solo e produtividade da cultura. Independentemente do tipo de solo, a manutenção de diferentes quantidades de palha na superfície do solo não modificou os atributos físicos e estoque de carbono do solo devido aos dois anos agrícolas. Em ambos os solos foi observado que maiores doses de palha promoveram maior produtividade, por exemplo, no primeiro ano agrícola, em área com solo de textura argilosa, a dose de 15 Mg ha<sup>-1</sup> apresentou produtividade máxima de 23,8 Mg ha<sup>-1</sup> superior a dose 0 Mg ha<sup>-1</sup> e na área de solo com textura arenosa essa diferença foi da ordem de 20%. Considerando os diferentes benefícios da palha recomenda-se intensificar os estudos sobre a remoção da palha, sobretudo em períodos em longo prazo, a fim de compreender melhor os efeitos desta prática baseando-se nas características específicas das áreas estudadas.

**Palavras-chave:** Bioenergia, colheita mecanizada, estoque de carbono no solo, manejo da palha.

## ABSTRACT

Sugarcane is one of the main crops grown in agricultural fields in Brazil. It has as main objective to strengthen the industrial sector based on the production of bioethanol, sugar and clean energy. However, the sustainability of the sugar-energy sector is dependent on the management system adopted in the areas, which influence the physical and chemical attributes of the soil. Therefore, the objective of this study was to evaluate the impact of straw removal on physical attributes, carbon stock and sugar cane productivity in different types of soils in southeastern Brazil. The research area corresponds to the municipalities of Quatá (West of São Paulo) and Iracemápolis (North of the State of São Paulo), in the two experimental areas the same treatments and soil management were established in Latossolos Vermelho Eutroférico e Álico. The experimental design was in randomized blocks with four replicates and treatments evaluated were four amounts of straw kept on the soil surface: 0, 5, 10 and 15 Mg ha<sup>-1</sup>. In both experiments, soil density, macroporosity, microporosity, soil penetration resistance, soil carbon stock and crop yield were evaluated. Regardless of the soil type, maintaining different amounts of straw on the soil surface did not change the physical attributes and carbon stock of the soil due to the two agricultural years. In both soils it was observed that higher doses of straw promoted higher yield, for example, in the first agricultural year, in an area with clayey soil, the dose of 15 Mg ha<sup>-1</sup> showed a maximum yield of 23.8 Mg ha<sup>-1</sup>, higher than dose 0 Mg ha<sup>-1</sup> and in the soil area with sandy texture this difference was of the order of 20%. Considering the different benefits of straw, it is recommended to intensify studies on straw removal, especially in long-term periods, in order to better understand the effects of this practice based on the specific characteristics of the studied areas.

**Keyword:** Bioenergy, mechanized harvesting, carbon stock in the soil, straw management.

## 7.1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos maiores produtores de cana-de-açúcar do mundo, a qual é uma importante cultura para o setor sucroenergético, uma vez que na última safra de 2019 atingiu cerca de 30 bilhões de litros de etanol (CONAB, 2019a). Nos últimos anos, esta produção tem aumentado devido à demanda global pela produção bioenergética (GRHAM-ROWE, 2011; IRENA, 2016). O que justifica esta demanda é que essa produção contribui fortemente com o balanço energético e com a mitigação de mudanças climáticas (BORDONAL *et al.*, 2018).

A cana-de-açúcar nos campos brasileiros está concentrada principalmente nas regiões centro-sul do país, ocupando cerca de nove milhões de hectares (CONAB, 2019b). A intensificação da colheita mecânica no Brasil nos últimos anos tem sido direcionada pela lei que controla e proíbe a queima nos campos, e isto tem promovido o acúmulo de grande quantidade de palha de cana-de-açúcar acima do solo (MENANDRO *et al.*, 2017). De acordo com Carvalho *et al.* (2013), a colheita mecanizada da cana-de-açúcar resulta em grande quantidade de palha na superfície do solo, a qual pode chegar a 30 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> a cada colheita (HASSUANI *et al.*, 2005; VITTI *et al.*, 2011; FRANCO *et al.*, 2013).

A palha de cana-de-açúcar é caracterizada por partes verdes e folhas secas, em senescência, e apresenta papel essencial em melhorar os atributos físicos, químicos e biológicos do solo, como aumento do carbono no solo, menor exigência de fertilizantes devido a ciclagem de nutrientes, regulação da umidade do solo, desenvolvimento da cultura e para a produção de bioeletricidade e etanol de segunda geração (BLANCO-CANQUI; LAL, 2009; FRANZLUEBBERS, 2015; MENANDRO *et al.*, 2017; CASTIONI *et al.*, 2018; CHERUBIN *et al.*, 2018).

Nesse contexto, essa palha que permanece sobre a superfície do solo vem sendo objeto de interesse pelo setor industrial, uma vez que pode ser removida para fins de geração de bioenergia (CASTIONI *et al.*, 2019). Diante disso, a definição do quanto deste material pode ser removido do campo é uma estratégia de manejo altamente importante para o setor sucroenergético e, ao mesmo tempo desafiadora no Brasil (MENANDRO *et al.*, 2017).

A palha que permanece na superfície do solo após a colheita da cana-de-açúcar é de suma importância para as atividades físicas e químicas do solo, além de ser o principal fornecedor de energia, retenção de água e nutrientes do solo (SATIRO *et al.*, 2017). Embora as raízes das plantas forneçam carbono ao solo, a palha da cana-de-açúcar é considerada a principal fornecedora de carbono ao solo nas áreas com cana-de-açúcar, sendo responsável por aproximadamente 80% do carbono presente no solo (CARVALHO *et al.*, 2017b). Além disso, é capaz de proteger o solo combatendo alterações nos agregados, na densidade e aeração do solo,

no qual a combinação desses contribui para o bom funcionamento do solo (SIX *et al.*, 2002).

Logo, a palha apresenta alto potencial em contribuir com a sustentabilidade, qualidade física e estrutural do solo, o aporte de carbono e nutrientes, por favorecer o bom funcionamento das atividades biológicas do solo, melhorar a produtividade de culturas agrícolas, assim como proteger o solo contra o impacto das chuvas e riscos de erosão (MARTINS FILHO *et al.*, 2009; CARVALHO *et al.*, 2013; CARVALHO *et al.*, 2017b). Nesse sentido, remover totalmente a palha da superfície do solo apresenta algumas desvantagens, as quais estão diretamente relacionadas com o aumento da compactação do solo, redução do teor de nutrientes e matéria orgânica, além da macrofauna, sobretudo, em áreas de solos argilosos (SATIRO *et al.*, 2017; MENANDRO *et al.*, 2019).

Apesar dos prejuízos da remoção da palha ser bastante difundido, as quantificações dos efeitos de sua manutenção ainda são escassas e de complexa predição, pois podem sofrer alterações de acordo com as práticas de manejo, os tipos de solos, condições edafoclimáticas e características específicas da área, assim como o cultivo de culturas (CASTIONI *et al.*, 2019). Nesse sentido, muitas pesquisas não incluíram os efeitos da manutenção da palha de cana-de-açúcar e seus respectivos efeitos nos atributos físicos e químicos do solo. Dessa maneira, estudos baseados em diferentes períodos são amplamente reconhecidos e recomendáveis para uma predição mais viável no que diz respeito à remoção da palha e seus efeitos no solo, incluindo a produtividade agrícola (CARVALHO *et al.*, 2019a; PIMENTEL *et al.*, 2019).

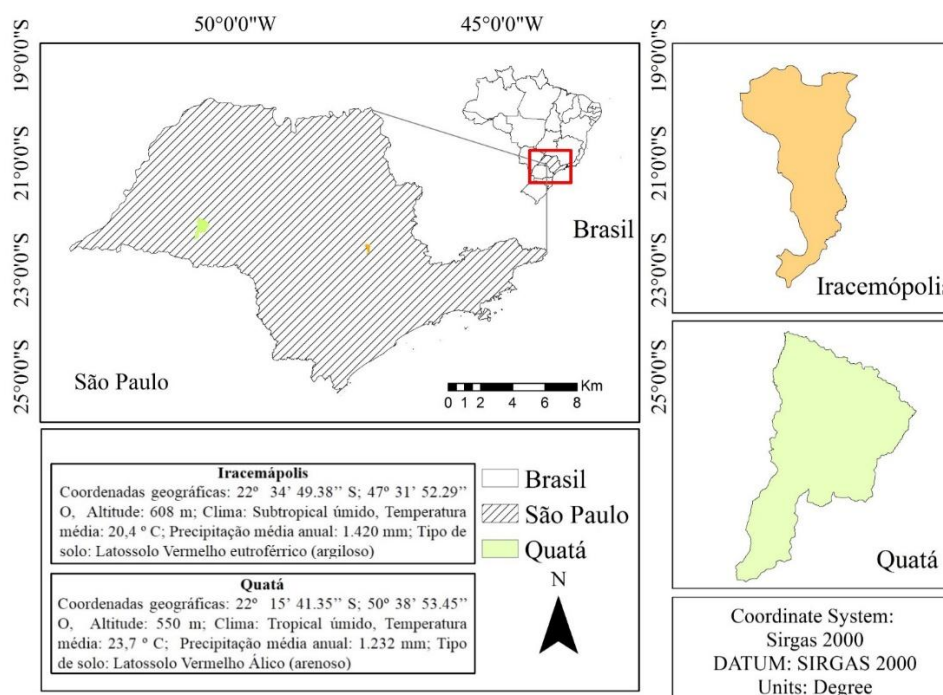
Portanto, o objetivo deste estudo foi avaliar o impacto da remoção de palha nos atributos físicos, estoque de carbono e produtividade da cana-de-açúcar em diferentes tipos de solos do sudeste do Brasil. Para isso, foi testada a hipótese de que a manutenção de maiores doses de palha na superfície do solo, por exemplo, 10 e 15 Mg ha<sup>-1</sup>, independentemente do tipo de solo, diminui a densidade do solo e a resistência do solo a penetração e, aumenta a porosidade do solo, macro e microporosidade, proporcionando conseqüentemente maiores produtividades da cana-de-açúcar.

## **7.2 MATERIAL E MÉTODOS**

### **7.2.1 Descrição da área de estudo**

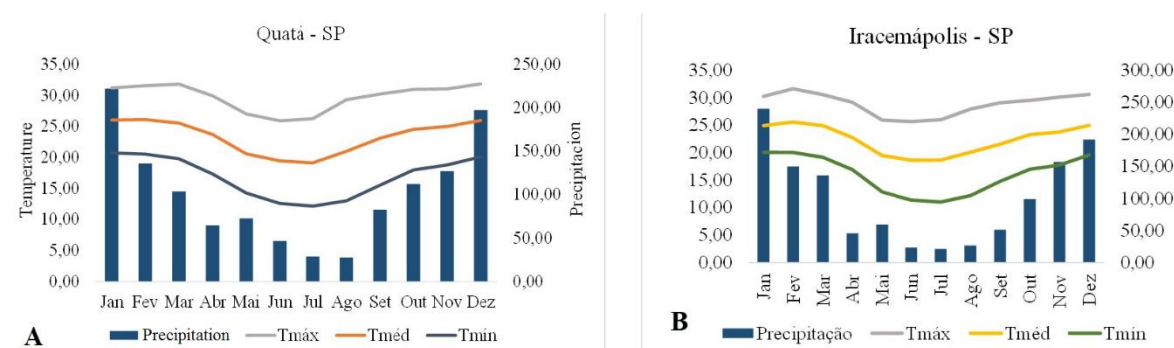
Os experimentos foram realizados nas usinas Iracema e Zilor, localizadas nos municípios de Iracemópolis e Quatá no estado de São Paulo, respectivamente (Figura 5). A escolha destes locais esteve relacionada a localização das usinas e suas características edafoclimáticas, que poderiam influenciar na decomposição da palha e conseqüentemente na cobertura do solo durante os anos agrícolas de avaliação.

**Figura 5.** Mapa de localização dos municípios de Quatá e Iracemópolis em relação ao estado de São Paulo, Brasil.



Os dois municípios são caracterizados por diferentes distribuições pluviométricas e temperaturas mínimas e máximas. As Figuras 6A e 6B mostram tais distribuições pluviométricas que são determinantes na decomposição da palha, nos municípios Iracemópolis (solo de textura argilosa) e Quatá (solo de textura arenosa) nos períodos de 1995-2018 e 1991-2018, respectivamente.

**Figura 6.** Temperatura mínima, máxima, média e precipitação mensal do município de Quatá-SP. (A) – (1991-2018) e do município de Iracemópolis-SP (B) – (1995-2018).



Em cada área experimental foram selecionados locais cultivados com cana crua de primeiro corte com a mesma variedade. Após a colheita foram estabelecidas as quantidades de palha (0, 5, 10, e 15 Mg ha<sup>-1</sup>) a serem mantidas sobre a superfície do solo em cada parcela. Esse

procedimento foi realizado durante a colheita da primeira soca (safra 2013-2014) e segunda soca (safra de 2014-2015).

Os solos das usinas Iracema e Zilor foram classificados como solos de textura argilosa (Latosolo Vermelho Eutroférico) e solo de textura arenosa (Latosolo Vermelho Álico), respectivamente, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS *et al.*, 2018) ou como Oxisol segundo o Soil Taxonomy System (SOIL SURVEY STAFF, 2014). As características de ambas as áreas podem ser observadas com mais detalhes na Tabela 5.

**Tabela 5.** Caracterização das áreas experimentais localizada nos municípios de Iracemápolis (solo de textura argilosa) e Quatá (solo de textura arenosa), no estado de São Paulo, Brasil.

Características	Usinas	
	Iracemápolis	Quatá
<b>Atributos químicos (0,00-0,40 m)</b>		
pH CaCl <sub>2</sub>	5,4	5,3
Teor de C (g kg <sup>-1</sup> )	25,9	5,7
P (mg dm <sup>-3</sup> )	87	9
K (mmolc dm <sup>-3</sup> )	20	1
Ca (mmolc dm <sup>-3</sup> )	54	37
Mg (mmolc dm <sup>-3</sup> )	22	4
H + AL (mmolc dm <sup>-3</sup> )	16	9
CTC (mmolc dm <sup>-3</sup> )	112	51
Saturação por base (%)	85	81
<b>Atributos Físicos</b>		
Teor de argila (g kg <sup>-1</sup> )		
0,00-0,10 m	556	92
0,10-0,20 m	578	100
0,20-0,40 m	597	142
0,40-0,60 m	633	170
0,60-100 m	628	178
Densidade do solo (Mg m <sup>-3</sup> )		
0,00-0,10 m	1,32	1,63
0,10-0,20 m	1,33	1,72
0,20-0,40 m	1,29	1,68
0,40-0,60 m	1,39	1,62
0,60-100 m	1,36	1,56

pH = potencial hidrogeniônico em cloreto de cálcio; Teor de C = teor de carbono; P = fósforo; K = potássio; Ca = cálcio; Mg = magnésio; H+Al = acidez potencial do solo; CTC = capacidade de troca de cátions.

As áreas experimentais apresentaram diferentes históricos de manejo e implantação. A área experimental localizada na usina Iracema, no momento da instalação do experimento encontrava-se no seu primeiro corte, com colheita realizada de forma mecanizada e estava sendo cultivada com cana-de-açúcar, a mais de 70 anos. A área experimental localizada na usina Zilor, foi precedida por pastagens e estava sendo cultivada com cana-de-açúcar durante 26 anos.

A variedade de cana plantada nos experimentos com solo argiloso e arenoso foi a RB 96 6928. As parcelas foram cultivadas com espaçamento simples distanciadas a 1,50 m. O plantio foi realizado a 0,30 m de profundidade, com densidade de 18 gemas  $m^{-1}$  linear. Essa operação foi procedida por uma plantadora de cana picada da DMB, modelo PCP 6000, com tração realizada por um trator Valtra BH 185 intercooler, com bitola traseira e dianteira de 2,10 m e 1,80 m, respectivamente. O implemento possui capacidade de volume de 24  $m^3$ , massa de 9320 kg, altura de 4,30 m, comprimento de 7,60 m e largura de 3,65 m em operação.

### **7.2.2 Delineamento experimental**

O delineamento experimental em ambas as áreas foi realizado em blocos ao acaso, com quatro repetições para avaliar os efeitos dos diferentes manejos da palha sobre os atributos físicos e químicos do solo e na produtividade da cana-de-açúcar. Os tratamentos estabelecidos foram com quatro quantidades de massa seca de palha, 0, 5, 10 e 15  $Mg\ ha^{-1}$ , em duas áreas experimentais com solos de textura distintas (arenosa e argilosa). Cada parcela foi composta por oito linhas de cana-de-açúcar com espaçamento de 1,5 m e 10 m de comprimento, perfazendo um total de 110,5  $m^2$ .

### **7.2.3 Amostragem de solo e análises dos atributos físicos e químicos**

Após dois anos de condução das áreas experimentais, foram coletadas amostras de solo após a colheita da cana-de-açúcar, em abril de 2013, tanto em Quatá-SP como em Iracemápolis-SP. Nessa ocasião foram coletadas amostras deformadas e indeformadas nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m para análise dos seguintes atributos: macroporosidade, microporosidade, porosidade total, densidade do solo e resistência do solo à penetração. Além disso, para avaliar os efeitos no estoque de carbono no solo foi realizada adicionalmente a coleta de amostras deformadas na camada de 0,00-0,05 m.

Após a coleta das amostras no campo, essas foram identificadas, acondicionadas e transportadas para o laboratório, onde as análises de densidade do solo e porosidade do solo foram realizadas conforme estabelecido por Teixeira *et al.* (2017). A resistência do solo à

penetração foi obtida de acordo com a equação sugerida por Stolf *et al.* (2014). A determinação do teor total de carbono no solo ocorreu por combustão via seca em um analisador elementar, conforme a metodologia descrita por Nelson e Sommers (1996).

#### **7.2.4 Estoque de carbono no solo**

Nas duas áreas experimentais foi calculado o estoque de carbono nas seguintes camadas: 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m com base na densidade do solo, quantidade de carbono no solo e na espessura da camada. A quantidade de carbono estocada no solo nas camadas de 0,00-0,40 m foi obtida por meio de adição simples da quantidade de carbono estocado nas diferentes profundidades.

Considerando que as coletas de solos foram realizadas sempre em camadas específicas sob tratamentos diferentes, os valores médios normalmente apresentaram erros específicos, dessa forma foi empregada a metodologia sugerida por Ellert e Bettany (1995) para ajustar os erros nos estoques de carbono.

#### **7.2.5 Produtividade da cana-de-açúcar**

A produtividade final de colmos foi determinada via colheita manual em quatro linhas de 10 m de comprimento em cada uma das parcelas. Após a colheita das plantas, foi realizado o desponte na altura da gema apical e à desfolha das plantas e, em seguida esse material foi pesado e os resultados expressos em toneladas de cana-de-açúcar por hectare (TCH).

#### **7.2.6 Análise estatística**

Diferenças significativas entre os tratamentos foram avaliadas por meio de análise de variância (ANOVA) utilizando o teste t, que ao apresentar significância foram submetidos a um teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade, essa análise foi realizada com o auxílio do software Sisvar (5.7). Em seguida, foi realizada uma análise multivariada utilizando o software Statistica 7.

A análise multivariada foi aplicada padronizando-se as unidades dos atributos com média igual a 0 e variância igual a 1. A análise de componentes principais (ACP) foi realizada para explicar a estrutura da variância dos dados de solos por meio de correlações lineares das variáveis avaliadas com os componentes principais (CP) (JOHNSON; WICHERN, 2002; HAIR *et al.*, 2005). Para análise multivariada, foi realizada uma seleção prévia e eliminação das variáveis altamente correlacionadas. Foram utilizados então todos os demais dados obtidos dos



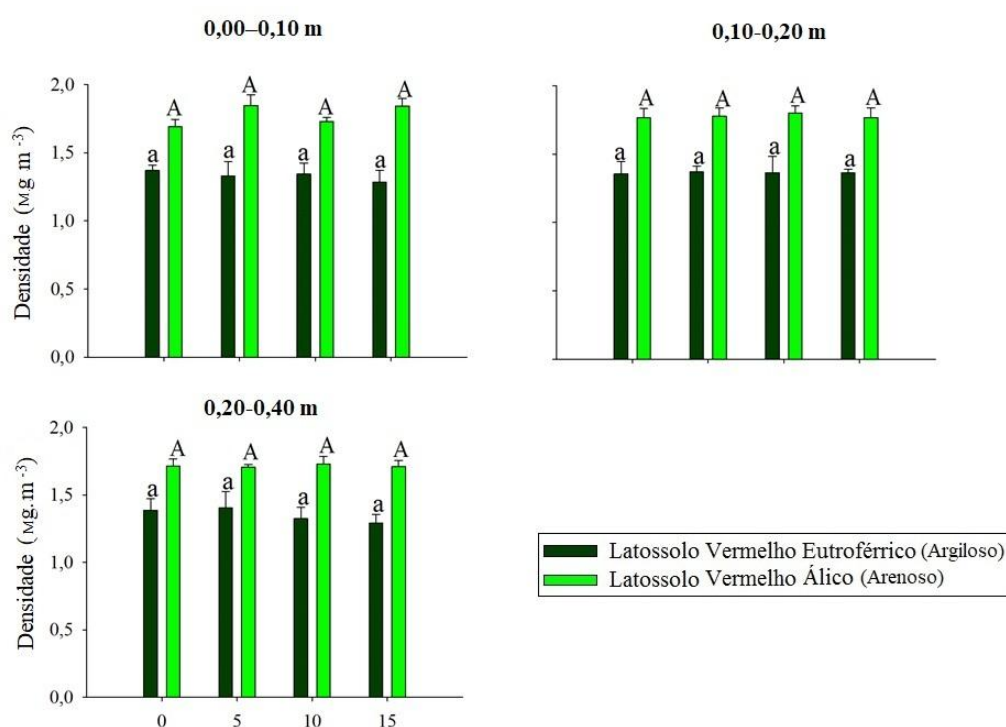
atributos químicos e físicos do solo. Os resultados das porcentagens de contribuição das variáveis e o comportamento da projeção dos pontos amostrais nos gráficos biplot foram utilizados para comparar os diferentes tratamentos avaliados.

