UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS

SISTEMAS DE MANEJO DO SOLO E NÍVEIS DE PALHIÇO: DECOMPOSIÇÃO E LIBERAÇÃO DE NUTRIENTES, QUALIDADE BIOLÓGICA DO SOLO, NUTRIÇÃO E PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR

MICHELE DA SILVA GOMES

DOURADOS

MATO GROSSO DO SUL

2022

SISTEMAS DE MANEJO DO SOLO E NÍVEIS DE PALHIÇO: DECOMPOSIÇÃO E LIBERAÇÃO DE NUTRIENTES, QUALIDADE BIOLÓGICA DO SOLO, NUTRIÇÃO E PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR

Me. MICHELE DA SILVA GOMES
Tecnóloga em Agroecologia

Orientador: PROF. DR. MUNIR MAUAD
Coorientador: DR. CESAR JOSÉ DA SILVA

Tese apresentada à Universidade Federal da Grande Dourados, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Produção Vegetal, para obtenção do título de Doutora.

Dourados
Mato Grosso do Sul
2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

G633s Gomes, Michele Da Silva
SISTEMAS DE MANEJO DO SOLO E NÍVEIS DE PALHIÇO: DECOMPOSIÇÃO E LIBERAÇÃO DE NUTRIENTES, QUALIDADE BIOLÓGICA DO SOLO, NUTRIÇÃO E PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR [recurso eletrônico] / Michele Da Silva Gomes. -- 2022.
Arquivo em formato pdf.

Orientador: Munir Mauad .
Coorientador: Cesar José da Silva.
Tese (Doutorado em Agronomia)-Universidade Federal da Grande Dourados, 2022.
Disponível no Repositório Institucional da UFGD em:
https://portal.ufgd.edu.br/setor/biblioteca/repositorio

1. lignina. 2. litter bag. 3. escarificação. I. Mauad, Munir. II. Silva, Cesar José Da. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.

SISTEMAS DE MANEJO DO SOLO E NÍVEIS DE PALHIÇO: DECOMPOSIÇÃO E LIBERAÇÃO DE NUTRIENTES, QUALIDADE BIOLÓGICA DO SOLO, NUTRIÇÃO E PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR

Por

Michele da Silva Gomes

Tese apresentada como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de DOUTORA EM AGRONOMIA

Aprovada em: 29/04/2022

Prof. Dr. Munir Mauad
Orientador - UFGD/FCA

Dr. Cesar José da Silva
Coorientador - EMBRAPA

Profª. Dr.ª Elisângela Dupas
UFGD/FCA

Prof. Dr. Paulo Vinicius da Silva
UFGD/FCA

Prof. Dr. Salvio Napoleão Soares Arcoverde
UFGD/FCA

DEDICATÓRIA

Dedico aos meu pais Eliete Nogueira da Silva Gomes e Valdecir Pedro Gomes, e minha irmã Simone da Silva Gomes que sempre me incentivaram e apoiaram em toda carreira acadêmica, minha eterna gratidão. Em especial a meu noivo Marcelo Augusto de Souza Costa, que sempre esteve ao meu lado em todos momentos, incentivando e sonhando juntos em alcançar este objetivo. Amo vocês.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por tantas realizações.

Ao meu orientador Professor Dr. Munir Mauad, pela confiança, apoio e orientação durante esta jornada.

Ao programa de Pós-Graduação em Agronomia da UFGD, pela oportunidade.

Agradeço ao meu coorientador e pesquisador da Embrapa Agropecuária Oeste Dr. Cesar José da Silva pela oportunidade e suporte no desenvolvimento de todo o projeto.

À toda equipe da usina São Fernando que concederam a área do experimento.

Aos colaboradores da Embrapa Agropecuária Oeste por todo auxílio nas coletas e análises.

À CAPES, pela bolsa concedida.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Agronomia da UFGD, pelos ensinamentos transmitidos.

Ao professor Rafael Henrique T. B. Goes pela disponibilidade e colaboração de análises em seu laboratório.

A todos os familiares, e todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

PÁGINA

RESUMO xv
ABSTRACT xvi
1. INTRODUÇÃO 1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 2
2.1 Cana-de-açúcar e panorama econômico nacional 2
2.2 Efeito da escarificação no solo 4
2.3 Fatores que influenciam na decomposição do palhiço 6
2.4 Mineralização e ciclagem de nutrientes do palhiço de cana-de-açúcar 9
2.5 Bioindicadores de qualidade do solo 12
3. MATERIAL E MÉTODOS 15
3.1 Local, clima e solo 15
3.2 Delineamento experimental 16
3.3 Histórico e condução da área 17
3.4 Determinação dos níveis de palhiço 19
3.5 Decomposição de palhiço e liberação de nutrientes 21
3.6 Análises de compostos bioquímicos 23
3.7 Bioindicadores da qualidade do solo 25
3.8 Diagnose foliar e produtividade da cana-de-açúcar 28
3.9 Análise estatística 28
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES 28
4.1 Bioindicadores de qualidade do solo 28
4.2 Decomposição do palhiço de cana-de-açúcar 43
4.3. Decomposição de componentes bioquímicos do palhiço 79
4.4 Nutrição e produtividade da cana-de-açúcar 84
5. CONCLUSÕES 97
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 97
APÊNDICE I 116
APÊNDICE 2 117

LISTA DE QUADROS

PÁGINA

QUADRO 1. Atributos químicos do solo na camada de 0-10 e 10-20cm antes do plantio da cultura 15