## 7.3 RESULTADOS

### 7.3.1 Atributos físicos do solo

Independentemente do tipo de solo e camada avaliada, as remoções de palha em diferentes proporções não promoveram diferenças significativas na densidade do solo. No solo com textura argilosa observou-se menores valores médios de densidade do solo ( $1,29 \text{ Mg m}^{-3}$  a  $1,35 \text{ Mg m}^{-3}$ ) em relação ao solo com textura arenosa, ( $1,27 \text{ Mg m}^{-3}$  a  $1,84 \text{ Mg m}^{-3}$ ) (Figura 7).

**Figura 7.** Valores médios de densidade do solo ( $\text{Mg m}^{-3}$ ) em área submetida a diferentes níveis de palha de cana-de-açúcar (0, 5, 10 e 15  $\text{Mg ha}^{-1}$ ) mantidos na superfície do solo, em área de textura argilosa e arenosa. \*Letras minúsculas correspondem solo de textura argilosa e maiúsculas correspondem ao solo de textura arenosa. \*Os valores médios caracterizados pela mesma letra não diferiram significativamente de acordo com o teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).



No solo com textura argilosa a camada de 0,00-0,10 m apresentou valores de densidade do solo entre  $1,30$  e  $1,36 \text{ Mg m}^{-3}$  (Figura 7). Neste mesmo solo, a densidade na camada de 0,10-0,20 m, apresentou valores entre  $1,35$  a  $1,36 \text{ Mg m}^{-3}$  e na camada de 0,20-0,40

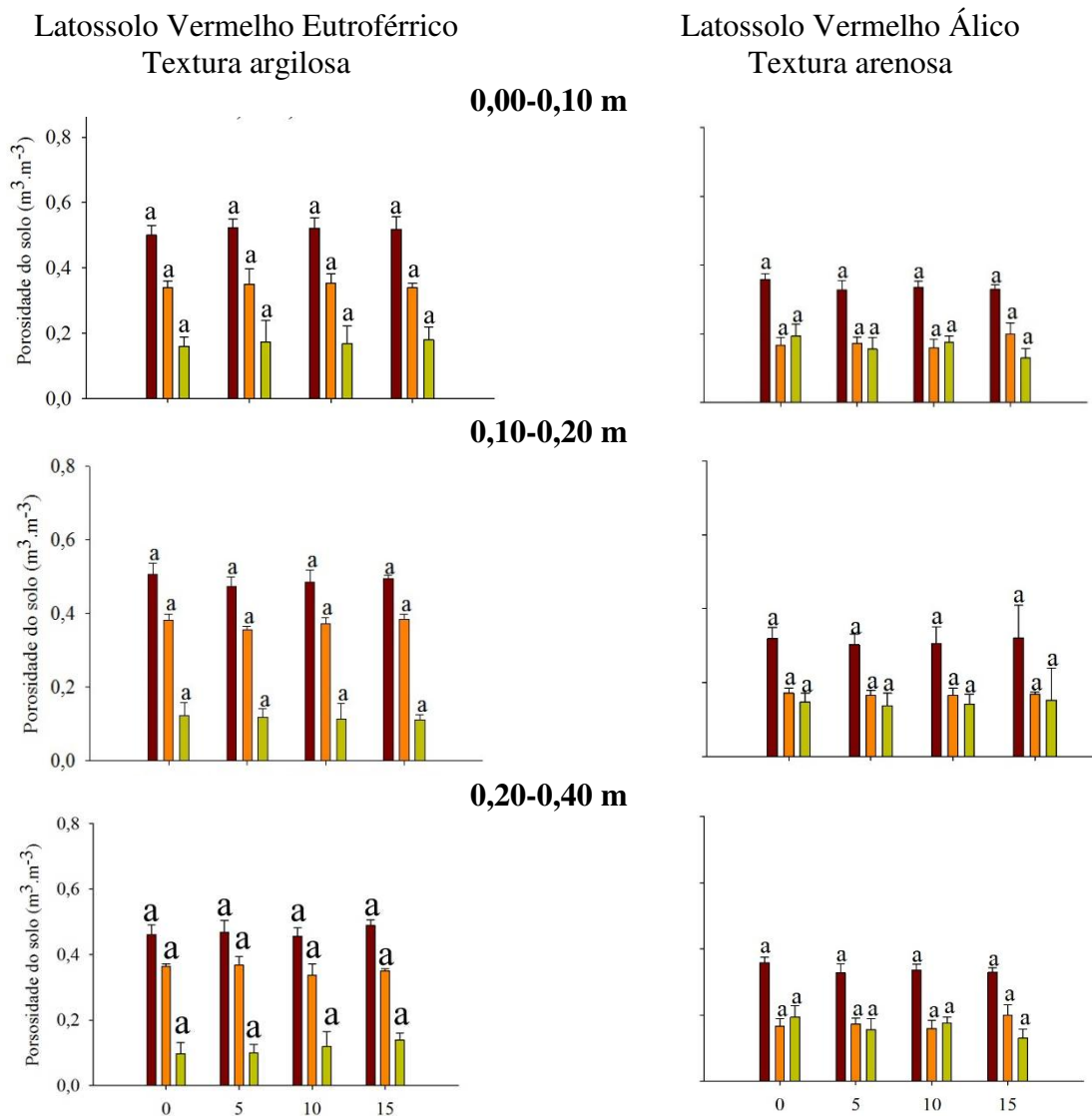
m houve variação de 1,30 e 1,38 Mg m<sup>-3</sup>. No solo de textura arenosa, todas as camadas apresentaram maiores valores em relação ao solo com textura argilosa. A camada de 0,00-0,10 m apresentou valores de 1,70 a 1,85 Mg m<sup>-3</sup>, na camada de 0,10-0,20 m ocorreu variação entre 1,76 Mg m<sup>-3</sup> a 1,80 Mg m<sup>-3</sup> e na profundidade de 0,20-0,40 m para os diferentes tratamentos foi de 1,70 Mg m<sup>-3</sup>.

No que diz respeito ao volume de poros do solo, a porosidade total, microporosidade e macroporosidade não apresentaram diferenças significativas em relação as doses de palha mantido na superfície do solo com textura argilosa (Figura 8). Na camada de 0,00-0,10 m, os valores de porosidade total foram de 0,49 a 0,51 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>. Na camada de 0,10-0,20 m houve uma redução mínima entre a dose 0 e 5 Mg ha<sup>-1</sup> (0,50 para 0,47 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>), porém, para as de doses 10 e 15 Mg ha<sup>-1</sup> os valores foram de 0,48 e 0,49 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, respectivamente. Ao mesmo tempo na camada de 0,20-0,40 m apresentaram valores que variaram entre 0,46-0,49 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>.

A microporosidade nesta mesma área, atingiu valores máximos de 0,34 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> na camada de 0,00-0,10 m (Figura 8). Na camada de 0,00-0,40 m os valores máximos foram constantes variando de 0,33 a 0,35 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>. Da mesma forma, a macroporosidade apresentou valores constantes em todas as camadas, sob todos os tratamentos experimentais, em que a manutenção da palha atingiu valor máximo de 0,17 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>.

Em relação ao volume de poros no solo com textura arenosa foi observada redução na porosidade total, macroporosidade e microporosidade, principalmente nas doses 5 Mg ha<sup>-1</sup> e 10 Mg ha<sup>-1</sup> nas camadas superficiais (Figura 8). Na camada de 0,00-0,10 m a porosidade total do solo de textura arenosa apresentou redução de 0,34 para 0,31 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> entre as doses 0 e 15 Mg ha<sup>-1</sup>. A microporosidade na dose 0 Mg ha<sup>-1</sup> (0,16 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>) nas camadas de 0,00-0,10 m foi menor do que nas demais doses, em que a dose 5 apresentou valor médio de 0,17 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> e as dose 10 e 15 Mg ha<sup>-1</sup> de 0,18 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>. No entanto, diferenças significativas foram observadas apenas para a macroporosidade nas camadas de 0,00-0,10 m com valores de 0,18 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> que decaíram para 0,13 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> entre os tratamentos de 0 a 15 Mg ha<sup>-1</sup>.

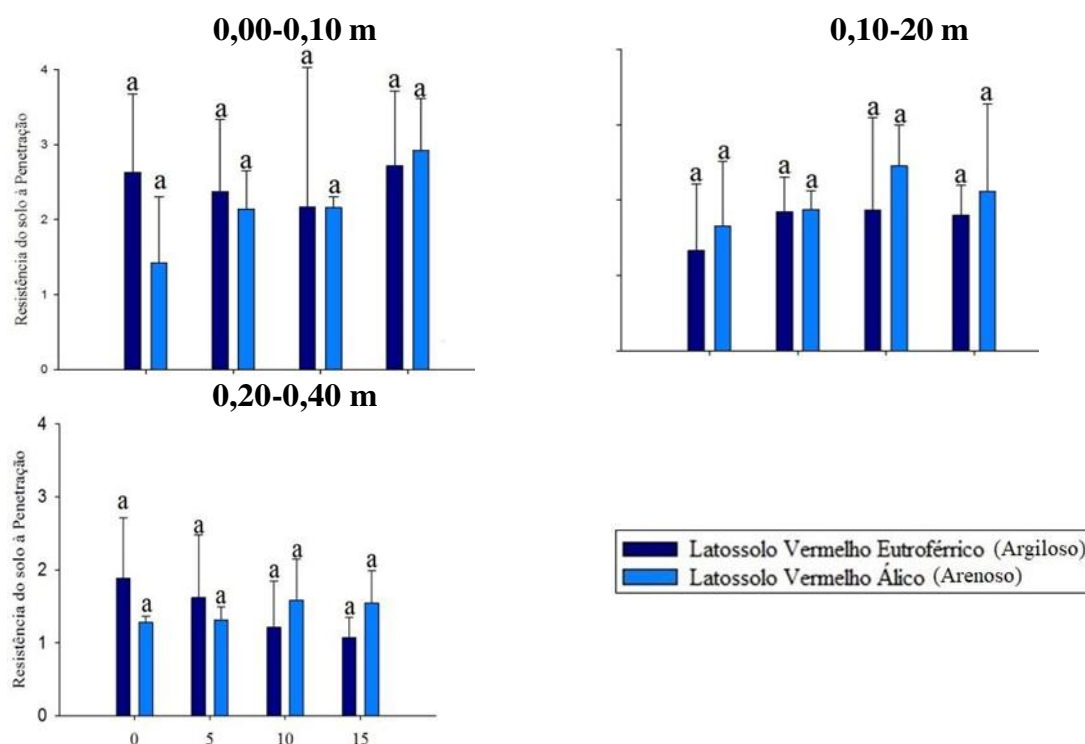
**Figura 8.** Valores médios de porosidade do solo em área submetida a diferentes níveis de palha de cana-de-açúcar (0, 5, 10 e 15 Mg ha<sup>-1</sup>) mantidos na superfície do solo, em Latossolo Vermelho Eutroférico e Álico (textura argilosa e arenosa, respectivamente). \*Os valores médios caracterizados pela mesma letra não diferiram significativamente de acordo com o teste de Tukey (p < 0,05).



Independentemente do tipo de solo, não houve diferenças significativas para a resistência do solo à penetração (Figura 9). Para o solo com textura argilosa na camada de 0,00-0,10 m os valores variaram entre 2,16 MPa a 2,71 MPa. Para a camada de 0,10-0,20 m, os valores foram de 1,83 MPa a 1,80 MPa. Já para a camada de 0,20-0,40 m os valores estiveram entre 1,06 a 1,88 MPa. Observa-se uma redução nos valores médios de resistência do solo à penetração e em suas respectivas barras de erro, indicando que o aumento da profundidade foi

determinante no comportamento da resistência do solo à penetração.

**Figura 9.** Valores médios da resistência do solo à penetração em área submetida a diferentes níveis de palha de cana-de-açúcar (0, 5, 10 e 15 Mg ha<sup>-1</sup>) mantidos na superfície do solo, em solo solo com textura argilosa e arenosa. \*Os valores médios caracterizados pela mesma letra não diferiram significativamente de acordo com o teste de Tukey (p < 0,05).



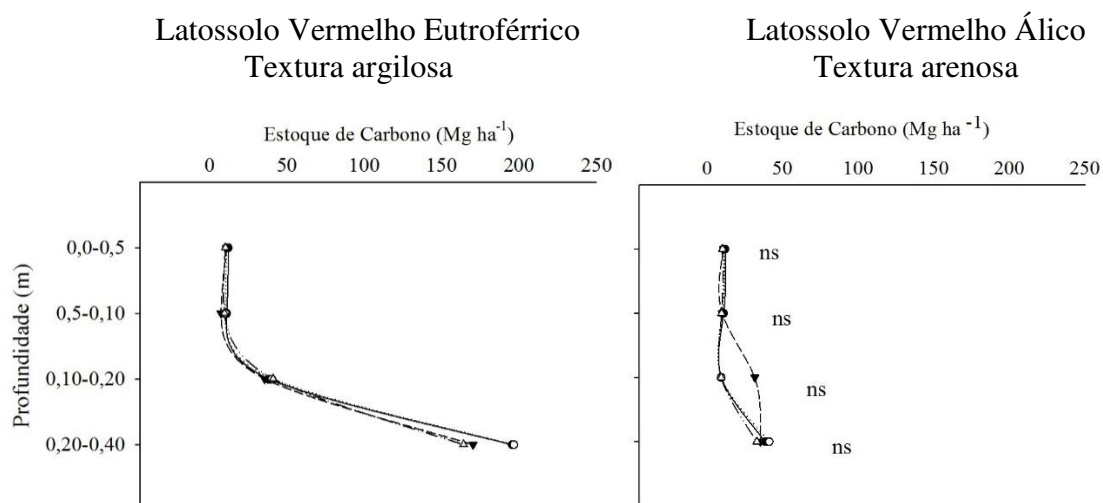
Para a áreas de solo com textura arenosa na camada de 0,00-0,10 m a resistência do solo à penetração variou de 1,42 MPa a 2,92 MPa (Figura 9). Nas camadas de 0,10-0,20 m os valores estiveram entre 1,65 e 2,11 MPa. Por fim, para a camada de 0,20-0,40 m, da mesma forma que o solo com textura argilosa a resistência do solo à penetração apresentou menores valores em relação as demais camadas, em que os valores foram de 1,27-1,57 MPa.

### 7.3.2 Estoque de carbono do solo

A distribuição do estoque de carbono de acordo com as profundidades no solo com textura argilosa, sob a influência dos diferentes níveis de palha mantidos na superfície do solo pode ser observado na Figura 10. O manejo da remoção da palha durante dois anos agrícola não modificou o estoque de carbono (C) no solo com textura argilosa. Dentre as doses 0 a 15 Mg ha<sup>-1</sup> o estoque de C do solo nas camadas de 0,00-0,10 m decaiu de 15% para 9%. Na camada de 0,10-0,20 m a quantidade máxima de carbono estocado no solo foi de 41 Mg ha<sup>-1</sup> na dose 15 Mg

ha<sup>-1</sup> e, nessas mesmas camadas houve um decaimento de 10% para 8%. Na camada de 0,20-0,40 m o estoque médio de C foi de 196 Mg ha<sup>-1</sup> na dose 0 Mg ha<sup>-1</sup>, 170 Mg ha<sup>-1</sup> na dose 10 Mg ha<sup>-1</sup> e 164 Mg ha<sup>-1</sup> na dose 15 Mg ha<sup>-1</sup>, sendo que a dose 5 Mg ha<sup>-1</sup> apresentou maiores valores de estoque de carbono (196 Mg ha<sup>-1</sup>).

**Figura 10.** Estoque de carbono do solo para os diferentes níveis de palha de cana-de-açúcar (0, 5, 10 e 15 Mg ha<sup>-1</sup>) mantidos na superfície do solo, nas profundidades de 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m em Latossolo Vermelho Eutroférico e Álico (textura argilosa e arenosa respectivamente). \* ns corresponde aos valores médios com diferenças não significativas de acordo com o teste de Tukey (p <0,05).



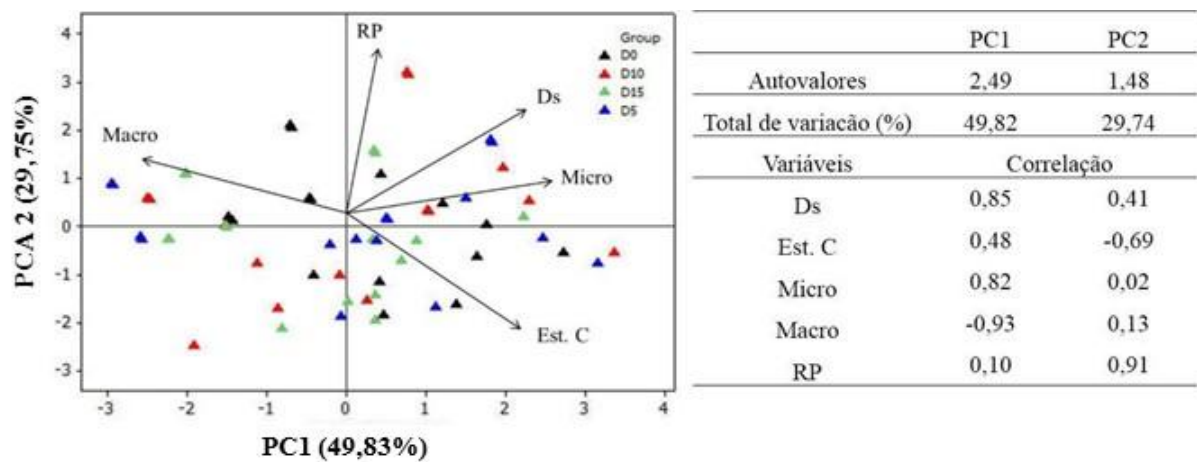
A distribuição do estoque de carbono para o solo com textura arenosa pode ser observada na Figura 10. Os resultados indicaram que o estoque de carbono no solo com textura argilosa foi inferior ao solo com textura arenosa independente da profundidade avaliada. Entretanto, não houve diferenças significativas para as diferentes quantidades de palha. Na camada de 0,00-0,10 m nas doses de 0 e 5 Mg ha<sup>-1</sup> proporcionaram no máximo um estoque de 12 Mg ha<sup>-1</sup> de carbono e as doses 10 e 15 Mg ha<sup>-1</sup> promoveram valores máximos de 11 Mg ha<sup>-1</sup>. Na camada de 0,10-0,20 m o maior estoque de carbono foi de 32 Mg ha<sup>-1</sup> na dose 10 Mg ha<sup>-1</sup>. Em relação à camada de 0,20-0,40 m foram atingidos valores máximos de 41 Mg ha<sup>-1</sup>.

### 7.3.3 Análise multivariada dos atributos do solo com a remoção da palha em solo de textura argilosa e arenosa

A análise de componentes principais identificou que o grupo 1 (PCA 1) explicou cerca de 49,83% de variação total dos dados ocorrendo correlações positivas para RP (0,10),

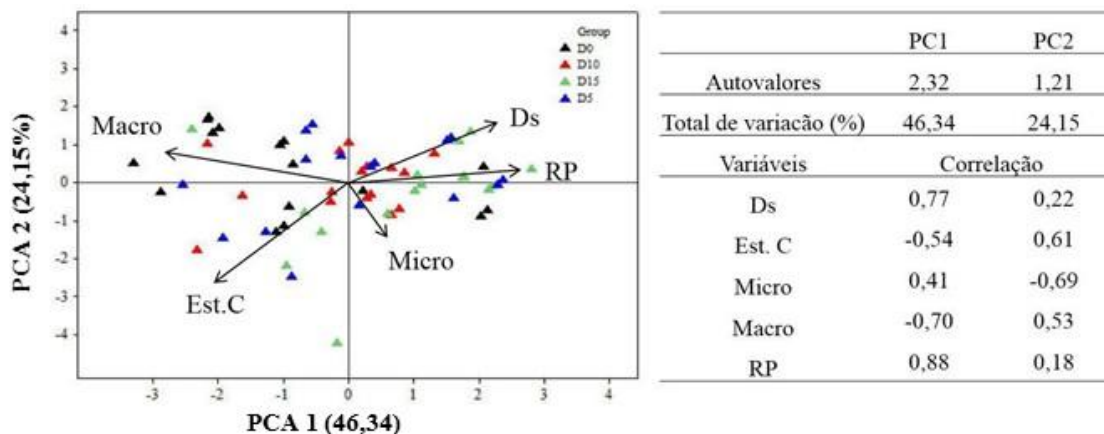
Ds (0,85), Micro (0,82) e Est. C (0,48) e, negativas para a Macro (-0,93) (Figura 13). O componente principal 2 (PCA 2) explicou cerca de 29,45%, havendo correlações positivas entre a Macro (0,13), Ds (0,11) e RP (0,91) e negativas com a Micro (-0,02) e o Est. C (-0,69).

**Figura 11.** Análise de componentes principais (PCA) com 95% de confiança para diferentes níveis de palha (0, 5, 10 e 15 Mg ha<sup>-1</sup>) mantidos na superfície do solo nas camadas de 0,00-0,40 m em área com Latossolo Vermelho Eutroférico (textura argilosa) no município de Iracemápolis-SP. Macro = macroporosidade; Micro = microporosidade; Ds = densidade do solo; RP = resistência do solo à penetração; Est.C = estoque de carbono.



Não houve agrupamentos que indicasse diferenças significativas entre as variáveis correlacionadas no solo com textura arenosa durante os dois anos agrícolas (Figura 14). Os dados dos componentes principais (CP 1) explicaram cerca de 70,50% da variação dos dados em que a correlação positiva foi entre os dados de Micro (0,41), Ds (0,77) e RP (0,88) e negativos com a Macro (-0,70) e Est. C (-0,54). Cerca de 46,34% da variação dos dados no solo com textura arenosa foi explicada pelo componente principal dois (CP2), em que Micro (0,41), Ds (0,77) e RP (0,88) foram correlacionadas positivamente e, a Macro (-0,70) e o Est. C (-0,54), negativamente.

**Figura 12.** Análise de componentes principais (CP) com 95% de confiança para diferentes níveis de palha (0, 5, 10 e 15 Mg ha<sup>-1</sup>) mantidos na superfície do solo nas camadas de 0,00-0,40 m em área com Latossolo Vermelho Álico (textura arenosa). Macro = macroporosidade; Micro = microporosidade; Ds = densidade do solo; RP = resistência do solo à penetração; Est.C = estoque de carbono.



### 7.3.4 Produtividade da cana-de-açúcar

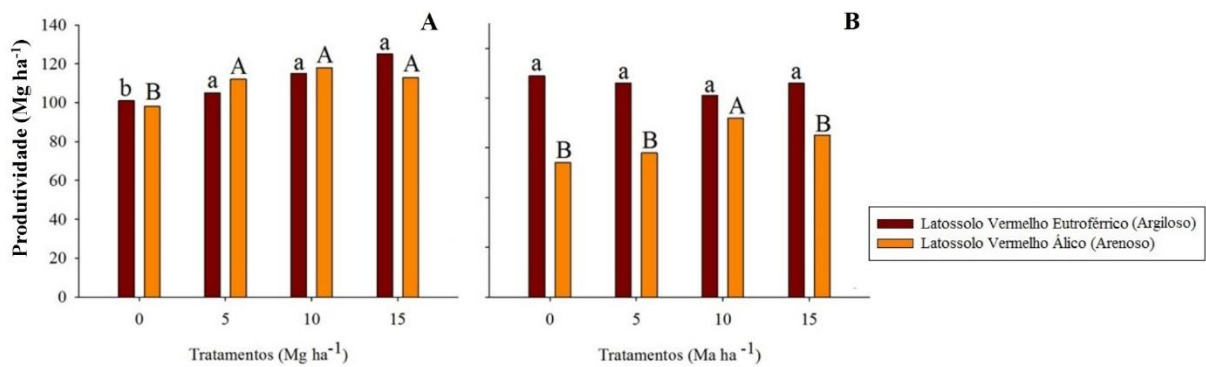
Ao contrário dos atributos físicos do solo e estoque de carbono, a produtividade da cana-de-açúcar foi influenciada significativamente pelo nível de palha mantido na superfície do solo, tanto no solo com textura argilosa como no solo arenoso (Figura 15). Para o solo com textura argilosa durante o ciclo de produção da cana planta (safra 2013/14), a dose 0 Mg ha<sup>-1</sup> promoveu menores produtividades de cana-de-açúcar (101 Mg ha<sup>-1</sup>) em relação a manutenção de 5, 10 e 15 Mg ha<sup>-1</sup>, as quais não se diferenciam estatisticamente entre si em ambos os solos, apresentando valores de 105 Mg ha<sup>-1</sup> (3,96%), 115 Mg ha<sup>-1</sup> (17,34%) e 125 Mg ha<sup>-1</sup> (23,76%) Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

No solo com textura arenosa a dose 0 Mg ha<sup>-1</sup> apresentou produtividade média de 98 Mg ha<sup>-1</sup>, em que as doses de 5, 10 e 15 Mg ha<sup>-1</sup> apresentaram valores de 112 Mg ha<sup>-1</sup> (14,28%), 118 Mg ha<sup>-1</sup> (20,40%) e 113 Mg ha<sup>-1</sup> (15,30%), respectivamente. Destaca-se que a dose 0 Mg ha<sup>-1</sup> se diferenciou dos demais tratamentos por reduzir a produtividades de cana-de-açúcar (3,96% e 15,30%) tanto no solo com textura argilosa e arenosa no primeiro ano agrícola, respectivamente (Figura 13A).

Durante o segundo ciclo de produção da cana soca (safra 2014/15), não houve diferenças significativas para o solo com textura argilosa. Porém, para o solo com textura arenosa, a dose de 0 Mg ha<sup>-1</sup> atingiu uma produção de 54 Mg ha<sup>-1</sup>, variando 7%, 33% e 20% em relação aos tratamentos 5, 10 e 15 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. A manutenção de 10 Mg ha<sup>-1</sup>

proporcionou a maior produção de cana-de-açúcar, com valores médios de 72 Mg ha<sup>-1</sup> de cana-de-açúcar (Figura 13B).

**Figura 13.** Produtividade da cana-de-açúcar nos ciclos cana planta (safra 2013/14), na Figura “A” e soca (2014/15), na Figura “B”, sob a manutenção de 0, 5, 10 e 15 Mg ha<sup>-1</sup> de palha de cana-de-açúcar nos solos solo com textura argilosa e arenosa. \*A Figura “A” corresponde aos dados do 1º ano agrícola dos solos de textura argilosa e arenosa; e a Figura “B” corresponde aos dados do 2º ano agrícola dos solos de textura argilosa e arenosa. Médias seguidas da mesma letra, não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade ( $P < 0,05$ ).





## 7.4 DISCUSSÃO

### 7.4.1 Impactos da remoção da palha em curto prazo nos atributos físicos

Os impactos da manutenção da palha de cana-de-açúcar na qualidade física do solo são emergentes no Brasil (FRANCO *et al.*, 2013). Os resultados deste estudo demonstraram que apenas dois anos agrícolas (cana planta e soca) não foram suficientes para evidenciar modificações significativas na densidade, porosidade e resistência do solo à penetração devido a manutenção de diferentes níveis de manutenção de palha na superfície do solo.

No entanto, um estudo realizado por Satiro *et al.* (2017) os autores encontraram impactos negativos nos atributos físicos do solo, em que avaliaram os efeitos da remoção da palha de cana-de-açúcar em argissolo e latossolo no centro-sul do Brasil em dois anos agrícolas. Os resultados mostraram que a remoção da palha induziu o aumento da densidade e resistência do solo à penetração, em solos com textura argilosa. Contudo, esse aumento está relacionado não somente devido aos níveis de remoção ou manutenção da palha e, também pelas características naturais das áreas experimentais, assim como a textura do solo (BLANCO-CANQUI; LAL, 2007).

Em um estudo desenvolvido recentemente, por Castioni *et al.* (2019), os autores apontaram que a remoção da palha, durante quatro anos, foi capaz de evidenciar diferenças significativas em tratamentos com ausência, baixa, alta e remoção total da palha. Os resultados mostraram que a baixa remoção não foi prejudicial à qualidade física do solo e produtividade. No entanto, a remoção intensiva da palha induziu o aumento da compactação do solo, devido ao aumento da densidade e resistência do solo à penetração, bem como a redução dos agregados do solo. Em concordância, Castioni *et al.* (2018), verificaram que a remoção da palha durante quatro anos degradou o solo, principalmente os atributos físicos nas parcelas com alta ou remoção total, com exceção da macroporosidade.

Ainda nesse contexto, Bordonal *et al.* (2018), observaram que a taxa de remoção total da palha por dois anos, em Quatá-SP e Quirinópolis-GO, afetou a qualidade do solo e levou a redução do estoque de carbono proveniente da matéria orgânica, ao mesmo tempo que a remoção intermediária ou baixa não modificou os níveis de humificação. Cherubin *et al.* (2018) avaliaram a qualidade física do solo com a remoção da palha de cana-de-açúcar no Brasil e, recomendam manter cerca de 10 Mg ha<sup>-1</sup> de palha na superfície do solo, sendo uma estratégia para melhorar a sustentabilidade do solo e fortalecer a produção de bioenergia.

A palha que permanece na superfície do solo após a colheita da cana-de-açúcar é de suma importância para os atributos do solo, pois pode fornecer energia, retenção de água e nutrientes do solo (SATIRO *et al.*, 2017). Além disso, a palha da cana-de-açúcar está

diretamente relacionada com os agregados, densidade e aeração do solo, em que a combinação desses elementos contribui para o bom funcionamento do solo (SIX *et al.*, 2002).

Diferentes trabalhos avaliaram que a manutenção da palha tem um papel importante no manejo do solo e aumento dos benefícios para a qualidade física do solo (TORMENA *et al.*, 2017; CASTIONI *et al.*, 2018, CARVALHO *et al.*, 2019b). A palha promove o combate contra a erosão do solo, a diminuição contra os impactos dos rodados das máquinas sobre o solo e o aumento da estabilidade dos agregados do solo (SIX *et al.*, 2002; CASTIONI *et al.*, 2018).

De acordo com Lisboa *et al.* (2018) as mudanças nos atributos físicos do solo podem variar de acordo com a remoção da palha e, principalmente por conta das características específicas do local como o manejo e em função do tipo do solo. Além disso, a palha que permanece acima do solo após a colheita da cana-de-açúcar mecanizada, atua como amortecedor na camada superficial do solo diminuindo a força de contato dos rodados das máquinas agrícolas (CHERUBIN *et al.*, 2016). Diferentes estudos explicaram que a remoção da palha do solo está diretamente relacionada com a erosão e degradação do solo e pode atuar contra esses processos que prejudicam a qualidade física do solo (CAMPBELL *et al.*, 2014; CARVALHO *et al.*, 2017b).

Embora os níveis de palha não tenham promovido diferenças significativas nos atributos do solo em curto prazo, foi perceptível que o solo com textura argilosa apresentou maior porosidade do solo, estoque de carbono e menores valores de densidade do solo, enquanto a resistência do solo à penetração variou, quando comparado ao solo com textura arenosa. Esses resultados estão relacionados a textura natural que cada solo apresenta. Corroborando com essa afirmação, Satiro *et al.* (2017), afirmam que os efeitos da remoção da palha de cana-de-açúcar podem ser característicos das áreas experimentais considerando as condições naturais do solo e condições edafoclimáticas. As diferenças encontradas entre as duas áreas experimentais estiveram associadas às condições ambientais dos solos e condições edafoclimáticas específicas dos locais e, não em razão à manutenção de diferentes quantidades de palha sobre o solo.

#### **7.4.2 Efeitos da manutenção da palha no estoque de carbono do solo**

Muitos estudos comprovaram que o efeito da remoção da palha está diretamente relacionado com os atributos químicos do solo, tais como o teor de carbono e nutrientes, que por sua vez, influenciam na qualidade e desenvolvimento das plantas (FRANCO *et al.*, 2013; KARLEN *et al.*, 2014). Entretanto, os resultados deste estudo indicam que a remoção da palha da cana-de-açúcar não influenciou nas perdas de carbono do solo, durante os dois anos agrícolas da pesquisa, tanto em áreas com solo de textura argilosa como arenosa. Em contraste, em estudo

desenvolvido por Castioni *et al.* (2019) os autores demonstraram que o manejo intensivo durante quatro anos de retirada da palha em diferentes quantidades (alta e remoção total), modificaram significativamente a qualidade do solo e reduziram o estoque de carbono nas camadas superficiais ao remover totalmente a palha, porém, a perda foi duas vezes maior em solos de textura arenosa.

Corroborando com os resultados deste estudo, uma pesquisa desenvolvida por Satiro *et al.* (2017) na qual foi realizada uma avaliação sobre os efeitos da remoção da palha da cana-de-açúcar de 0, 25, 50, 75 e 100% em argissolos (arenosos) e latossolos (argilosos) no centro-sul do Brasil, em que os resultados mostraram, por meio da análise multivariada, que a retirada da palha, durante dois anos, sobre o solo implicou na degradação física do solo e na perda de carbono em latossolos e reduziu significativamente a perda de nutrientes em argissolo. Logo, os solos de textura arenosa mostraram maiores tendências às perdas de qualidade de acordo com a remoção da palha. Em concordância, Carvalho *et al.* (2017a), verificaram que o estoque de carbono no solo proveniente da palha da cana-de-açúcar varia entre 50% e 80% até uma profundidade de 0,30 m. Os mesmos autores afirmam que a quantidade de carbono foi reduzida quando a palha sobre o solo foi retirada totalmente em uma área, enquanto a remoção de menores quantidades não modificou o estoque de carbono no solo durante quatro anos nas áreas estudadas.

Diversas pesquisas demonstram que a palha da cana-de-açúcar que permanece sobre o solo após a colheita é a principal fornecedora de carbono ao solo, em que normalmente é responsável por mais de 80% (três vezes mais que a entrada pelas raízes) do carbono no solo (BLANCO-CANQUI; LAL, 2009; MARIN *et al.*, 2014; CARVALHO *et al.*, 2017b; SATIRO *et al.*, 2017). Dessa forma, acredita-se que estudos sobre a manutenção da palha de cana-de-açúcar de maior duração são fundamentais para se observar diferenças significativas nos atributos físicos e estoque de carbono do solo.

A decomposição da palha foi estudada em alguns trabalhos no Brasil. A quantidade média decomposta da massa seca da palha na rebrota da cana-de-açúcar é de cerca de 20% (VITTI *et al.*, 2011; FORTES *et al.*, 2012). Diante disso, o clima, a temperatura, a quantidade de água disponível, a textura do solo e os atributos, são determinantes no processo de decomposição química da palha (ROBERTSON; THORBURN, 2007; VITTI *et al.*, 2011; FORTES *et al.*, 2012). Dessa forma, considerando as diferentes condições edafoclimáticas das áreas de estudo pressupõe-se que haverá uma dinâmica diferente de decomposição da palha com base na influência desses fatores.

Nesse sentido, a quantidade de palha pode influenciar na decomposição devido à

umidade no solo permitindo que as atividades microbianas funcionem melhor, e controlem relativamente o nitrogênio imobilizado pelos microrganismos do solo que podem diminuir a relação C:N e impulsionar a mineralização (OLIVEIRA *et al.*, 1999; ALVARENGA *et al.*, 2001; KLIEMANN *et al.*, 2006; AUSTIN; BALLARÉ, 2010).

A palha de cana-de-açúcar possui uma relação C:N, de 100:1, em que a imobilização do N (nitrogênio) é determinante no processo de decomposição deste material, ao mesmo tempo que a quantidade deste elemento disponível às plantas diminui (OLIVEIRA *et al.*, 2017). Logo, diversos fatores podem prolongar a manutenção da palha na superfície do solo, os quais podem estar diretamente relacionados aos teores de N disponíveis para os seres vivos do solo. Além disso, como a decomposição ocorre na superfície do solo, presume-se que maior quantidade de nutrientes esteja mais concentrada nas primeiras camadas do solo.

A relação C:N, teor de lignina e celulose são atributos químicos provenientes da decomposição da palha que está diretamente relacionada com a composição da palha (FORTES *et al.*, 2012; SANTOS *et al.*, 2012). Assim, de acordo com as condições edafoclimáticas a quantidade de nitrogênio pode atuar fundamentalmente na decomposição da palha da cana-de-açúcar (POTRICH *et al.*, 2014).

Entretanto, a decomposição da palha de cana-de-açúcar leva tempo e pode atuar no processo de compactação do solo, em que este material cria uma barreira física que dissipa a pressão do rodado sobre o solo protegendo-o de perturbações nos primeiros anos e, por causa do intenso fluxo de máquinas a cobertura de palha reduz ao longo dos anos. Nesse contexto, a remoção indiscriminada do solo causa a perda de carbono prejudicando a estrutura e qualidade física do solo (BLANCO-CANQUI; LAL, 2009; CASTIONI *et al.*, 2018).

Uma pesquisa recentemente desenvolvida por Varanda *et al.* (2018) explicou que cerca de 40% da palha deixada no solo, dentro o período de um ano, não consegue se decompor. Isso mostra que a quantidade de palha de cana-de-açúcar pode atuar na proteção do solo contra os impactos das máquinas agrícolas durante a colheita. Nesse sentido, Khatiwada *et al.* (2016), avaliaram o uso da palha de cana-de-açúcar para produção de energia: bioeletricidade *versus* produção de etanol e, observaram que os preços da energia, o tipo de eletricidade substituída, o apoio de biocombustíveis e o teor de carbono influenciaram na produção de energia.

Os resultados deste estudo evidenciaram menor estoque de carbono no solo de textura argilosa comparado com o solo de textura arenosa. Segundo, Singh *et al.* (2015), destacam que os agregados de solo formados por meio da ligação de resíduos orgânicos frescos e partículas minerais do solo podem proteger o carbono do solo da decomposição. Contudo, solos que apresentam capacidade limitada para proteger o carbono orgânico, seja

quimicamente, bioquimicamente ou por meio da agregação, deixam o carbono vulnerável para ser facilmente descomposto (SIX *et al.*, 2002). Provavelmente, o solo com textura arenosa, apresenta uma menor capacidade para estabilização do carbono que o solo com textura argilosa, determinando assim, baixos valores de estoque de carbono. Ao contrário do solo arenoso, o argiloso apresenta capacidade maior de agregar partículas, que é fundamental na estabilização do carbono no solo, de modo que a os agregados formem uma barreira física à matéria orgânica no solo contra à ação microbiana (SIX *et al.*, 2000; CERRI *et al.*, 2007; CARBONNELL-BOJOLLO *et al.*, 2012).

#### **7.4.3 Produtividade da cana-de-açúcar**

Os resultados obtidos neste estudo demonstraram que a palha mantida sobre o solo modificou a produtividade da cana-de-açúcar, tanto em solo com textura argilosa ou arenoso, de acordo com as doses de 0, 5, 10 e 15 Mg ha<sup>-1</sup>. No ciclo da cana planta, quando toda a palha foi retirada da superfície do solo (0 Mg ha<sup>-1</sup>) houve menores valores de produtividade de cana-de-açúcar em relação a manutenção de 5, 10 e 15 Mg ha<sup>-1</sup>.

A palha de cana-de-açúcar pode fornecer diferentes benefícios ao solo como potencializar os serviços ecossistêmicos, regular a quantidade de água no solo, ciclagem de nutrientes, fornece carbono ao solo, além de combater os processos de erosão e invasão de plantas daninhas (CARVALHO *et al.*, 2017b). Porém, a remoção indiscriminada da palha pode provocar modificações nas condições físicas do solo e conseqüentemente na produtividade da cultura (BLANCO-CANQUI; LAL, 2009; MARIN *et al.*, 2014; CASTIONI *et al.*, 2019).

De acordo com Marin *et al.* (2014) a cana-de-açúcar produzida no Brasil normalmente responde adversamente às taxas de remoção de palha, em que reduções na produtividade são superiores em áreas com altas temperaturas. Em alguns casos, a manutenção em altas quantidades de palha na superfície do solo pode impedir a rebrota em locais com temperaturas baixas, logo, a remoção de palha pode potencializar o crescimento da cana-de-açúcar e, dessa maneira fortalecer a produção da cultura (NXUMALO *et al.*, 2017).

Ao contrário do que estes últimos autores obtiveram, os resultados deste estudo apontaram que a manutenção de 10 Mg ha<sup>-1</sup> durante os dois anos, em áreas com solo com textura arenosa e com temperaturas altas foram ideais para promover desenvolvimento da cana-de-açúcar. Assim, a remoção da palha em solo de textura arenosa apresenta maior tendência em sofrer perdas consideráveis na produtividade da cana-de-açúcar ao se comparar com solo de textura argilosa, que possuem maior retenção de água e melhor estrutura (CORRÊA *et al.*, 2019).

Dessa maneira, desenvolver pesquisas baseadas em períodos de maior duração é recomendado para estabelecer taxas de remoção de palha “ideais”, de modo que possa compreender a magnitude dos efeitos sobre a perda e aumento na produção da cultura. Além de quantificar de forma sustentável os benefícios quanto à quantidade de água disponível para as plantas e a quantidade ideal de palha a ser mantida no solo a fim de combater a erosão e melhorar as atividades ecossistêmicas do solo.

## 7.5 CONCLUSÕES

Não foram detectadas modificações nos atributos físicos e no estoque de carbono do solo por meio da manutenção de 0, 5, 10 e 15 Mg ha<sup>-1</sup> de palha, tanto em solo argiloso como em solo arenoso. As diferenças que ocorreram entre as duas áreas experimentais estiveram relacionadas às características naturais dos solos e condições edafoclimáticas específicas dos locais e, não relacionadas a manutenção de diferentes quantidades de palha.

A produtividade foi o único atributo que sofreu modificações em função dos diferentes níveis de palha mantidos na superfície do solo em dois anos agrícolas. No qual, a dose de 15 Mg ha<sup>-1</sup> aumentou a produtividade da cana-de-açúcar em área com solo de textura argilosa no primeiro ano. No segundo ano agrícola a dose 10 Mg ha<sup>-1</sup> aumentou a produtividade em área com solo de textura arenosa. A dose 0 Mg ha<sup>-1</sup> limitou a produtividade da cana-de-açúcar nas safras em relação às demais doses, nas duas áreas.

## 8. CAPÍTULO 3 – INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO EM ÁREAS DE CANA-DE-AÇÚCAR COM A MANUTENÇÃO DE DIFERENTES DOSES DE PALHA

### RESUMO

A manutenção da palha de da cana-de-açúcar na superfície do solo pode promover o enriquecimento das camadas superficiais com matéria orgânica e reduzir os efeitos da compactação do solo. Dessa forma, o objetivo desse estudo foi avaliar o comportamento do intervalo hídrico ótimo em solo com granulometria argiloso e arenosa cultivados com cana-de-açúcar e submetidos a diferentes doses de palha mantidas na superfície do solo. O solo da área experimental é caracterizado por Latossolo Vermelho Eutroférico e Álico (textura argilosa e arenosa), nos municípios de Quatá – oeste paulista e Iracemápolis – norte do estado de São Paulo. O delineamento experimental foi realizado por meio de blocos ao acaso, composto pelos tratamentos 0, 5, 10 e 15 Mg ha<sup>-1</sup> de palha com quatro repetições e as parcelas foram compostas por 10 linhas de cana-de-açúcar, com espaçamento de 1,5 m e 10 m de comprimento. Em ambos os experimentos foram avaliados atributos físicos (granulometria, densidade do solo, macroporosidade e resistência do solo à penetração) e o intervalo hídrico ótimo. A manutenção de maiores níveis de palha na superfície do solo (10 e 15 Mg ha<sup>-1</sup>) alterou positivamente o IHO. No entanto, o aumento da compactação do solo, decorrente de baixos níveis de palha em superfície (0 e 5 Mg ha<sup>-1</sup>), associado às intensas práticas de mecanização da cultura, geram uma falsa impressão de melhor qualidade estrutural. O IHO, no solo arenoso apresenta maior sensibilidade aos efeitos prejudiciais da compactação do solo devendo ser mantido níveis de palha entre 10 e 15 Mg ha<sup>-1</sup>.

**Palavras-Chave:** Cobertura do solo, qualidade física do solo, compactação solo, estrutura do solo.



## ABSTRACT

The maintenance of sugar cane straw on the soil surface can promote the enrichment of the superficial layers with organic matter and reduce the effects of compaction on the physical attributes of the soil. Thus, the objective of this study was to evaluate the behavior of the least limiting water range in clayey and sandy soils cultivated with sugar cane and subjected to different doses of straw maintained on the soil surface. The soil of the experimental area is characterized by Latosolo Vermelho Eutroférico e Álico (clay and sandy texture), in the municipalities of Quatá - west of São Paulo and Iracemópolis - north of the state of São Paulo. The experimental design is randomized blocks, composed of treatments 0, 5, 10 and 15 Mg ha<sup>-1</sup> of straw with four replications and the plots were composed of 10 lines of sugar cane, with a spacing of 1,5 m and 10 m in length. In both experiments, physical attributes (granulometry, soil density, macroporosity and soil resistance to penetration) and the least limiting water were evaluated. The maintenance of higher levels of straw on the soil surface (10 and 15 Mg ha<sup>-1</sup>) positively changed the IHO. However, the increase in soil compaction, due to low levels of straw on the surface (0 and 5 Mg ha<sup>-1</sup>), associated with the intense mechanization practices of the crop, generate a false impression of better structural quality. IHO in the sandy soil is more sensitive to the harmful effects of soil compaction and straw levels between 10 and 15 Mg ha<sup>-1</sup> must be maintained.

**Keywords:** Soil cover, soil physical quality, soil compaction, soil structure.

## 8.1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a mudança no sistema de colheita de espalha a fogo (cana queimada) para o sistema de colheita mecanizada de cana-de-açúcar (cana crua), tem favorecido o acúmulo de resíduos orgânicos (palhada) sobre a camada superficial do solo (CAMPOS *et al.*, 2010; FRANCO *et al.*, 2013). Essa camada de palhada é constituída por folhas secas, ponteiro e restos de colmo e pode atingir valores de 8 até 20 Mg ha<sup>-1</sup>, oscilando em razão da variedade e idade do canavial (CHRISTOFFOLETI *et al.*, 2007; FORTES *et al.*, 2012).

A presença da palhada na superfície do solo tem favorecido aumento dos teores de matéria orgânica do solo, afetando significativamente os atributos biológicos, químicos e físicos do solo, melhorando conseqüentemente sua qualidade (OLIVEIRA *et al.*, 2014). Entretanto, a grande quantidade de palhada deixada sobre a superfície do solo após a colheita pode apresentar alguns efeitos negativos, como: aumento da incidência de pragas, maior ocorrência de incêndios, a baixa ou atrasada rebrota das soqueiras em condições de baixa temperatura, dependendo da época do ano ou região onde a cana foi cultivada, assim, muitas usinas já consideram a possibilidade de retirar parte da palha do campo (SORDI; MANECHINI, 2013).

No cenário atual a intensificação da colheita de cana mecanizada no Brasil nos últimos anos, direcionado pela legislação que não permite a queima, pode aumentar a compactação do solo em áreas de cana-de-açúcar, porém, essa prática de manejo da colheita gerou maiores quantidades de palha de cana, em termos de volume, acima do solo. No estado de São Paulo, um dos principais estados produtores de cana-de-açúcar do país, a quantidade média de palha que permanece acima do solo varia de 10 a 30 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, o que significa grande potencial para diminuição do contato do rodado com a superfície do solo (CASTIONI *et al.*, 2018) e ciclagem de nutrientes no solo (RAMOS *et al.*, 2016). Dessa maneira, o grande volume de palhada produzido em função da colheita mecanizada da cana-de-açúcar pode apresentar dois destinos: i) ser mantidos no campo para se decompor naturalmente, ou ii) sofrer remoção para uso na produção de bioenergia (SILVA *et al.*, 2012; LEAL *et al.*, 2013).

A escolha que representa a melhor estratégia de gestão está gerando grande discussão no setor sucroalcooleiro, tanto no Brasil como em todo o mundo (MENANDRO *et al.*, 2017), uma vez que, a remoção, pode alterar o sistema solo-planta-atmosfera envolvido no cultivo da cana-de-açúcar, por constituir uma situação intermediária entre a cana queimada, que se desenvolve em solo sem cobertura vegetal, e a cana crua, cuja palha permanece na superfície do solo (RAMOS *et al.*, 2016). A ideia que naturalmente prevalece é a de recolhimento parcial deste material do campo para uso industrial. No entanto, a questão de quanto de palhada pode ser removida dos campos de cana-de-açúcar ainda precisa ser cientificamente esclarecida

(FRANCO *et al.*, 2013). Uma pesquisa realizada por Satiro *et al.* (2017), no qual os autores avaliaram os impactos da remoção da palha de cana-de-açúcar em solos de textura argilosa e arenosa no Brasil, durante dois anos, e apontam que o solo arenoso é mais sensível à remoção da palha e que qualquer quantidade removida afetou negativamente a qualidade do solo, já em solo argiloso cerca de 50% de remoção de palha foi a taxa mínima para não prejudicar o solo.

O sistema de cana crua possui propriedades que podem ser maximizadas com vistas a reduzir o processo de compactação e suas consequências (SOUZA *et al.*, 2015). Entre essas, destaca-se a contínua adição superficial de resíduos orgânicos, que formam uma cobertura morta que enriquece as camadas superficiais com matéria orgânica. Esses materiais orgânicos podem atuar de duas formas na atenuação do processo de compactação: primeiro, quando mantidos na superfície do solo, atuam dissipando parte da pressão exercida pelos rodados de máquinas agrícolas; segundo, quando incorporados e decompostos podem elevar o teor de matéria orgânica do solo, aumentando a elasticidade e resistência à compactação e, aumentando os limites de umidade em que o solo pode ser trabalhado mecanicamente (SOANE, 1990; CASTIONI *et al.*, 2018).

Alinhado a essa problemática, o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO), é relatado na literatura como um bom indicador de qualidade física do solo. Além disso, é utilizado para identificar se uma determinada prática de manejo está melhorando ou degradando o potencial produtivo de um solo, visto que integra, em um único parâmetro, três fatores importantes associados ao desenvolvimento das plantas: aeração, teor de água no solo e resistência do solo à penetração (TORMENA *et al.*, 2017).

Diante dessas questões, é evidente a necessidade de estudos mais avançados sobre a quantidade “ótima” de palha a ser mantida na superfície do solo, de forma a possibilitar o recolhimento do excesso para produzir bioenergia, sem prejudicar a sustentabilidade do sistema produtivo (OLIVEIRA *et al.*, 2016). Assim, esse trabalho de pesquisa se baseia na hipótese que a associação dos atributos físicos do solo e IHO, auxiliam na avaliação de potencialidades ou danos da manutenção de diferentes quantidades de palha em solos com texturas contrastantes. Logo, o objetivo desse estudo foi avaliar o comportamento do intervalo hídrico ótimo e em dois solos (argiloso e arenoso) cultivados com cana-de-açúcar e submetidos a diferentes níveis de palha na superfície do solo.

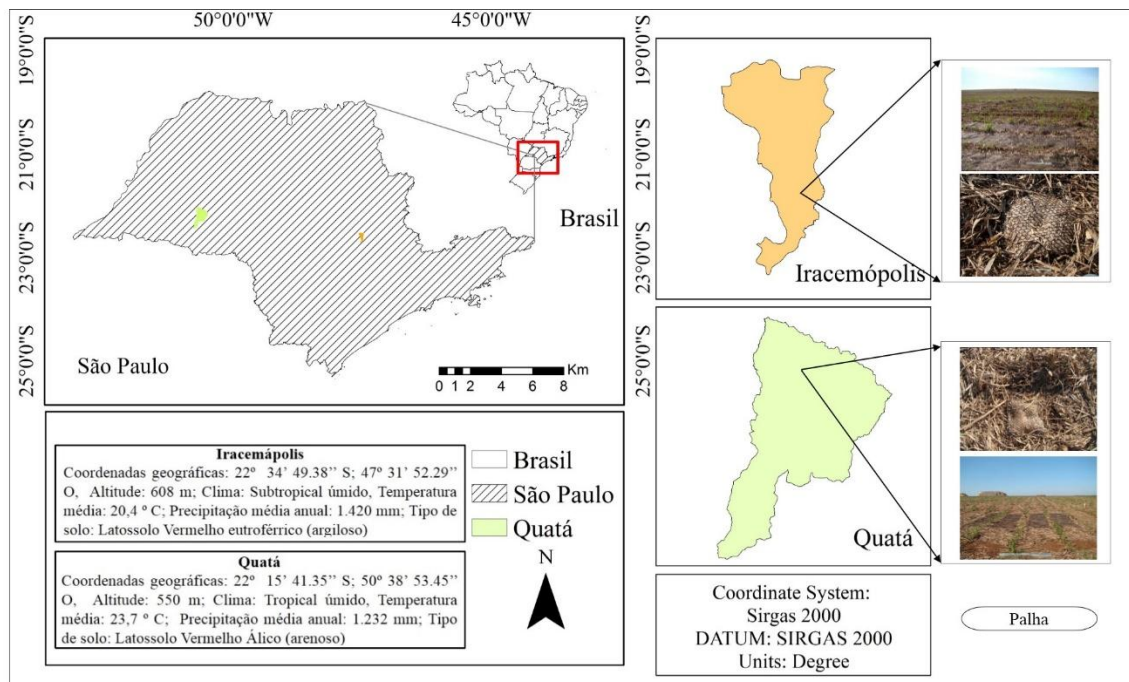
## **8.2 MATERIAL E MÉTODOS**

### **8.2.1 Descrição da área experimental**

Os experimentos foram conduzidos nas usinas Iracema (Grupo São Martinho) e

Zilor (Grupo Zilor), localizadas nos municípios de Iracemópolis e Quatá, no estado de São Paulo, Brasil, respectivamente. A escolha destes locais foi associada às áreas estarem localizadas em condições edafoclimáticas distintas, fato que pode influenciar na decomposição de resíduos vegetais e consequentemente na cobertura do solo ao longo do ano agrícola (Figura 16).

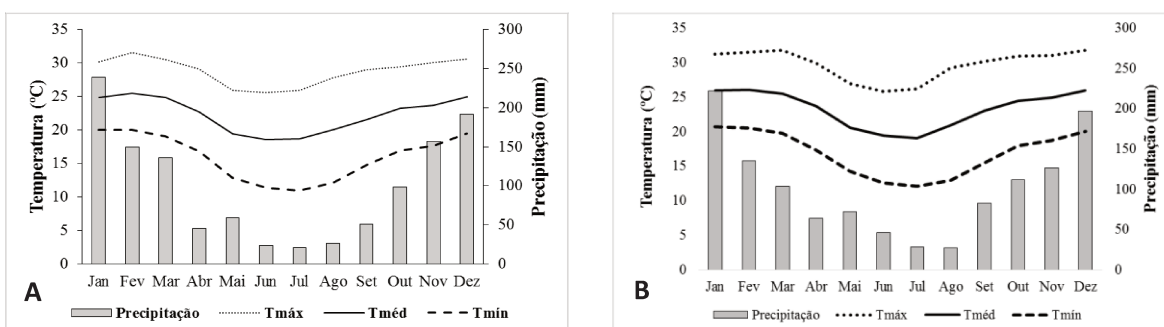
**Figura 14.** Mapa de localização dos municípios de Quatá e Iracemópolis em relação ao estado de São Paulo, Brasil.



O clima da região é classificado como tropical com estação seca segundo a classificação climática de Köppen (ALVARES *et al.*, 2013), com inverno frio e seco e verão quente e chuvoso. Na região ocorrem médias anuais de precipitação na ordem de 1.260 mm e a temperatura relativa média do ar é de 23 °C (CEPAGRI, 2018). O solo foi classificado como Latossolo Vermelho Eutroférico argiloso (Usina Iracemópolis) e Latossolo Vermelho Álico arenoso segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS *et al.*, 2018) e como Oxisols segundo a Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF, 2014).

As duas áreas experimentais são caracterizadas por distintas distribuições pluviométricas e temperaturas. As Figuras 15A e 15B mostram tais distribuições pluviométricas que são determinantes na decomposição da palha, nos municípios Iracemópolis (solo de textura argilosa) e Quatá (solo de textura arenosa) nos períodos de 1995-2018 e 1991-2018, respectivamente.

**Figura 15.** Temperatura mínima, máxima, média e precipitação mensal do município de Itacemápolis-SP. (A) – (1991-2018) e do município de Quatá-SP (B) – (1995-2018).



Foram selecionados, em cada área dos experimentos, locais cultivados com cana crua de primeiro corte com a mesma variedade. Após a colheita foram medidas e estabelecidas quantidades de palha (0, 5, 10 e 15 Mg ha<sup>-1</sup>) mantidas no solo em todas as áreas na colheita da primeira soca (safra 2013-2014) e segunda soca (safra de 2014-2015).

Os experimentos tiveram início em 2013, onde foi realizada caracterização física das áreas experimentais (Tabelas 2 e 4). As áreas experimentais avaliadas apresentavam diferentes históricos de manejo e implantação. A área experimental localizada no solo argiloso vem sendo cultivada com cana-de-açúcar, a mais de 70 anos, sendo a colheita realizada de forma mecanizada. A área experimental localizada no solo arenoso, foi precedida por pastagens e há cerca de 26 anos está sendo cultivada com cana-de-açúcar, onde as práticas de manejo também são realizadas mecanicamente.

### 8.2.2 Delineamento experimental e tratamentos

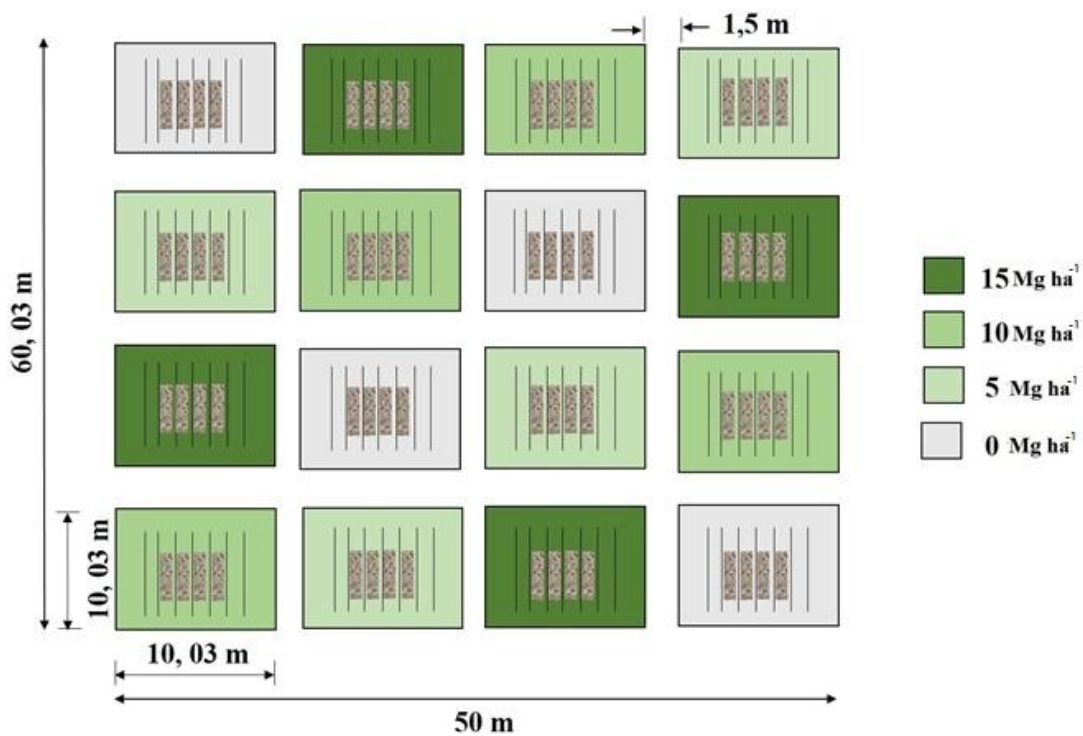
Em cada área experimental foram selecionadas áreas de cana crua de primeiro corte cultivadas com a mesma variedade (RB96 6928). Após a colheita mecanizada das áreas na safra 2012-2013 foi medida a quantidade de palha mantida no solo e a umidade deste material. Após a colheita mecanizada das áreas, em 2013 (primeira soca) e 2014 (segunda soca), foi definida a produção de massa seca de palha por meio do lançamento ao acaso de seis molduras de ferro de 1,0 m<sup>2</sup>, totalizando uma área de 6,0 m<sup>2</sup>, cuja quantidade no interior da moldura foi coletada e pesada em campo utilizando uma balança portátil com precisão de 0,1 kg.

Em seguida, as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e encaminhadas ao laboratório para determinação do teor de umidade, na qual foi aferida considerando a pesagem antes e após secagem do material em estufa de circulação forçada por 72 h a 65 °C. Após a obtenção da umidade da palha, seus valores foram corrigidos de modo a manter na superfície do solo as seguintes quantidades de massa seca de palha (0, 5, 10 e 15 Mg ha<sup>-1</sup>) em

ambas as áreas experimentais na safra de 2013-2014. No ano seguinte (safra 2014-2015) o mesmo procedimento foi realizado com a deposição das referidas quantidades de palha (ciclo de segunda soqueira).

O delineamento experimental utilizado foi de blocos ao acaso, com quatro repetições, onde os tratamentos utilizados foram quatro quantidades de massa seca de palha (0, 5, 10, e 15 Mg ha<sup>-1</sup>), em duas áreas experimentais em que os solos apresentavam textura contrastantes (arenosa e argilosa). Cada parcela foi composta por oito linhas de cana-de-açúcar com espaçamento de 1,5 m e 10 m de comprimento, perfazendo um total de 110,5 m<sup>2</sup> de acordo com a Figura 16.

**Figura 16.** Delineamento experimental para avaliação da decomposição de palha de cana-de-açúcar. Adaptado de Santos (2016).



### 8.2.3 Coleta e análise de solo

Após dois anos de condução das áreas experimentais, foram coletadas amostras indeformadas de solo por unidade experimental, na entrelinha de cultivo da cana-de-açúcar, nas profundidades de 0,00-0,10 e 0,10-0,30 m em cada parcela experimental, para avaliação do intervalo hídrico ótimo do solo. Para tanto foram utilizados anéis de aço inox com dimensões 0,045 x 0,050 m, com volume médio de 88 cm<sup>3</sup>.

Após a coleta das amostras no campo, essas foram identificadas, acondicionadas e transportadas para o laboratório, onde as análises de densidade do solo e porosidade do solo foram realizadas conforme estabelecido por Teixeira *et al.* (2017). A resistência do solo à penetração foi obtida de acordo com a equação sugerida por Stolf *et al.* (2014).

A curva de retenção de água no solo, que considera o conteúdo volumétrico de água no solo em função das tensões aplicadas, foi obtida em câmaras de pressão de Richards com placas porosas (KLUTE, 1986). As amostras foram submetidas às tensões de 2, 6, 8, 10, 33, 100, 500 e 1500 kPa (SILVA *et al.*, 1994). As curvas de retenção de água no solo foram ajustadas pelo modelo proposto por Van Genuchten (1980), utilizando o *software* Soil Water Retention Curve (DOURADO-NETO *et al.*, 2001):

$$\theta_r + \theta_s + (\theta_s - \theta_r) / [1 + \alpha \psi]^n]^m \quad (6)$$

em que,  $\theta$  = conteúdo volumétrico de água do solo ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ );  $\theta_r$  = conteúdo de água residual ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ );  $\theta_s$  = conteúdo de água na saturação obtido por  $\theta_s = P_T = (1 - DS/DP)$ , sendo DS e DP as densidades do solo e da partícula, respectivamente;  $\psi$  = potencial matricial;  $\alpha$ ,  $m$  e  $n$  = coeficientes do modelo e  $m = 1 - 1/n$ .

#### 8.2.4 Análise do intervalo hídrico ótimo do solo (IHO)

Uma parte das amostras foram submetidas às tensões de -0,002, -0,008, -0,010, -0,033, -0,100, -0,500, -1,0 e -1,5 MPa em câmaras de Richards com placas porosas. Ao atingirem o equilíbrio hidráulico para cada tensão, as amostras tiveram suas massas registradas para a determinação do teor de água. Na sequência, foi determinada a resistência do solo à penetração em laboratório, utilizando um penetrômetro eletrônico de bancada marca Marconi, modelo MA-933, com velocidade constante de  $1,0 \text{ cm min}^{-1}$ , equipado com uma célula de carga de 200 N, haste com cone de 4,0 mm de diâmetro de base e semi-ângulo de  $30^\circ$ , receptor e interface acoplado a um microcomputador, para registro das leituras por meio de um *software* próprio do equipamento.

Em seguida, as amostras foram secas em estufa a  $105^\circ \text{C}$  até massa constante. O teor de água no solo em base volumétrica foi quantificado pelo quociente do volume de água retida na amostra em cada tensão e o volume do solo de cada amostra. A densidade do solo foi determinada pela relação massa de solo seco e volume do anel (TEIXEIRA *et al.*, 2017). Os dados de resistência do solo à penetração (RP) foram ajustados em função da densidade do solo e da umidade volumétrica (Equação 7), usando o modelo não linear recomendado por Busscher (1990) e Leão *et al.* (2006).

$RP = a * DS^b * \theta^c$  (7)  
 em que, RP = resistência do solo à penetração (MPa); DS = densidade do solo ( $\text{kg m}^{-3}$ );  $\theta$  = conteúdo volumétrico de água do solo ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ ); a, b e c = coeficientes do modelo.

A curva de retenção de água no solo, que relaciona potencial matricial, umidade volumétrica e densidade do solo foi ajustada ao modelo utilizado por Tormena *et al.* (1998) e Leão *et al.* (2006), conforme Equação 8:

$$\theta = \exp(a + b * DS) * \psi^c \quad (8)$$

em que,  $\theta$  = conteúdo volumétrico de água ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ );  $\psi$  = potencial matricial (MPa); DS = densidade do solo ( $\text{kg m}^{-3}$ ); a, b, c = coeficientes de ajuste do modelo.

Assim, foi determinada a variação da umidade na capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ) na tensão de 0,01 MPa, e no ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ) na tensão de 1,5 MPa em função da DS.

A porosidade de aeração (PA) mínima foi de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , considerada o valor mínimo responsável por uma taxa de difusão adequada de oxigênio da atmosfera até as raízes (DEXTER, 1988). O teor de água no solo considerando a PA ( $\theta_{PA}$ ) foi calculado pela Equação 9:

$$\theta_{PA} = PT - 0,1 \quad (9)$$

em que,  $\theta_{PA}$  = conteúdo volumétrico de água ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), considerando uma porosidade de aeração de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ; PT = porosidade total ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ ). O valor de densidade de partícula utilizada foi de  $2,65 \text{ kg m}^{-3}$ , sendo considerado um valor genérico para todos os solos.

Para determinar o IHO, foi utilizado o método descrito por Silva *et al.* (1994) e Tormena *et al.* (1998). Os valores de  $\theta_{RP}$ ,  $\theta_{CC}$  e  $\theta_{PMP}$  foram linearizados, utilizando a transformação logarítmica. Os limites superiores do IHO foram  $\theta_{CC}$  e/ou  $\theta_{PA}$ , enquanto os limites inferiores foram  $\theta_{PMP}$  e/ou  $\theta_{RP}$ . A densidade do solo crítica ao crescimento e desenvolvimento das plantas (Dsc) foi considerada como o valor de DS em que o IHO foi nulo, ou seja, igual a zero.

Os ajustes dos modelos linearizados foram realizados com a rotina PROC REG do SAS®. A análise de variância ao nível de 5% de probabilidade foi realizada utilizando o mesmo software e, apresentando significância para as interações, os dados foram submetidos ao teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.



### **8.2.5 Produtividade da cultura de cana-de-açúcar**

A produtividade final de colmos foi determinada via colheita manual em quatro linhas de 10 m de comprimento em cada uma das parcelas. Após a colheita das plantas, foi realizado o desponte na altura da gema apical e à desfolha das plantas e, em seguida esse material foi pesado e os resultados expressos em toneladas de cana-de-açúcar por hectare (TCH).

### **8.2.6 Análise dos dados**

Diferenças significativas entre os tratamentos foram avaliadas por meio de análise de variância (ANOVA) utilizando o teste t, que ao apresentar significância foram submetidos a um teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade, essa análise foi realizada com o auxílio do software Sisvar (5.7). Em seguida, foi realizada uma análise multivariada utilizando o software Statistica 7.

Para análise do intervalo hídrico ótimo, os dados foram avaliados por meio de análises de regressão não linear empregando o algoritmo de Leverberg-Marquardt. Os procedimentos foram realizados por meio da rotina “REG” e “NLIN” do sistema SAS e os gráficos por meio do sistema SAS/GRAPH®. Por meio da regressão dos mínimos quadrados foram estimados valores para os parâmetros da curva de resistência do solo à penetração e a curva de retenção de água no solo e aplicado o teste “t” em cada um dos modelos analisados, de acordo com Leão *et al.* (2006).

## **8.3 RESULTADOS**

### **8.3.1 Atributos físicos do solo**

A Tabela 6 apresenta os valores médios dos atributos físicos do solo nas áreas experimentais no período de maio a junho em 2013. Não foram observadas diferenças significativas entre as doses de palha de cana-de-açúcar empregadas em nenhuma das camadas e em nenhum dos solos avaliados. Os resultados encontrados indicam que os tratamentos em estudo não influenciaram significativamente nos atributos físicos do solo em um período de dois anos agrícolas.

Destaca-se que independentemente do tipo de solo e camada, não foram encontradas interações significativas, mas os comportamentos em profundidade foram parecidos, sendo que foram verificados maiores valores de densidade do solo (Ds) na camada de 0,00-0,30 m e, conseqüentemente, menores valores de macroporosidade. É importante

ressaltar que o comportamento da RP também foi igual, com maiores valores na camada superficial do solo (0,00-0,10 m), redução na camada 0,10-0,30 m e aumento novamente em profundidade, destacando-se as umidades para as áreas foram diferentes, pois no solo arenoso estava próxima de  $0,20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  e no argiloso próximo de  $0,35 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ .

**Tabela 6.** Atributos físicos do solo nas camadas em estudo nas áreas implantadas em maio/junho de 2013 em Latossolo Vermelho Eutroférico (solo argiloso) e Latossolo Vermelho Álico (solo arenoso) no estado de São Paulo.

Tratamento $\text{Mg ha}^{-1}$	Macro $\text{m}^3\text{m}^{-3}$	Ds $\text{Mg m}^{-3}$	UG $\text{m}^3\text{m}^{-3}$	RP MPa	Macro $\text{m}^3\text{m}^{-3}$	Ds $\text{Mg m}^{-3}$	UG $\text{m}^3\text{m}^{-3}$	RP MPa
Latossolo Vermelho Álico				Latossolo Vermelho Eutroférico				
0,00-0,10 m								
0	0,19	1,69	0,16	1,84	0,16	1,37	0,34	2,39
5	0,17	1,85	0,18	2,19	0,17	1,33	0,35	2,53
10	0,16	1,73	0,19	2,15	0,17	1,34	0,35	2,01
15	0,13	1,84	0,18	2,62	0,18	1,28	0,34	2,67
0,10-0,30 m								
0	0,15	1,77	0,17	1,55	0,12	1,35	0,38	1,70
5	0,14	1,78	0,16	1,95	0,12	1,37	0,36	1,88
10	0,14	1,80	0,16	2,53	0,11	1,36	0,37	2,36
15	0,15	1,77	0,17	1,99	0,11	1,36	0,38	1,67
0,30-0,60 m								
0	0,19	1,71	0,16	1,27	0,10	1,39	0,36	2,59
5	0,16	1,70	0,17	1,29	0,10	1,40	0,37	2,01
10	0,13	1,73	0,16	1,78	1,12	1,32	0,34	1,54
15	0,13	1,71	0,20	1,37	0,14	1,29	0,35	1,12

Macro = macroporosidade; Ds = densidade do solo; RP = resistência do solo à penetração; UG = umidade gravimétrica.

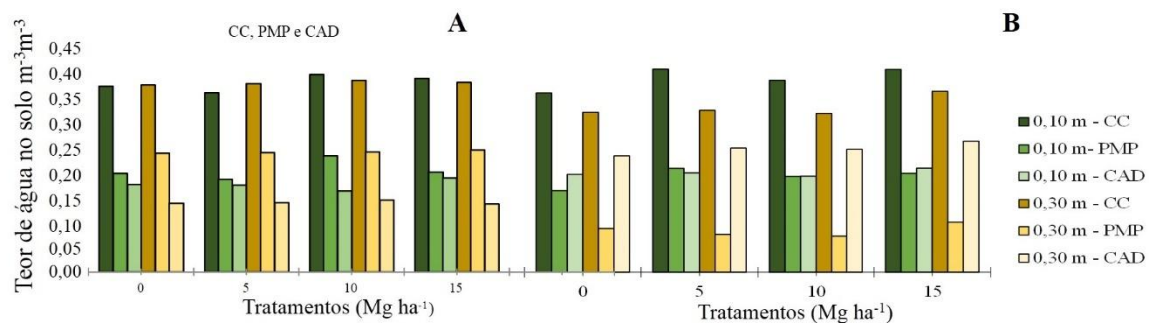
A Figura 17 apresenta os valores da capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e a capacidade de água disponível (CAD) do solo de textura argilosa para as camadas de 0,00-0,10 m e 0,10-0,30 m. Estes indicadores refletem aos atributos físicos avaliados (Tabela 6), como consequente efeito da compactação do solo, influenciando diretamente na água no solo.

Observa-se que os comportamentos para os diferentes tipos de solos foram opostos, como observado para os atributos físicos do solo, sendo que o solo argiloso obteve maiores umidades tanto na CC, atingindo valores de até  $0,39 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , como também no PMP, obtendo

valores de até  $0,18 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Enquanto para o solo arenoso os valores foram mais baixos, com a CC na faixa dos  $0,17 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  e o PMP de  $0,07 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ .

Destaca-se que para ambos os tipos de solo, o valor encontrado para a CAD foi próximo, de aproximadamente 10% na camada de 0,10 m, ou seja, independentemente do tipo de solo e dos valores encontrados para o PMP e CC, mesmo opostos, geraram o mesmo valor para a CAD. Apesar das diferentes quantidades de palha aplicadas no solo, os valores obtidos para o CC e PMP em ambos os tipos de solos foram muito próximos, resultado também encontrado para os atributos físicos do solo (Tabela 6).

**Figura 17.** Conteúdo de água no solo nas camadas de 0,00-0,10 m e 0,10-0,30 m com os valores da capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e capacidade de água no solo (CAD) em Latossolo Vermelho Eutroférico argiloso (A) e Latossolo Vermelho Álico arenoso (B).



### 8.3.2 Intervalo Hídrico Ótimo

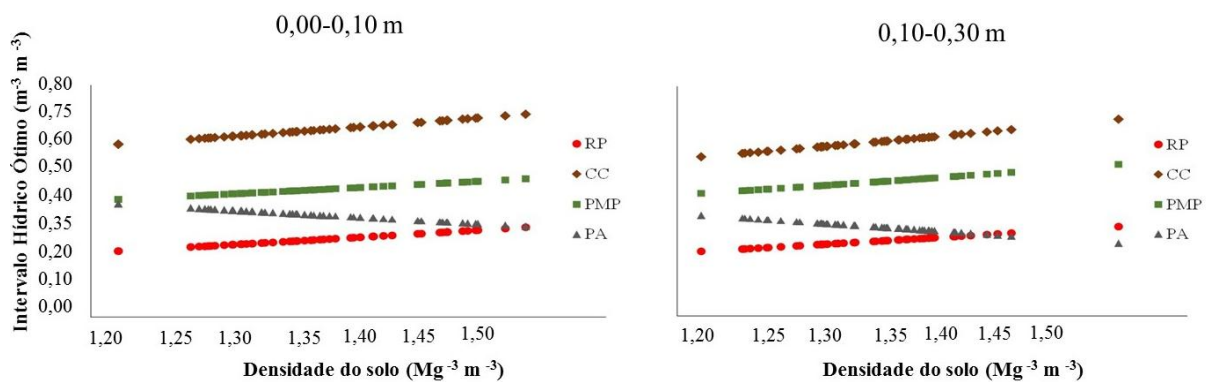
Os valores do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) dos solos de textura argilosa e arenosa são apresentados nas Figuras 20 e 21. Avaliando o solo argiloso em ambas as camadas, verifica-se que o IHO foi baixo independentemente da quantidade de palha no solo, pois a densidade crítica de  $1,20 \text{ Mg dm}^{-3}$  para ambas as camadas, foi menor do que as avaliadas para todos os tratamentos empregados (0, 5, 10 e  $15 \text{ Mg ha}^{-1}$ ).

Observou-se que em ambos os solos, a densidade do solo é menor do que a densidade crítica, e o atributo limitante superior foi porosidade de aeração (PA) e a inferior foi o ponto de murcha permanente (PMP), isto está de acordo com os resultados obtidos a partir da Figura 17 onde, apesar dos altos valores de CC, também ocorreu um alto valor de PMP, com consequência uma baixa disponibilidade de água (CAD), menor que  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , valor considerado para a porosidade de aeração, resultando em um IHO zero para todos os

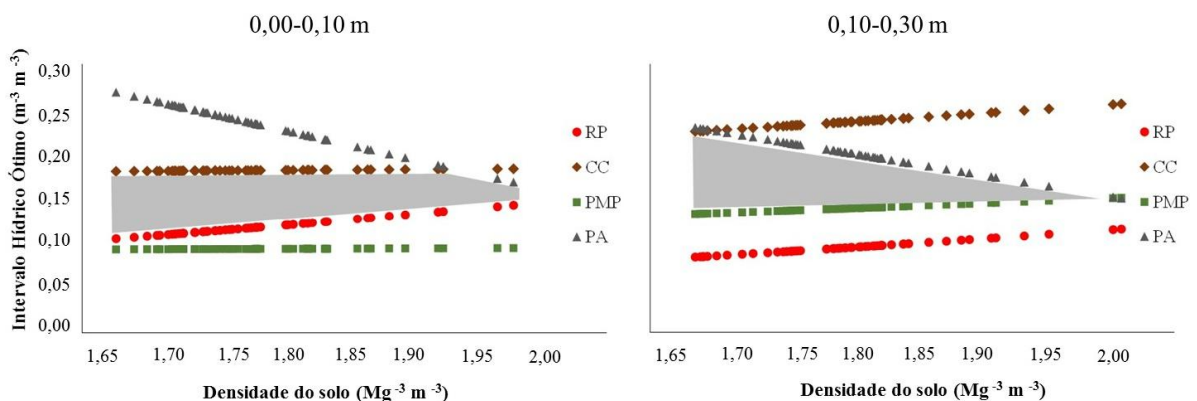
tratamentos.

Avaliando os resultados obtidos para o solo arenoso, observa-se que o IHO em ambas as camadas avaliadas, diferenciou do obtido no solo argiloso (Figuras 18 e 19). Para a camada de 0,00-0,10 m o maior IHO foi de  $0,07 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , sendo o limite superior a CC até a  $D_s$  de  $1,90 \text{ Mg m}^{-3}$  e a partir deste valor foi a PA, enquanto o limite inferior para todas as  $D_s$  foi a RP. Para a camada 0,10-0,30 m, o maior IHO encontrado foi superior a camada superficial, chegando a  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  para a  $D_s$  de  $1,67 \text{ Mg m}^{-3}$ .

**Figura 18.** Intervalo Hídrico ótimo nas camadas de 0,00-0,10 m e 0,10-0,30 m em relação à densidade do solo em um Latossolo Vermelho Eutroférico argiloso sob cultivo de cana-de-açúcar em níveis de capacidade de campo (CC = -10 kPa), ponto de murcha permanente (PMP = -1500 kPa), porosidade de aeração (PA =  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) e resistência do solo à penetração (RP = -2000 kPa). A área sombreada representa o IHO.



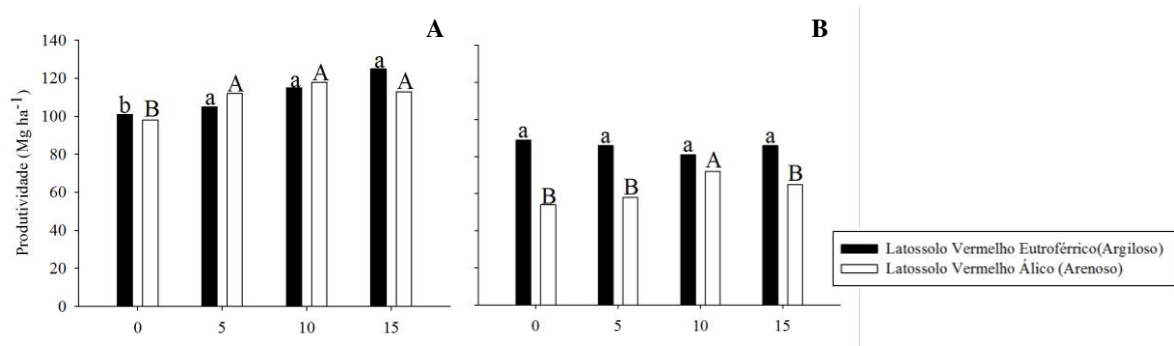
**Figura 19.** Intervalo Hídrico Ótimo do solo nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,30 m em relação à densidade do solo em um Latossolo Vermelho Álico arenoso sob cultivo de cana-de-açúcar em níveis de capacidade de campo (CC = -10 kPa), ponto de murcha permanente (PMP = -1500 kPa), porosidade de aeração (PA =  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) e resistência do solo à penetração (RP = -2000 kPa). A área sombreada representa o IHO.



### 8.3.3 IHO e produtividade da cana-de-açúcar

A produtividade da cana-de-açúcar (Figura 20) nos dois anos agrícolas foi influenciada significativamente pela manutenção das quantidades de palhas (0, 5, 10 e 15 Mg ha<sup>-1</sup>), ao contrário do que aconteceu com os atributos físicos e IHO tanto no solo de textura argiloso ou arenosa (Figura 17). No solo de textura argilosa nas safras de 2014/2015 (ciclo da cana planta), a manutenção de 0 Mg ha<sup>-1</sup> causou menor produtividade da cultura, atingindo valor máximo de 101 Mg ha<sup>-1</sup>, quando comparadas com as demais quantidades. As quantidades de 5, 10 e 15 Mg ha<sup>-1</sup> não sofreram diferenças significativas entre as duas classes texturais de solos. A produtividade nessas doses de palha variou de 3,96%, 17,34% e 23,76%, respectivamente.

**Figura 20.** Produtividade da cana-de-açúcar nos ciclos cana planta (safra 2013/14), na Figura “A” e soca (safra 2014/15), na Figura “B”, sob a manutenção de 0, 5, 10 e 15 Mg ha<sup>-1</sup> de palha de cana-de-açúcar nos solos solo com textura argilosa e arenosa. Médias seguidas da mesma letra, não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade (P<0,05).



Observa-se que no solo de textura arenosa, a menor quantidade de manutenção de palha (0 Mg ha<sup>-1</sup>) gerou cerca de 98 Mg ha<sup>-1</sup>, em que as doses 5, 10 e 15 Mg ha<sup>-1</sup> apresentaram produtividade de cerca de 14,28%, 20,40% e 15,30% da produtividade total dos tratamentos. A dose 10 Mg ha<sup>-1</sup> apresentou maior valor no segundo ano agrícola em relação às demais quantidades de palha.

A dose 0 Mg ha<sup>-1</sup> reduziu a produtividade da cultura tanto em solo de textura argilosa (3,96%) como em arenosa (15,30%) durante o primeiro ano de colheita (Figura 20). No último ano, em que houve o ciclo da cana soca, não verificou mudanças significativas nas duas áreas estudadas. No entanto, o solo de textura arenosa a produtividade foi menor, atingindo valor máximo de 54 Mg ha<sup>-1</sup>. A produtividade nas demais doses de palhas variaram de 58,72 e 65 Mg ha<sup>-1</sup>, cerca de 7%, 33% e 20% em relação aos tratamentos 5, 10 e 15 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

## 8.4 DISCUSSÃO

### 8.4.1 Atributos físicos do solo

Os atributos físicos do solo são afetados diretamente pelo tráfego de máquinas, principalmente quando ocorre o tráfego em condições de alta umidade do solo (ESTEBAN *et al.*, 2019). Dentre seus efeitos, o principal pode ser considerado a prática da colheita mecanizada, pois provoca a compactação do solo nos canaviais causados pelo alto tráfego de máquinas agrícolas de grande porte (TORMENA *et al.*, 2017). Após a colheita, há a geração de um grande volume de palha sobre o solo, que por sua vez contribui com a qualidade física do solo, melhorando o teor de umidade e matéria orgânica no solo (CARVALHO *et al.*, 2017b). No passado, esta palha era utilizada pelas usinas para produção de energia elétrica e etanol de segunda geração, mas com o passar dos anos, devido ao aumento da compactação dos solos, considera-se deixar, pelo menos parte, desta palhada na área plantada para que ajude a proteger contra o peso dos maquinários (CARVALHO *et al.*, 2017b).

Com esta palhada deixada no solo surge a dúvida de que se vale a pena deixar de queimá-la, e conseqüentemente, deixar de ganhar dinheiro diretamente com ela. Pois, a palha deixada no campo traz diversos benefícios para o solo, dentre eles redução da pressão de contato do pneu, diminuição da incidência solar direta na área, aumento da umidade e do teor de matéria orgânica. Mas deve-se avaliar os efeitos quantitativos em diferentes tipos de solo para que seja viável e convincente para o produtor esta mudança estratégica (ESTEBAN *et al.*, 2019).

Os atributos físicos do solo tanto no solo arenoso quanto no argiloso não apresentaram diferenças estatísticas para nenhum dos atributos ao se avaliar a média da cana planta e a primeira soca, independentemente da quantidade de palha aplicada. Os resultados obtidos neste estudo demonstram que a manutenção da palha da cana-de-açúcar não foi um fator suficiente para melhorar os indicadores de qualidade do solo, tais como densidade (Ds), resistência do solo à penetração (RP) e capacidade de água disponível no solo (CAD), pois não foi possível encontrar diferenças entre os tratamentos independentemente da quantidade de palha. No entanto, o intenso fluxo de máquina nos canaviais potencializou o grau de compactação nos dois solos estudados.

Apesar de inicialmente este indicar um resultado positivo para o produtor, levando a crer que não se deve manter a palha no solo, este não é o caso, pois a manutenção da palha de cana-de-açúcar promove o amortecimento do impacto do rodado na superfície do solo, dissipa a pressão exercida sobre ele durante o tráfego, o impacto das gotas de chuvas, atenuando a decomposição da palha (BLANCO-CANQUI; LAL, 2009; JOHNSON *et al.*, 2016). Assim, já se sabe que o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) é afetado diretamente pela compactação do solo,

principalmente levando em conta que, dentre seus principais atributos avaliados, estão a densidade do solo e resistência do solo à penetração (BLANCO-CANQUI; LAL, 2009; TORMENA *et al.*, 2017; RABOT *et al.*, 2018; OLIVEIRA *et al.*, 2019). Com isto, faltam estudos para avaliar os efeitos da manutenção da palha se são diretamente relacionadas aos atributos físicos do solo e IHO.

Quanto a densidade do solo (Ds), observa-se que na área de solo argiloso ocorreram densidades inferiores às do solo arenoso. No solo argiloso as densidades variaram de 1,19 a 1,36 Mg m<sup>-3</sup>, enquanto que no solo arenoso essa variação foi de 1,57 a 1,64 Mg m<sup>-3</sup>. Essa variação nos valores de Ds pode ser explicada pela textura que cada solo apresenta (DIAS *et al.*, 2016). De acordo com Reichert *et al.* (2009), o valor da Ds tem relação inversa com o teor de argila do solo.

Nesse sentido, avaliando-se os dois tipos de solos, verifica que ambas as áreas se encontravam em condições de alta compactação, com altos valores de Ds e RP. Avaliando a Ds, para o solo argiloso, percebe-se que as densidades variaram entre 1,29 a 1,40 Mg m<sup>-3</sup>, estes dados estão acima do recomendado para este tipo de solo, que é de até 1,20 Mg m<sup>-3</sup>, em concordância com os resultados encontrados por Silva *et al.* (2000). Enquanto que, o solo arenoso variou entre 1,69 e 1,85 Mg m<sup>-3</sup>, valor inferior aos encontrados por Castioni *et al.* (2019).

No entanto, a densidade do solo de textura arenosa indicou maior efeito de compactação das áreas, do mesmo modo que Castioni *et al.* (2018), observaram mudanças nos atributos físicos do solo especialmente na densidade que aumentou de acordo com a remoção de palha de cana-de-açúcar, tanto em solos com textura argilosa como em arenosa.

Dentre os problemas encontrados em áreas com valores de altas Ds estão a dificuldade para o desenvolvimento da raiz, pouca aeração e absorção de nutrientes (OLIVEIRA *et al.*, 2019). Ou seja, estes solos avaliados, pelo alto nível de compactação, estão em sério risco e em condições menos sustentáveis tanto para o meio ambiente como para o produtor, pois solos altamente compactados produzem cada vez menos nessas condições, devido ao contínuo tráfego de máquinas em áreas de cana-de-açúcar, aumentando a compactação e a redução da produtividade, em um ciclo contínuo. A forma mais tradicional de se descompactar o solo é com o uso de grade e subsolador, chamado plantio convencional, mas já se sabe que no longo prazo, há aumento da compactação, portanto, não é recomendável.

O uso da palha, apesar de início não revelar diferenças entre as quantidades, é uma alternativa, pois ao decompor, aumenta a matéria orgânica do solo, que ao longo do tempo traz diversos benefícios para a estrutura física do solo, como efeito agregador (SATIRO *et al.*,

2017). Ou seja, há a hipótese que, ao longo do tempo, a palha melhore a estrutura física do solo.

Como resultado do aumento da Ds, a macroporosidade reduziu, considerando que é uma média entre os 2 ciclos em que houve as primeiras passadas da colhedora, variando entre  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  e  $0,17 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , possivelmente a macro no ciclo cana planta esteve próximo a  $0,20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  e no ciclo cana soca estivesse menor que  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Esse mesmo resultado foi o oposto do encontrado por Everton *et al.* (2015), onde, em razão da influência da palha que fornecem matéria orgânica ao solo, houve mudança nos atributos físicos do solo, mesmo em curto intervalo de tempo.

Sabe-se que a macroporosidade é altamente afetada pelo tráfego, principalmente pela colhedora e o transbordo, que são os implementos mais pesados que passam na área (VISCHI FILHO *et al.*, 2015), ou seja, talvez inicialmente, com apenas uma passagem, a diferença entre as quantidades de palha não ocorra, mas com o tempo, haja o acúmulo dos efeitos e seja perceptível. Verificou-se que a macroporosidade reduziu com a profundidade, ou seja, o efeito da palha ocorreu principalmente na camada superficial. Em um estudo desenvolvido por Cherubin *et al.* (2016), os autores estudaram áreas cultivadas com cana-de-açúcar em diferentes condições edafoclimáticas e, verificaram valores de macroporosidade abaixo do esperado para o crescimento das plantas, concluindo que o cultivo da cana-de-açúcar, independente das condições climáticas e das texturas de solo, que é o caso deste experimento, levam a valores de macroporosidade menor que o recomendado pela literatura.

O macroporo é um atributo muito volátil (TORMENA *et al.*, 2017), com isto, ele varia muito entre os ciclos e com o tráfego, após as duas passagens de colhedora e transbordo possivelmente houve uma maior homogeneização do solo. Principalmente em solos argilosos, este efeito é comum, pois são mais susceptíveis a compactação, reduzindo as diferenças entre seus tratamentos devido à compactação. Roque *et al.* (2011) não observaram diferenças entre a densidade e porosidade do solo durante duas safras da cultura de cana-de-açúcar, mostrando que é um efeito esperado em solos argilosos.

Em uma pesquisa realizada por Menandro *et al.* (2017) estudando os tratamentos sem, baixa, alta e remoção total, os autores, observaram que o tratamento sem remoção de palha indicou melhor qualidade do solo, bem como maior macroporosidade, umidade e melhor fertilidade do solo principalmente em solos de textura argilosa. Os autores apontaram que a umidade do solo também não diferiu entre os tratamentos e profundidades para o solo arenoso. A resistência do solo à penetração apresentou diferenças, nas camadas mais profundas, entretanto, apresentou sinais de compactação bastante elevado, mesmo para solos arenosos.

Em adição, os valores de Ds proporcionados pela utilização dos diferentes níveis



de palha aplicadas na superfície do solo foram mais elevados do que a densidade crítica ( $D_s > D_{sc}$ ), para o solo argiloso e arenoso, indicando condições fortemente restritivas para o crescimento da raiz e da planta a uma  $\theta_{RP}$  crítica de 2,0 MPa. Nessas condições o IHO em ambos os solos e tratamentos, com exceção das doses de 10 e 15 Mg ha<sup>-1</sup> na última camada avaliada (0,30 m), foram nulos (IHO = 0).

Frequentemente, tem-se adotado o valor de 2,0 MPa como o limite crítico da  $\theta_{RP}$ . No entanto, Betioli Júnior *et al.* (2012), demonstraram que ao utilizar o valor de  $RP = 2,0$  MPa como crítico, as condições físicas do solo apresentam-se mais restritivas às plantas do que com a  $RP = 3,5$  e 4,6 MPa. Em complemento, Sá *et al.* (2016), observaram o valor de resistência do solo à penetração crítica de 3,8 MPa como sendo mais adequado ao crescimento de raízes de cana-de-açúcar.

Utilizando uma  $\theta_{RP}$  crítica de 2,0 MPa, para a maioria dos tratamentos ocorrem IHO nulos. Para Arshad *et al.* (1996) o valor de resistência do solo à penetração de 2,0 MPa, promove significativa restrição ao crescimento de culturas em sistemas de preparo convencional. Entretanto, em solos não revolvidos anualmente, como o é o caso da cultura da cana-de-açúcar, são toleráveis valores de resistências até 4,0 MPa, devido à permanência e continuidade de poros, atividade biológica mais ativa e maior estabilidade de agregados.

Com relação ao efeito das doses de palha na amplitude do IHO, verifica-se que a manutenção de maiores doses de palha sobre o solo (10 e 15 Mg ha<sup>-1</sup>) influencia positivamente no IHO principalmente devido a redução da  $D_s$  e conseqüente redução da compactação do solo. Carvalho *et al.* (2017b), apontam que a maioria dos benefícios agrônômicos são preservados quando pelo menos 7 Mg ha<sup>-1</sup> de massa seca de palha são mantidos na superfície do solo. Entretanto, os autores sugerem que pesquisas relacionadas a recomendação da quantidade mais adequada de palha a ser mantida na superfície do solo devem ser intensificadas. Assim, a palha da cana-de-açúcar pode influenciar na qualidade e estrutura física do solo (CASTIONI *et al.*, 2018).

De acordo com Satiro *et al.* (2017), a palha gerada na colheita mecanizada diminui o efeito da compactação do solo pelo aumento do teor de matéria orgânica nas camadas superficiais, como também pela redução da energia dos rodados devido à camada de palha acima o solo. Além disso, esses manejos mantêm a quantidade de palha no solo espessa que age como protetora do solo contra os impactos externos como o fluxo de máquinas pesadas (CARVALHO *et al.*, 2017b). Segundo Garbiate *et al.* (2011) a cobertura do solo com os resíduos vegetais da colheita pode contrapor-se ao efeito da compactação pelo maquinário e favorecer a estabilidade estrutural do solo.

Os índices elevados de compactação do solo, no caso deste estudo representados por altos valores de Ds e RP, gerando baixos valores de macroporosidade, afetam a qualidade do solo e, possivelmente o movimento e armazenamento de água no solo. Provavelmente uma das razões para que não ocorram diferenças significativas entre os atributos avaliados seja devido ao solo já ter alcançado um valor muito alto de compactação, possivelmente até irreversível em curto prazo. Com isto, independentemente da quantidade de palha aplicada, não é suficiente para reverter este quadro.

Infelizmente, é uma situação muito comum nas usinas canavieiras no estado de São Paulo, Brasil, onde devido ao intenso tráfego, chegam ao ponto de que não é possível aplicação de fertilizantes e preparo de solo para uma reversão de curto prazo. Uma forma de se verificar se esta situação foi atingida é a partir do IHO, onde sabe-se que a partir da densidade crítica, ou seja, IHO zero, não se verifica mais resultados de preparo de solo (OLIVEIRA *et al.*, 2019). Lembrando que, fatores tanto físicos como hídricos afetam diretamente o IHO, pois são seus atributos base, com isso, influenciarão diretamente o IHO para os diferentes tratamentos.

#### **8.4.2 Água disponível no solo**

Além dos atributos físicos do solo, os atributos relacionados a porosidade e água também são incluídos no Intervalo Hídrico Ótimo (IHO), dentre eles a capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e a porosidade de aeração (PA). Ou seja, o conhecimento destes atributos no solo se faz essencial para uma melhor compressão do resultado do IHO.

A quantidade de água presente no solo é fundamental para o crescimento das plantas. A quantidade de água disponível à planta é calculada utilizando elementos que determinam o teor de água no solo por meio dos limites inferior e superior do IHO, sendo eles a capacidade de campo (CC), que faz parte do limite superior e define a quantidade de água retida pelo solo após a drenagem e mostrou-se alta devido ao aumento dos microporos (TORMENA *et al.*, 2017).

A quantidade de palha que permanece acima do solo influencia diretamente na infiltração de água, bem como na retenção do solo (JOHNSON *et al.*, 2016; AQUINO *et al.*, 2017). Além disso, é capaz de reduzir a temperatura do solo, melhorando a qualidade dos atributos físicos e químicos do solo (BORDONAL *et al.*, 2018). Dessa maneira, manter uma camada de palha acima do solo pode contribuir para melhorar a quantidade de água no solo e minimizar os processos de erosão e, aumentar o teor de nutrientes (BLANCO-CANQUI; LAL, 2009; MARTINS FILHO *et al.*, 2009).

A manutenção da palha neste estudo não foi determinante para manter o teor de água suficiente no solo e a retenção foi muito baixa para o pleno desenvolvimento da cultura. O que explica isso, é que nas duas áreas estudadas os solos apresentaram perdas da qualidade dos atributos físicos que reflete no alto grau de compactação do solo, proveniente do intenso fluxo de máquinas pesadas que afeta diretamente a porosidade do solo. Por exemplo, o aumento da densidade que indica degradação do solo, a redução da macroporosidade do solo e aumento da resistência do solo à penetração. De acordo com Bordonal *et al.* (2018) a degradação física do solo é proveniente principalmente das práticas de mecanização em áreas agrícolas, sob cultivo de cana-de-açúcar. Para Franco *et al.* (2018) essa mesma prática leva à compactação do solo que afeta diretamente as raízes e reduz a produtividade da cana-de-açúcar. Sendo estes efeitos também encontrados neste estudo, onde, devido a redução da qualidade estrutural do solo, ocorreu uma menor quantidade de água disponível para as plantas, principalmente, ao se avaliar a CAD dos solos estudados.

A água disponível, tanto no solo de textura argilosa como em arenosa, foi afetada pelo fluxo de máquinas durante a colheita da cana-de-açúcar e, pelas condições edafoclimáticas. Para cultura da cana-de-açúcar é fundamental que se mantenha o solo úmido (OLIVEIRA *et al.*, 2019). Neste fator que entra a manutenção da palhada no solo, devido a redução da incidência direta do sol, há redução da temperatura e consequente redução da evaporação.

No início do estudo o teor de água do solo na capacidade de campo (CC) na camada de 0,10 m era o quase o mesmo, em que os valores foram de aproximadamente 10% nas duas camadas e nos dois tipos de solos. Nas duas safras da cana-de-açúcar, mesmo com o estresse hídrico e alto grau de compactação de ambos os solos, não foi possível observar diferenças significativas no conteúdo de água do solo. Isso demonstra que os atributos físicos do solo influenciam diretamente no conteúdo de água, pois estes são diretamente relacionados com a quantidade de água no solo (TORMENA *et al.*, 2017).

O ponto de murcha permanente que indica quando a planta não tem capacidade de absorver água disponível. Apesar da capacidade de água disponível ao solo (CAD) não ser diretamente um dos elementos utilizados para estabelecer o IHO, os dados deste estudo indicam que o valor afeta diretamente o resultado do IHO e, consequentemente, junto a isso definir a quantidade de água disponível para a planta ter acesso. É importante destacar que tanto o solo de textura argilosa como arenosa, tiveram capacidade de água disponível nos solos semelhantes, ou seja, muito baixa. Isso indica que a quantidade de água disponibilizada para a cultura é pouca.

Esperava-se que a manutenção da palha de cana-de-açúcar influenciasse diretamente na quantidade de água disponível no solo, em razão da biomassa acima do solo e

pelo fornecimento de matéria orgânica que mantem umidade no solo (CASTIONI *et al.*, 2018). Porém, esse resultado não foi encontrado em nenhuma das áreas estudadas, mesmo com diferentes texturas de solos e manutenção de palha empregada. Isto também é um resultado da pré-compactação do solo, onde independente do manejo aplicado, não há diferença entre os tratamentos.

Verificou-se que o solo arenoso obteve maiores valores de CC, aproximadamente  $0,18 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  e um PMP de  $0,08 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , resultando em uma CAD de aproximadamente  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  para as diferentes quantidades de palha. Devido as características dos solos argilosos, conforme esperado, obteve uma alta CC de aproximadamente  $0,35 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  e um PMP de  $0,25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , mas a sua CAD, assim como para o solo arenoso, foi de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  aproximadamente para as diferentes quantidades de palha. Ou seja, independentemente do tipo de solo, eles obtiveram a mesma CAD, sendo um sinal de que este pode ser um atributo indicador de compactação do solo independente da textura (OLIVEIRA *et al.*, 2019).

A porosidade de aeração recomendada é de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , ou seja, a CAD está igual/abaixo da porosidade de aeração para a maioria das quantidades de palha (TORMENA *et al.*, 2017). Este é um resultado preocupante, pois uma das hipóteses do estudo seria que solos arenosos, devido sua maior macroporosidade, como encontrada nesse estudo, aumentasse a CAD do solo, e este resultado ocorreu. Ou seja, mesmo com maior macroporosidade, a estrutura do solo arenoso está tão degradada que obteve uma CAD menor que a porosidade de aeração.

Este resultado mostra que, mesmo se não tivessem sido avaliados os atributos físicos do solo, apenas com os valores da CAD poderia ter sido identificada a compactação em ambos os solos. Mostrando este atributo como um importante indicador para qualidade do solo de mais fácil medição, do que o IHO.

Apesar da CAD não ser um atributo direto do IHO, considerando que ela é um resultado indireto da estrutura do solo, ela pode ser uma forma de avaliação do possível resultado que o IHO irá obter. Ou seja, em situações em que a CAD está muito baixa já demonstra um solo com qualidade estrutural precária e possivelmente compactado, e com isso, já pode-se esperar que ocorra um resultado desfavorável no IHO, isto é, zero ou próximo de zero.

#### **8.4.3 IHO e sua relação com os atributos físicos do solo e a água solo**

O IHO começou a ser usado nos anos 90 (TORMENA *et al.*, 1998), mas nos últimos anos foram encontradas mais formas de avaliação deste indicador, aumentando a quantidade de pesquisas que aplicaram essa metodologia (TORMENA *et al.*, 2017). Isto se deve ao fato de

que cada vez mais, com os solos compactados, é possível a partir deste atributo encontrar respostas no solo de falta de produtividade das culturas e limitações ao crescimento (OLIVEIRA *et al.*, 2019).

O IHO em ambas as áreas foram zero, no caso do solo com textura argilosa e, quase nulo, no solo de textura arenosa. Esse comportamento ocorreu devido aos efeitos da compactação verificada nos atributos físicos do solo, como por exemplo, alta Ds e RP e baixa macroporosidade, que sofrem alterações devido ao intenso fluxo de máquinas pesadas nos canaviais (OLIVEIRA *et al.*, 2019).

Diferente dos resultados aqui apresentados, Tormena *et al.* (2017), estudando os impactos da colheita e do plantio de milho e no plantio direto confirmaram que o IHO foi mais sensível aos tratamentos de plantio direto e colheita de palha devido aos impactos na resistência do solo à penetração e disponibilidade de água no solo. Os resultados mostraram diferenças e as taxas de remoção de palha do milho afetaram minimamente o IHO. No entanto, uma hipótese inicial deste estudo era de que o solo arenoso teria maior IHO, mas essa hipótese não foi confirmada, com ambos os solos obtendo o mesmo valor de IHO. Este resultado está de acordo com os obtidos para a CAD do solo, onde apesar das diferenças texturais, a CAD de ambos os solos foram semelhantes, próxima de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ .

Nos dois solos estudados, a CAD foi afetada mostrando que a qualidade estrutural do solo influencia diretamente na retenção de água no solo, independentemente do tipo de solo e da distribuição de porosidade, resultando em uma CAD semelhante de aproximadamente  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  e o IHO quase nulo. Por essa razão, não ocorreu IHO nas áreas estudadas. Este estudo sugere que antes de se desenvolver o IHO, é necessário compreender o comportamento da capacidade de água retida no solo, bem como o ponto de murcha permanente.

O IHO foi calculado considerando que os dois solos em estudo se encontravam compactados, e dessa maneira é importante destacar que nas duas texturas de solos os IHO foram baixos, mesmo com a manutenção de palha igual e condições edafoclimáticas distintas. Assim, os resultados encontrados estão em concordância com o que se esperava, e comprovou que não é recomendável se aplicar o IHO em áreas compactadas devido à capacidade de água disponível que sofreu redução devido ao tráfego de máquinas.

Os resultados encontrados para Ds e macroporosidade, das duas classes texturais estudadas, além da análise do IHO, afetam diretamente os atributos relacionados a água no solo. Comprovando a importância da avaliação do IHO como uma variável da qualidade estrutural do solo bem como da produtividade da planta. A partir destes resultados, foi possível inferir que houve perdas da qualidade dos atributos físicos do solo, por exemplo, aumento da Ds e RP

e redução da macroporosidade mediante ao intenso fluxo de máquinas e ao alto grau de compactação do solo.

Em uma pesquisa desenvolvida por, Silva *et al.* (2019), os autores avaliaram a umidade do solo associada ao IHO, potencial hídrico foliar, crescimento inicial e produção de café afetados pelo sistema de manejo do solo. Os autores apontam que o conteúdo de água disponível no solo está associado às condições edafoclimáticas, principalmente pela quantidade de chuva na estação chuvosa e seca, que é determinante para reservar água, de acordo com as condições físicas do solo e disponibilizar às plantas. Os resultados mostraram que a quantidade de água dentre as camadas de 0,20-0,60 m, nos sistemas de manejos empregados, o conteúdo de água no solo foi abaixo do esperado, sendo insuficiente para o desenvolvimento da planta, no período de estudo.

Provavelmente esses resultados são reflexo do elevado índice de mecanização da cultura da cana-de-açúcar que tende a promover compactação adicional do solo. Possivelmente, devido à baixa CAD de ambos os solos, há chances da planta estar em constante déficit hídrico, ou seja, independentemente das condições edafoclimáticas e da capacidade da palha de manter umidade no solo, não há água disponível para a planta. Para Boaretto *et al.* (2014) a falta de água ou estresse hídrico pode causar sérios problemas à planta e impedir seu desenvolvimento, ao mesmo tempo que o excesso de água pode afetar o sistema radicular, bem como o teor de nutrientes (IAMAGUTI *et al.*, 2015).

Em concordância com os resultados encontrados, Oliveira *et al.* (2019), verificaram que faixa de água com menor limitação foi influenciada pelo plantio direto e pela cobertura vegetal. Os resultados deste estudo mostraram valores de IHO igual a zero durante a soqueira, sob manejos de sorgo, milho e amendoim, devido ao aumento da Ds para o ciclo da cana soca, causando compactação nas áreas estudadas, ou seja, o mesmo efeito encontrado nessa pesquisa.

Nesse contexto, Gonçalves *et al.* (2014), observaram alteração do IHO devido aumento progressivo da compactação do solo, onde o IHO foi reduzido quase a zero no tratamento com 20 passadas de trator na entrelinha de plantio de cana-de-açúcar na camada de 0,00-0,10 m. Tormena *et al.* (2017), avaliaram a qualidade física de um solo sob dois sistemas de preparo do solo e três níveis de palha na superfície e, observaram que o IHO é frequentemente reduzido à medida que a compactação do solo aumenta devido baixa oxigenação ocasionada pelo limite superior ou maior resistência do solo à penetração da raiz no limite inferior.

Além disso, a presença de um IHO nulo na camada de 0,10-0,30 m da área de solo arenoso, pode ainda estar relacionada ao efeito de “pé de grade”. Moreira *et al.* (2014),

verificaram uma diferenciação no IHO entre as camadas de solo revelando maiores restrições hídricas nas camadas de 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m, em relação à camada de 0,00-0,10 m. Dias *et al.* (2016), observaram efeito positivo da subsolagem em área de cana-de-açúcar no IHO, que, ao romper a camada compactada, promoveu maior amplitude do IHO para o solo, principalmente no horizonte AB.

De acordo com Carvalho *et al.* (2017b), o estabelecimento de níveis de palha recomendáveis para manutenção no solo é um aspecto específico de cada local, de forma que, regiões com regimes climáticos ou tipos de solos menos sensíveis à erosão, ao déficit de água e à perda de solo são menos afetadas pela remoção de palha. No entanto, as recomendações que os autores mencionam são opostas aos resultados encontrados por este estudo, em que independentemente das quantidades de palha e condições edafoclimáticas, o IHO e a CAD do solo foram as mesmas, ou seja, solos extremamente compactados independem desses fatores.

Em todos os tratamentos observou-se que os IHO foi próximo ou igual a zero durante os ciclos da cana-de-açúcar. Isso ocorreu devido à degradação estrutural dos solos, em razão do aumento da Ds e redução da macroporosidade, que afeta diretamente no conteúdo e capacidade de retenção de água no solo, bem como na disponibilidade hídrica para as plantas. Assim, é possível concluir que em casos como este, em que o IHO depende de uma boa qualidade de solo e conteúdo de água, não recomenda-se avaliar apenas os limites de água.

#### **8.4.4 IHO e produtividade de cana-de-açúcar**

A produtividade da cana-de-açúcar é afetada por diversos fatores relacionados ao solo, como controle de tráfego (ESTEBAN *et al.*, 2019) ou manejo do solo (MORAES *et al.*, 2019). Assim, como estes fatores afetam a qualidade do solo, e conseqüentemente no IHO, pois ele depende diretamente dos fatores do solo para seu cálculo.

Mas, ao contrário do IHO, a produtividade obteve diferenças significativas entre os tratamentos avaliados resultando na manutenção das quantidades de palha (0, 5, 10 e 15 Mg ha<sup>-1</sup>) que pode influenciar diretamente na produtividade da cultura. Nesse sentido, verificou-se na primeira safra (2013-2014), que o tratamento caracterizado pela ausência de palha na superfície do solo (0 Mg ha<sup>-1</sup>) apresentou menor produtividade tanto em solo argiloso como em arenoso. Entretanto, na segunda safra (2014-2015), essa tendência se manteve apenas para o solo arenoso, confirmando a necessidade de manutenção de níveis de palha entre 10 e 15 Mg ha<sup>-1</sup>, a fim de garantir a sustentabilidade produtiva nessas áreas.

Acredita-se que o IHO apresentasse valores maiores bem como o teor de água retido no solo, a produtividade da cana-de-açúcar seria substancialmente maior. Em complemento, no

estudo desenvolvido por, Silva *et al.* (2019), em que os autores avaliaram a quantidade de água e o desenvolvimento do café relacionado com o manejo do solo, os autores apontam que a produtividade da cultura esteve relacionada diretamente com às condições edafoclimáticas que afetam diretamente o IHO e conseqüentemente a produtividade agrícola.

As diferenças observadas para a produtividade foram mais acentuadas do que para os outros atributos físicos do solo, pois depende de outros fatores além da qualidade estrutural do solo, como quantidade de nutrientes do solo. Possivelmente, as diferentes quantidades de palha aplicadas melhoraram a qualidade química do solo, favorecendo uma maior diferença entre os tratamentos (CASTIONI *et al.*, 2019).

A produtividade depende de diversos fatores além da remoção ou manutenção da palha no solo, como por exemplo, o tipo de solo, clima, época de colheita e ciclo da cultura (CARVALHO *et al.*, 2017b). Com isso, conclui-se que os efeitos dos atributos físicos, por serem apenas um dos fatores a influenciar a produtividade, não são os principais fatores a interferir na produtividade.

Devido a estas diferenças, verifica-se que a produtividade sentiu um maior efeito do acúmulo de palha do que os atributos físicos do solo, principalmente no solo arenoso, onde devido suas características naturais reflete o efeito da compactação e alteração nos atributos físicos de forma mais rápida do que o solo argiloso, comprovado pelos resultados na produtividade encontrados nesse estudo.

Portanto, desenvolver pesquisas baseadas em período de maior duração é recomendado para estabelecer taxas de remoção de palha “ideais”, de modo que possa compreender o IHO, bem como a dinâmica dos efeitos sobre a perda e aumento na produção da cultura. Além de quantificar de forma sustentável, os benefícios quanto à quantidade de água disponível para as plantas, e a quantidade ideal de palha a ser mantida no solo, a fim de combater a erosão, além de melhorar o rendimento agrícola para os produtores rurais.

#### **8.4.5 Sugestão metodológica de adaptação ao IHO**

A partir dos resultados apresentados, observa que, para solos extremamente compactados, como os encontrados neste estudo, os autores propõem uma modificação a metodologia do índice, onde antes de realizar o teste, se calcular a CAD do solo. No caso da CAD ser igual ou menor do que  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , não se deve realizar o IHO, pois será zero ou muito próximo, deixando de se tornar um índice de avaliação entre tratamentos.

Os procedimentos laboratoriais para a realização do IHO são exaustivos e caros. Em muitos locais, devido ao custo dos extratores de Richards serem elevados, principalmente em



países com moedas desvalorizadas em relação ao dólar e euro, como o Brasil, o acesso a estes equipamentos são limitados. No caso do Brasil, local onde foi realizada esta análise experimental, o salário mínimo é de US\$ 300,00 aproximadamente (utilizando R\$1.200,00 e câmbio de R\$4,00 para cada US\$1,00), sendo que apenas um extrator de Richards custa no Brasil até US\$ 2.000,00, ou seja, quase sete vezes o valor do salário mínimo.

Além disso, há a questão do tempo para o término do procedimento, no caso de solos argilosos, pode-se demorar até três meses para realizar o procedimento para todas as tensões, considerando que só tenha um extrator. Com isso, ao realizar primeiramente a CAD o procedimento pode ser realizado em menos de um mês, gerando uma grande economia de tempo e recursos.

Verifica-se que esta adaptação metodológica pode ser realizada tanto em solos arenosos como em solos argilosos, economizando tempo e recursos. Em caso de CAD superior a  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  já se sabe que há um aumento de chances do IHO encontrado, pelo menos para algumas densidades do solo, ser superior a zero, sendo um bom índice para avaliação de pesquisas em solos.

A importância do conteúdo de água no solo deve ser mais difundida à medida que estudos de cunho científico utilizem análise que incluem os atributos físicos do solo, assim como o IHO. Além disso, é necessário também que esses dados possam ser apresentados para os produtores rurais de modo que possam subsidiar seus meios de produção agrícola. Esta pesquisa consiste em uma nova forma de avaliação para a utilização da manutenção da palha de cana-de-açúcar relacionada com o IHO e, suas respectivas interações com os atributos físicos do solo, bem como a produtividade agrícola no Brasil, que mostra inovação no meio científico e agrícola do país.

## 8.5 CONCLUSÕES

O objetivo deste estudo foi avaliar o comportamento do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) em solos de textura argilosa e arenosa sob cultivo de cana-de-açúcar com uso de diferentes doses de palha mantidas na superfície do solo. O IHO, foi maior no solo argiloso, ao contrário do solo arenoso que foi quase nulo. Este último apresenta maior sensibilidade aos efeitos prejudiciais da compactação do solo devendo ser mantido níveis de palha entre 10 e 15 Mg ha<sup>-1</sup>.

Este indicador foi fundamental para avaliar a dinâmica e interação com os atributos físicos e capacidade de retenção de água do solo, bem como a influência do emprego das doses de palha em dois anos agrícolas. Isto nos demonstra que, como a quantidade de palha estabelecida em estudo não foi determinante para influenciar no IHO e na retenção de água do solo, há uma tendência maior perda da qualidade e estrutura do solo, levando à diminuição da produtividade da cana-de-açúcar.

A produtividade esteve diretamente relacionada com os efeitos da mecanização sobre os atributos físicos do solo, que conseqüentemente afetou o IHO e o teor de água disponível à planta em área de solo com textura arenosa. Os impactos nos atributos físicos do solo surgem de forma mais lenta, em relação às doses de palha sobre o solo com o desenvolvimento da cultura. Assim, devido à essas mudanças dos atributos físicos do solo, a produtividade sofreu influência maior da palha no solo arenoso em relação ao solo argiloso, pois a característica natural do solo arenoso é mais sensível à compactação e mudanças nos atributos do solo. Dessa forma, realizar pesquisas de maior duração é fundamental para compreender os impactos da manutenção da palha de cana-de-açúcar sobre o solo, para que se possa definir melhor a quantidade de água disponível no solo e se ter melhor produtividade agrícola.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON-TEIXEIRA, C. J.; MASTERS M. D.; BLACK, C. K.; ZERI M.; HUSSAIN, M.Z.; BERNACCHI. K.; DE LUCIA, E. H. Altered belowground carbon cycling following land-use change to perennial bioenergy crops. **Ecosystems**, v.16, n.3, p.508-520, 2013.

ALVARENGA, C. R.; CABEZAS, W. A. L.; CRUZ, J. C.; SANTANA, D. P. Plantas de cobertura de solo para sistema plantio direto. **Informe Agropecuário**, v.22, n.208, p.25-36, 2001.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVEZ, J. L. M.; SPAROVEK, G. KOPPEN climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, n.6, p.711-728, 2013.

ARSHAD, M. A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. **Physical tests for monitoring soil quality**. In: Methods for assessing quality. Madison: Soil Science Society of America (DORAN, J. W.; JONES, A. J.), v.1, p.123-141, 1996.

AUSTIN, A. T.; BALLARÉ, C. L. Dual role of lignin in plant litter decomposition in terrestrial ecosystems. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v.107, n.10, p.4618-4622, 2010.

AQUINO, G. S.; CONTIMEDINA, C.; COSTA, D. C.; SHAHAB, M.; SANTIAGO, A. D. Sugarcane straw management and its impact on production and development of ratoons. **Industrial Crops and Products**, v.102, p.58-64, 2017.

BETIOLI JÚNIOR, E.; MOREIRA, W. H.; TORMENA, C. A.; FERREIRA, C. J. B.; SILVA, A. P.; GIAROLA, N. F. B. Intervalo hídrico ótimo e grau de compactação de um Latossolo Vermelho após 30 anos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, n.3, p.971-982, 2012.

BLANCO-CANQUI, H.; LAL, R. Crop residue removal impacts on soil productivity and environmental quality. **Critical Reviews in Plant Science**, v.28, n.3, p.139-163, 2009.

BLANCO-CANQUI, H.; LAL, R. Soil and crop response to harvesting corn residues for biofuel production. **Geodema**, v.141, n.3-4, p.355-362, 2007.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Projeções do Agronegócio Brasil 2010/2011 a 2020/2021**. Brasília: MAPA/AGE, 48 p. 2011.

BOARETTO, L. F.; CARVALHO, G.; BORGIO, L.; CRESTE, S.; LANDELL, M. G. A.; MAZZAFERA, P.; AZEVEDO, R. A. Water stress reveals differential antioxidant responses of tolerant and non-tolerant sugarcane genotypes. **Plant Physiology Biochemistry**, v.74, p.165-175, 2014.

BORDONAL, R. O.; CARVALHO, J. L. N.; LAL, R.; FIGUEIREDO, E. B.; OLIVEIRA, B. G.; LA SCALA JUNIOR, N. Sustainability of sugarcane production in Brazil. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v.38, n.13, p.1-3, 2018.

BÜNEMANN, E. K.; BONGIORNO, G.; BAI, Z.; CREAMER, R. E.; DEYN, G.; GOEDE, R.; FLESKENS, L.; GEISSEN, V.; KUYPER, T. W.; MÄDER, P.; PULLEMAN, M.; SUKKEL, W.; WILLEM, J.; GROENIGEN, V.; BRUSSAARD, L. Soil quality – A critical review. **Soil**

**Biology and Biochemistry**, v.120, n.1, p.105-125, 2018.

BUSSCHER, W. J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to common water content. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v.3, n.2, p.519-524, 1990.

CAPAZ, R. S.; CARVALHO V. S. B.; NOGUEIRA, L. A. H. Impact of mechanization and previous burning reduction on GHG emissions of sugarcane harvesting operations in Brazil. **Applied Energy**, v.102, n.3, p.220-228, 2013.

CARBONELL-BOJOLLO, R.; TORRES, M. A. R. R. de; RODRIGUEZ-LIZANA, A.; ORDÓÑEZ-FERNÁNDEZ, R. Influence of soil and climate conditions on CO<sub>2</sub> emissions from agricultural soils. **Water Air Soil Pollution**, v.223, p.3425-3435, 2012.

CAMPBELL, E. E.; JOHNSON, J. M. F.; JIN, V. L.; LEHMAN, R. M.; OSBORNE, S. L.; VARVEL, G. E.; PAUSTIAN, K. Assessing the soil carbon, biomass production, and nitrous oxide emission impact of corn residue management for bioenergy feedstock production using DAYCENT. **BioEnergy Research**, v.7, n.2, p.491-502, 2014.

CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônomo de Campinas**. Campinas, Instituto Agrônomo (Boletim Técnico, 106, Edição Revista e Atualizada), p.77, 2009.

CAMPOS, L. H. F.; CARVALHO, S. J. P.; CHRISTOFFOLETI, P. J.; FORTES, C.; SILVA, J. S. Sistemas de manejo da palhada influenciam acúmulo de biomassa e produtividade da cana-de-açúcar (var. RB855453). **Acta Scientiarum Agronomy**, v.32, n.2, p.345-350, 2010.

CANELLAS, L. P.; BUSATO, J. G.; DOBBSS, L. B.; BALDOTTO, M. A.; RUMJANEK, V. M.; OLIVARES, F. L. Soil organic matter and nutrient pools under long-term non-burning management of sugar cane. **European Journal of Soil Science**, v.61, n.3, p.375-383, 2010.

CARVALHO, J. L. N.; CERRI, C. E. P.; KARLEN, D. L. Sustainable sugarcane straw Special Issue: Considerations for Brazilian bioenergy production. **BioEnergy Research**, v.12, n.1, p.1-3, 2019a.

CARVALHO, J. L. N.; MENANDRO, L. M. S.; CASTRO, S. G. Q.; CHERUBIN, M. R.; BORDONAL, R. O.; BARBOSA, L. C.; GONZAGA, L. C.; TENELLI, S.; FRANCO, H. C. J.; KOLLN, O. T.; CASTIONI, G. A. F. Multi location straw removal effects on sugarcane yield in south-central Brazil. **BioEnergy Research**, v.9, n.7, p.1-17, 2019b.

CARVALHO, J. L. N.; HUDIBURG, T. W.; FRANCO, H. C. J.; DELUCIA, E. H. Contribution of above- and below ground bioenergy crop residues to soil carbon. **BioEnergy**, v.9, p.1333-1343, 2017a.

CARVALHO, J. L. N.; NOGUEIROL, R. C.; MENANDRO, L. M. S.; BORDONAL, R. O.; BORGES, C. D.; CANTARELLA, H.; FRANCO, H. C. J. Agronomic and environmental implications of sugarcane straw removal: a major review. **Global Change Biology BioEnergy**, v.9, p.1181-1195, 2017b.

CARVALHO, J. L. N.; OTTO, R.; FRANCO, H. C. J.; TRIVELIN, P. C. O. Input of sugarcane post-harvest residues into the soil. **Scientia Agricultural**, v.70, n.5, p.336-344, 2013.

CASTIONI, G. A. F.; CHERUBIN, M. R.; BORDONAL, R. O.; BARBOSA, L. C. MENANDRO, L. M. S.; CARVALHO, J. L. N. Straw removal affects soil physical quality and sugarcane yield in Brazil. **BioEnergy Research**, v.12, p.1-12, 2019.

CASTIONI, G. A. F.; CHERUBIN, M. R.; MENANDRO, L. M. S.; SANCHES, G. M.; BORDONAL, R. O.; BARBOSA, L. C.; FRANCO, H. C. J.; CARVALHO, J. L. N. Soil physical quality response to sugarcane straw removal in Brazil: A multi approach assessment. **Soil and Tillage Research**, v.184, p.301-309, 2018.

CEPAGRI, Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas aplicadas a Agricultura, 2018. **Clima dos municípios Paulistas**. Disponível em [http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima\\_muni\\_374.html](http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_374.html). Acesso em 17 de maio de 2018.

CERRI, C. C.; GALDOS, M. V.; MAIA, S. M. F.; BERNOUX, M.; FEIGL, B. J.; POWLSON, D.; CERRI, C. E. P. Effect of sugarcane harvesting systems on soil carbon stocks in Brazil: an examination of existing data. **European Journal of Soil Science**, v.62, n.1, p.23-28, 2011.

CERRI, C. E. P.; SPAROVEKI, G.; BERNOUX, M.; EASTERLING, W. E.; MELILLO, J. M.; CERRI, C. C. Tropical agriculture and global warming: impacts and mitigation options. **Scientia Agricola**, v.64, n.1, p.83-99, 2007.

CHERUBIN, M. R.; OLIVEIRA, D. M. S.; FEIGL, B. J.; PIMENTEL, L. G.; LISBOA, I. P.; GMACH, M. R.; VARANDA, L. L.; MORAIS, M. C.; SATIRO, L. S.; POPIN, G. V.; PAIVA, S. R.; SANTOS, A. K. B.; VASCONCELOS, A. L. S.; MELO, P. L. A.; CERRI, C. E. P.; CERRI, C. C. Soils and plant nutrition: Review crop residue harvest for bioenergy production and its implications on soil functioning and plant growth: A review. **Scientia Agricola**, v.75, n.3, p.255-272, 2018.

CHERUBIN, M. R.; KARLEN, D. L.; CERRI, C. E. P.; FRANCO, A. L. C.; TORMENA, C. A.; DAVIES, C. A.; CERRI, C. C. Soil quality indexing strategies for evaluating sugarcane expansion in Brazil. **Plos One**, v.11, n.3, p.1-26, 2016.

CHRISTOFFOLETI, P. J.; CARVALHO, S. J. P.; LÓPEZ-OVEJERO, R. F.; NICOLAI, M.; HIDALGO, E.; SILVA, J. E. Conservation of natural resources in Brazilian agriculture: implications on weed biology and management. **Crop Protection**, v.26, n.3, p.383-389, 2007.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento, Brasil. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. Primeiro Levantamento-Safra 2017/18, 62p. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>. Acesso em: 07 de março de 2019a.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. 2018. **Acompanhamento da safra brasileira de Cana-de-açúcar: Quarto levantamento**. CONAB. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>. Acesso em: 07 de março de 2019b.

CORRÊA, S. T. R.; BARBOSA, L. C.; MENANDRO, L. M. S.; SCARPARE, F. V.; REICHARDT, K.; MORAES, L. O.; HERNANDES, T. A. D.; FRANCO, H. C. J.; CARVALHO, J. L. N. Straw removal effects on soil water dynamics, soil temperature, and sugarcane yield in south-central Brazil. **BioEnergy Research**, v.12, n.1, p.1-15, 2019.

DEXTER, A. R. Advances in characterization of soil structure. **Soil and Tillage Research**, v.11, n.3-4, p.199-238, 1988.

DIAS, C. B.; ROCHA, G. C.; ASSIS, I. R.; FERNANDES, R. B. A. Intervalo hídrico ótimo e densidade crítica de um Latossolo Amarelo coeso sob diferentes usos no ecossistema Tabuleiro Costeiro. **Revista Ceres**, v.63, n.6, p.868-878, 2016.

DOURADO-NETO, D.; NIELSEN, D.R.; HOPMANS, J. W.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.O.S.; LOPES, P.P. **Soil Water Retention Curve (SWRC)** software. Versão 3.00 beta. Piracicaba: ESALQ/USP, 2001.

ESTEBAN, D. A. A.; SOUZA, Z. M.; TORMENA, C. A.; LOUVERA, L. H.; LIMA, E. S.; OLIVEIRA, I. N.; RIBEIRO, N. P. Soil compaction, root system and productivity of sugarcane under different row spacing and control edtraffic atharvest. **Soil and Tillage Research**, v.187, p.60-71, 2019.

EVERTON, M. A.; ALMEIDA, R. F.; SILVA JUNIOR, A. C.; RIBEIRO, T. B.; SILVA, A. A.; LANA, R. M. Q. Aggregation and organic matter content in different tillage systems for sugarcane. **African Journal of Agricultural**, v.10, n.4, p.281-288, 2015.

ELLERT, B. H.; BETTANY, J. R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Canadian Journal of Soil Science**, v.75, n.4, p.529-538, 1995.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) - FAOSTATS. 2016. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/site/567/default.aspx>. Acesso em: 07 de março de 2019.

FARHATE, C. V.; SOUZA, Z. M.; GUIMARÃES, JÚNNYOR, W. S.; SOUSA, A. C. M.; CAMPOS, M. C. C.; CARVALHO, J. L. N. Soil physical quality in sugarcane field under cover crop and different soil tillage systems. **Journal of Agricultural Science**, v.10, n.11, p.489-500, 2018.

FIDALSKI, J. Qualidade física de Latossolo Vermelho em sistema de integração lavoura-pecuária após cultivo de soja e pastejo em braquiária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.50, n.11, p.1097-1104, 2015.

FITO, J.; TEFERA, N.; DEMEKU, S.; KLOOS, H. Water footprint as an emerging environmental tool for assessing sustainable water use of the bioethanol distillery at metahara sugarcane farm, Oromiya Region, Ethiopia. **Water Conservation Science and Engineering**, v.2, n.4, p.165-176, 2017.

FORTES, C.; TRIVELIN, P. C. O.; VITTI, A. C. Long-term decomposition of sugarcane harvest residues in Sao Paulo state, Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v.42, n.3, p.189-198, 2012.

FRANCO, H. C. J.; CASTRO, S. G. Q.; SANCHES, G. M.; KOLLN, O. T.; BORDONAL, R. O.; BORGES, B. M. M. N.; BORGES, C. D. Alternatives to increase the sustainability of sugarcane production in Brazil under high intensive mechanization. **Sustainable Sugarcane Production**, v.426, p.350-383, 2018.

FRANCO, H. C. J.; PIMENTA, M. T. B.; CARVALHO, J. L. N.; MAGALHÃES, P. S. G.; ROSSELL, C. E. V.; BRAUNBECK, O. A.; VITTI, A. C.; KOLLN, O. T.; NETO, J. R. Assessment of sugarcane trash for agronomic and energy purposes in Brazil. **Scientia Agricola**, v.70, n.5, p.305-312, 2013.

FRANZLUEBBERS, A. J. Farming strategies to fuel bioenergy demands and facilitate essential

soil services. **Geoderma**, v.259-260, p.251-258, 2015.

GALDOS, M.; CAVALETT, O.; SEABRA, J. E. A.; NOGUEIRA, L. A. H.; BONOMI, A. Trends in global warming and human health impacts related to Brazilian sugarcane ethanol production considering black carbon emissions. **Applied Energy**, v.104, n.3, p.576-582, 2013.

GARBIATE, M. V.; VITORINO, A. C. T.; TOMASINI, B. A.; BERGAMIN, A. C.; PANACHUKI, E. Erosão entre sulcos em área cultivada com cana crua e queimada sob colheita manual e mecanizada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.2145-2155, 2011.

GRASSI, M. C. B.; PEREIRA, G. A. G. Energy-cane and RenovaBio: Brazilian vectors to boost the development of Biofuels. **Industrial Crops and Products**, v.129, n.2, p.201-205, 2019.

GOLDEMBERG, J.; MELLO, F. F. C.; CERRI, C. E. P.; DAVIES, C. A.; CERRI, C. C. Meeting the global demand for biofuels in 2021 through sustainable land use change policy. **Energy Policy**, v.69, n.2, p.14-18, 2014.

GOLDEMBERG, J.; COELHO, S. T.; GUARDABASSI, P. The sustainability of ethanol production from sugarcane. **Energy Policy**, v.36, n.6, p.2086-2097, 2008.

GONÇALVES, W. G.; SEVERIANO, E. C.; SILVA, F. G.; COSTA, K. A. P.; GUIMARÃES JUNNYOR, W. S.; MELO, G. B. Least limiting water range in assessing compaction in a Brazilian Cerrado latosol growing sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, n.2, p.432-443, 2014.

GRAHAM-ROWE, B. Y. D. Beyond food versus fuel. **Nature**, v.474, n.6, p.3-5, 2011.

GUIMARÃES, R. M. L.; TORMENA, C. A.; BLAINSKI, É.; FIDALSKI, J. Intervalo hídrico ótimo para avaliação da degradação física do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, n.6, p.1512-1521, 2013.

GUIMARÃES JUNNYOR, W. S.; SEVERIANO, E. C.; ALESSANDRO, R.; SILVA, G.; GONÇALVES, W. G.; ANDRADE, R. B.; ROBERTO, B. R.; MARTINS, F. T.; CUSTÓDIO, G. D. Sweet sorghum performance affected by soil compaction and sowing 42 time as a second crop in the Brazilian Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, n.6, p.1744-1754, 2015.

HAIR, J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. **Análise multivariada de dados**. Porto Alegre: Bookman, 593 p. 2005.

HAISE, H.R.; HAAS, H.J.; JENSEN, L.R. Soil moisture studies of some great plains soils. II. Field capacity to 1/3-atmosphere percentage and “minimum point” as related to 15–26-atmosphere percentage. **Soil Science Society of America Journal**, v.34, n.1, p.20-25, 1955.

HASSUANI, S. J.; LEAL, M.; MACEDO, I. **Biomass power generation. Sugarcane bagasse and trash**. PNUD - Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento CTC - Centro de Tecnologia Canavieira. Ed. Piracicaba: CTC; Brasília PNUD, n.1, p.24-26, 2005.

HEIN, J.; GUARINC, A.; FROMMÉD, E.; PAUW, P. Forest Policy and Economics Deforestation and the Paris climate agreement: An assessment of REDD + in the national climate action plans. **Forest Policy and Economics**, v.90, n.2, p.7-11, 2018.

IAMAGUTI, J. L.; MOITINHO, M. R.; TEIXEIRA, D. D. B.; BICALHO, E. S.; PANOSSO, A. R.; LA SCALA JUNIOR, N. Preparo do solo e emissão de CO<sub>2</sub>, temperatura e umidade do solo em área canavieira. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, n.1, p.497-504, 2015.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate change 2007: The physical science basis; summary for policymakers**. Intergovernmental Panel on Climate Change, Switzerland, 2007.

IRENA. AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA RENOVÁVEL. Roadmap for a renewable energy future. **A Renewable Energy Roadmap**. 2016. Disponível em: [http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA\\_Remap\\_2016\\_edition\\_report.pdf](http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_Remap_2016_edition_report.pdf). Acesso em 25 de outubro de 2019.

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. **Applied multivariate statistical analysis**. 5 Ed. Upper Saddle River, Prentice Hall, p. 767, 2002.

JOHNSON, J. M. F.; STROCK, J. S.; TALLAKSEN, J. E. M. Reese Corn stover harvest changes soil hydrology and soil aggregation. **Soil and Tillage Research**, v.161, p.106-115, 2016.

KARLEN, D. L.; BIRRELL, S. J.; JOHNSON, J. M. F.; OSBORNE, S. L.; SCHUMACHER, T. E.; VARVEL, G. E.; FERGUSON, R. B.; NOVAK, J. M.; FREDRICK, J. R.; BAKER, J. M.; LAMB, J. A.; ADLER, P. R.; ROTH, G. W.; NAFZIGER, E. D. Multilocation cornstover harvest effects on crop yields and nutrient removal. **BioEnergy Research**, v.7, n.2, p.528-539, 2014.

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. **Size distribution of aggregates**. In: BLACK, C.A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society Agronomy, p.499-510, 1965.

KLIEMANN, H. J.; BRAZ, A. J. P. B.; SILVEIRA, P. M. Taxa de decomposição de resíduos de espécies de cobertura em Latossolo Vermelho distroférico. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.36, n.1, p.21-28, 2006.

KHATIWADA, D.; LEDUC, S.; SILVEIRA, S.; MCCALLUM, I. Optimizing ethanol and bio-electricity production in sugarcane biorefineries in Brazil. **Renew Energy**, v.85, p.371-386, 2016.

KLEIN, V. **Física do Solo**. 2 Edição. Passo Fundo: UPF, p.189-197, 2012.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: physical and mineralogical properties**. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 635-662.

LAPOLA, D. M.; MARTINELLI, L. A.; PERES, C. A.; OMETTO, J. P. H. B.; FERREIRA, M. E.; NOBRE, C. A.; AGUIAR, A. P. D.; BUSTAMANTE, M. M. C.; CARDOSO, M. F.; COSTA, M. H.; JOLY, C. A.; LEITE, C. C.; MOUTINHO, P.; SAMPAIO, G.; STRASSBURG, B. B. N.; VIEIRA, I. C. G. Pervasive transition of the Brazilian land-use system. **Nature Climate Change**, v.4, n.1, p.27-35, 2014.

LAL, R. World crop residues production and implications of its use as a biofuel. **Environment International**, v.31, n.4, p.575-584, 2005.



LIMA, V. M. P.; OLIVEIRA, G. C.; SERAFIM, M. E.; CURI, N.; EVANGELISTA, A. R. Intervalo hídrico ótimo como indicador de melhoria da qualidade estrutural de Latossolo degradado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, n.1, p.71-78, 2012.

LIER, Q. J. V.; GUBIANI, P. I. Beyond the “least limiting water range”: rethinking soil physics research in Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, n.4, p.925-939, 2015.

LEAL, M. R. L.V.; GALDOS, M. V.; SCARPARE, F. V.; SEABRA, J. E. A.; WALTER, A.; OLIVEIRA, C. O. F. Sugarcane straw availability, quality, recovery and energy use: aliterature review. **Biomass and Bioenergy**, v.53, n.1, p.11-19, 2013.

LEÃO, T. P.; SILVA, A. P.; MACEDO, M. C. M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V. P. B. Least limiting water range: A potential indicator of changes innear-surface soil physical quality after the conversion of Brazilian Savanna into pasture. **Soil and Tillage Research**, v.88, n.1-2, p.279-285, 2006.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Science**, v.1, p.277-294, 1985.

LISBOA, I. P.; CHERUBIN, M. R.; LIMA, R. P.;CERRI, C. C.; SATIRO, L. S.; WIENHOLD, B. J.; SCHMERD, M. R.; JIND, V. L.; CERRI, C. E. P. Sugarcane straw removal effects on plant growth and stalk yield. **Industrial Crops & Products**, v.111, n.1, p.794-806, 2018.

LISKA, A. J.; YANG, H.; MILNER, M.; GODDARD, S.; BLANCO-CANQUI, H.; PELTON, M. P.; FANG, X. X.; ZHU, H.; SUYKER, A. E. Biofuels from crop residue can reduce soil carbon and increase CO<sub>2</sub> emissions. **Nature Climate Change**, v.4, n.5, p.398-401, 2014.

MARIN, F.; THORBURN, P.; COSTA, L. G.; OTTO, R. Simulatinglong-term effects of trash management on sugarcane yield for Brazilian cropping systems. **Sugar Tech**, v.16, n.2, p.164-173, 2014.

MARTINS FILHO, M. V.; LICCIOTI, T. T.; PEREIRA, G. T.; MARQUES JÚNIOR, J.; SANCHEZ, R. B. Perdas de solo e nutrientes por erosão num Argissolo com resíduos vegetais de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, v.29, n.9, p.8-18, 2009.

MENANDRO, L. M. S, CANTARELLA, H.; FRANCO, H. C. J.; KÖLLN, O. T.; PIMENTA, M. T. B.; SANCHES, G. M.; RABELO, S. C.; CARVALHO, J. L. N. Comprehensive assessment of sugarcane straw: implications for biomass and bioenergy production. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v.11, n.3, p.488-504, 2017.

MENANDRO, L. M. S.; MORAES, L. O.; BORGES, C. D.; CHERUBIN, M. R.; CASTIONI, G. F. A.; CARVALHO, J. L. N. Soil macrofauna responses to sugarcane straw removal for bioenergy production. **BioEnergy Research**, v.12, n.1. p.1-14, 2019.

MELLO, F. F. C.; CERRI, C. E. P.; DAVIES, C. A.; HOLBROOK, N. M.; PAUSTIAN, K.; MAIA, S. M. F.; GALDOS, M. V.; BERNOUX, M.; CERRI, C. C. Payback time for soil carbon and sugar-cane ethanol. **Nature Climate Change**, v.4, n.1, p.605-609, 2014.

MORAES, E. R.; MAGESTE, J. G.; LANA, R. M. Q.; TORRES, J. L. R.; DOMINGUES, L. A. S.; LIMA, E. M. L. L. C. Sugarcane root development and yield under different soil tillage practices. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.43, n.1, p.1-10, 2019.

MOREIRA, F. R.; DECHEN, S. C. F. D. SILVA, A. P.; FIGUEIREDO, G. C.; DE MARIA, I. C.; PESSON, P. T. Intervalo hídrico ótimo em um Latossolo Vermelho cultivado em sistema semeadura direta por 25 anos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, n.1, p.118-127,2014.

MOITINHO, M. R.; PADOVAN, M. P.; PANOSSO, A. R.; LA SCALA JÚNIOR, N. Efeito do preparo do solo e da colheita de cana-de-açúcar sobre a emissão de CO<sub>2</sub>. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v.37, n.6, p.1720-1728, 2013.

NELSON, D. W.; SOMMERS, L. E. **Total carbon, organic carbon and organic matter**. In: Methods of soil analysis. Part 3. Chemical Methods-SSSA Book Series n° 5. Madison: Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, p. 963-1010, 1996.

NXUMALO, N.; RAMBURAN, S.; STEYN, J. M. Growth and yield responses of commercial sugarcane cultivars to mulching in the coastal rainfed region of South Africa. **South African Journal of Plant and Soil**, v.34, n.1, p.9-18, 2017.

OLIVEIRA, M. W.; TRIVELIN, P. C. O.; GAVA, G. J. C.; PENATTI, C. P. Degradação da palhada de cana-de-açúcar. **Scientia Agricola**, v.56, n.1, p.803-809, 1999.

OLIVEIRA, A. P. P.; LIMA, E.; ANJOS, L. H. C.; ZONTA, E.; PEREIRA, M. G. Sistemas de colheita da cana-de-açúcar: conhecimento atual sobre modificações em atributos de solos de tabuleiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.9, p.939-947, 2014.

OLIVEIRA, M. A. O.; ZUCARELI, C.; NEVES, C. S. V. J.; DOMINGUES, A. R.; MEDINA, C.C.; MORAES, L. A. A. Desempenho agrônômico da cana-de-açúcar cultivada sob diferentes quantidades de palhada da cultura na superfície do solo. **Semina: Ciências Agrárias**, v.37, p.3983-3996, 2016.

OLIVEIRA, D. M. S.; WILLIAMS, S.; CERRI, C. E. P.; PAUSTIAN, K. Predicting soil C changes over sugarcane expansion in Brazil using the DayCent model. **Global Change Biology Bioenergy**, v.9, p.1436-1446, 2017.

OLIVEIRA, I. N.; SOUZA, Z. M.; LOUVERA, L. H.; FARHATE, C. V. V.; LIMA, E. S.; ESTEBAN, D. A. A.; FRACAROLLI, J. A. Least limiting water range as influence by tillage and cover crop. **Agricultural Water Management**, v.225, n.1, p.1-13, 2019.

PANOUTSOU, C.; BAUEN, A.; DUFFIELD, J. Policy regimes and funding schemes to support investment for next-generation biofuels in the USA and the EU-27. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v.7, n.6, p.685-701, 2013.

PEREIRA, A. H. F.; VITORINO, A. C. T.; PRADO, E. A. F.; BERGAMIN, A. C.; MAUAD, M.; ARANTES, H. P. Least limiting water range and load bearing capacity of soil under types of tractor-trailers for mechanical harvesting of green sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, n.6, p.1603-1610, 2015.

PIMENTEL, L. G.; CHERUBIN, M. R.; OLIVEIRA, D. M. S.; CERRI, C. E. P.; CERRI, C. C. Decomposition of sugarcane straw: Basics for management decisions for bioenergy production. **Biomass and Bioenergy**, v.122, n.1, p.133-144, 2019.

POTRICH, D. C.; MARCHETTI, M. E.; POTRICH, D. C.; ENSINAS, S. C.; SERRA, A. P.;

SILVA, E. F.; SOUZA, N. H. Decomposição de resíduos culturais de cana-de-açúcar submetidos a diferentes doses de nitrogênio. **Semina: Ciências Agrárias**, v.34, n.4, p.1751-1760, 2014.

PROVENZANO, G.; RALLO, G.; GHAZOUANI, H. Assessing field and laboratory calibration protocols for the diviner 2000 probe in a range of soils with different textures. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.142, n.2, p.1-12, 2016.

RABOT, E.; WIESMEIER, M.; SCHLÜTER, S.; VOGEL, H. J. Soil structure as an indicator of soil functions: a review. **Geoderma**, v.314, p.122-137, 2018.

RAMOS, N. P.; YAMAGUCHI, C. S.; PIRES, A. M. M.; ROSSETTO, R. POSSENTI, R. A.; PACKER, A. P.; CABRAL, O. M. R.; ANDRADE, C. A. Decomposição de palha de cana-de-açúcar recolhida em diferentes níveis após a colheita mecânica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, n.9, p.1492-1500, 2016.

RAIJ, B. V.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 285 p. 2001.

RAZAFIMBELO, T.; BARTHES, B.; LARRE-LARROUY, M. C.; DE LUCA, E. F.; LAURENT, J. Y.; CERRI, C. C.; FELLER, C. Effect of sugarcane residue management (mulching versus burning) on organic matter in a clayey Oxisol from southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.115, n.1, p.285-289, 2006.

ROBERTSON, F. A.; THORBURN, P. J. Decomposition of sugarcane harvest residue in different climatic zones. **Australian Journal of Soil Research**, v.45, n.1, p.1-11, 2007.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; HORN, R.; KANSSON, I. H. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, v.102, n.2, p.242-254, 2009.

ROQUE, A. A. O.; SOUZA, Z. M.; ARAÚJO, F. S.; SILVA, G. R. V. Atributos físicos do solo e intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distrófico sob controle de tráfego agrícola. **Ciência Rural**, v.41, n.9, p.1536-1542, 2011.

SÁ, M. A. C.; SANTOS JUNIOR, J. D. G.; FRANZ, C. A. B.; REIN, T. A. Qualidade física do solo e produtividade da cana-de-açúcar com uso da escarificação entre linhas de plantio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, n.9, p.1610-1622, 2016.

SATIRO, L. S.; CHERUBIN, M. R.; SAFANELLI, J. L.; LISBOA, I. P.; ROCHA JUNIOR, P. R.; CERRI, C. E. P.; CERRI, C. C. Sugarcane straw removal effects on Ultisols and Oxisols in south-central Brazil. **Geoderma Regional**, v.11, n.6, p.86-95, 2017.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5ª Ed. Revista e Ampliada, Brasília: Embrapa, p.353, 2018.

SANTOS, A. P. G. S. **Manutenção da palha em superfície e seu efeito nos atributos do solo e na produtividade do canavial**. 2016. 159 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016.

SANTOS, F. A.; DE QUEIRÓZ, J. H.; COLODETTE, J. L.; FERNANDES, S. A.; GUIMARÃES, V. M.; REZENDE, S. T. Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol. **Química Nova**, v.35, n.5, p.1004-1010, 2012.

SAVAGE, M. J.; RITCHIE, J. T.; BLAND, W. L.; DUGAS, W. A. Lower limit of soil water availability. **Agronomy Journal**, v.88, n.4, p.844-851, 1996.

SINGH, P.; HEIKKINEN, J.; KETOJA, E.; NUUTINEN, V.; PALOJARVI, A.; SHEEHY, J.; MARTTI, E.; MITRA, S.; ALAKUKKU, L.; REGINA, K. Tillage and crop residue management methods had minor effects on the stock and stabilization of top soil carbon in a 30-year field experiment. **Science of the Total Environment**, v.518-519, p.337-344, 2015.

SILVA, B. M.; OLIVEIRA, G. C.; SERAFIM, M. E.; SILVA, É. A.; GUIMARÃES, P. T. G.; MELO, L. B. B.; NORTON, L. D.; CURI, N. Soil moisture associated with least limiting water range, leaf water potential, initial growth and yield of coffee as affected by soil management system. **Soil and Tillage Research**, v.189, n.1, p.36-43, 2019.

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, v.58, n.6, p.1775-1781, 1994.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, n.1, p.191-199, 2000.

SILVA, G. R. V.; SOUZA, Z. M.; MARTINS, F. M. V.; BARBOSA, R. S.; SOUZA, G. S. Soil, water and nutrient losses by interrill erosion from green cane cultivation. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, n.3, p.963-970, 2012.

SIX, J.; FELLER, C.; DENEFF, K.; OGLE, S. M.; MORAES, J. C.; ALBRECHT, A. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils-effects of no-tillage. **Agronomie**, v.22, n.7-8, p.755-775, 2002.

SIX, J.; PAUSTIAN, K.; ELLIOTT, E. T.; COMBRINK, C. Soil structure and soil organic matter: I. Distribution of aggregate size classes and aggregate associated carbon. **Soil Science Society of America Journal**, v.64, n.2, p.681-689, 2000.

SOANE, B. D. The role of organic matter in soil compactability: a review of some practical aspects. **Soil and Tillage Research**, v.16, n.1-2, p.179-201, 1990.

SOUZA, G. S.; SOUZA, Z. M.; COOPER, M.; TORMENA, C. A. Controlled traffic and soil physical quality of an Oxisol under sugarcane cultivation. **Scientia Agricola**, v.72, n.3, p.270-277, 2015.

SOUZA, G. S.; SOUZA, Z. M.; SILVA, R. B.; BARBOSA, R. S.; ARAÚJO, F. S. Effects of traffic control in the soil physical quality and the cultivation of sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, n.1, p.135-146, 2014.

SOUZA, Z. M.; PRADO, R. M.; PAIXÃO, A. C. S.; CESARIN, L. G. Sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.40, n.3, p.271-278, 2005.

SOUZA JUNIOR, J. G. A.; CHERUBIN, M. R.; CERRI, C. E. P.; CERRI, C. C.; FEIG, B. J.

Sugar cane straw left in the field during harvest: decomposition dynamics and composition changes. **Soil Research**, v.55, n.6, p.758-768, 2017.

SORDI, R. A.; MANECHINI, C. Utilization of trash: a view from the agronomic and industrial perspective. **Scientia Agricola**, v.70, n.5, p.1-2, 2013.

STAVI, I.; BEL, G.; ZAADY, E. Soil functions and ecosystem services in conventional, conservation, and integrated agricultural systems: a review. **Agronomy for Sustainable Development**, v.36, n.1, p.1-12, 2016.

STOLF, R.; MURAKAMI, J. H.; BRUGNARO, C.; SILVA, L. G.; SILVA, L. C. F.; MARGARIDO, L. A. C. Penetrômetro de impacto stolf - Programa computacional de dados em excel-VBA. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, n.1, p.774-782, 2014.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to Soil Taxonomy**. Washington: United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, 12 Ed. p. 372, 2014.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solos**. 3ª edição Revista e Ampliada, Brasília: Embrapa, p.573, 2017.

TORMENA, C. A.; KARLEN, D. L.; LOGSDON, S.; CHERUBIN, M. R. Corn stover harvestand tillage impacts on near-surface soil physical quality. **Soil and Tillage Research**, v.166, n.2, p.122-130, 2017.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, n.4, p.573-581, 1998.

TORMENA, C. A.; ARAUJO, M. A.; FIDALSKI, J.; COSTA, J. M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico sob sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, n.2, p.211-219, 2007.

TILMAN, D.; SOCOLOW, R.; FOLEY, J. A.; HILL, J.; LARSON, E.; LYND, L.; PACALA, S.; REILLY, J.; SEARCHINGER, T.; SOMERVILLE, C.; WILLIAMS, R. Beneficial biofuels - the food, energy, and environment trilemma. **Science**, v.80, n.325, p.270-271, 2009.

VARANDA, L. L.; CHERUBIN, M. R.; CERRI, C. E. P. Decomposition dynamics altered by straw removal management in the sugarcane-expansion regions in Brazil. **Soil Research**, v.57, n.1, p.41-52, 2018.

VAN GENUCHTEN, M. T. A. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.44, n.1, p.892-898, 1980.

VITTI, A. C.; FRANCO, H. C. J.; TRIVELIN, P. C. O.; FERREIRA, D. A.; OTTO, R.; FORTES, C. Nitrogênio proveniente da adubação nitrogenada e de resíduos culturais na nutrição da cana-planta. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, n.3, p.287-293, 2011.

VISCHI FILHO, O. J. V.; SOUZA, Z. M.; SILVA, R. B.; LIMA, C. C.; PEREIRA, D. M. G.; LIMA, M. E.; SOUSA, A. C. M.; SOUZA, G. S. Capacidade de suporte de carga de Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar e efeitos da mecanização no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.50, n.4, p.322-332, 2015.

YAMAGUCHI, C. S.; RAMOS, N. P.; CARVALHO, C. S.; PIRES, A. M. M.; ANDRADE, C. A. Sugarcane straw decomposition and carbon balance as a function of initial biomass and vinasse addition to soil surface. **Bragantia**, v.75, n.1, p.135-144, 2017.

ZHAI, Q.; RAHARDJO, H.; SATYANAGA, A. Effects of residual suction and residual water content on the estimation of permeability function. **Geoderma**, v.303, n.4, p.165-177, 2017.

ZORNOZA, R.; ACOSTA, J. A.; BASTIDA, F.; DOMÍNGUEZ, S. G.; TOLEDO, D. M.; FAZ, A. Identification of sensitive indicators to assess the interrelationship between soil quality, management practices and human health. **Soil**, v.1, n.1, p.173-185, 2015.

WU, L.; FENG, G.; LETEY, J.; FERGUSON, L.; MITCHELL, J.; McCULLOUGH-SANDEN, B.; MARKEGARD, G. Soilmanagement effects on the nonlimiting water range. **Geoderma**, v.114, n.3-4, p.401-414, 2003.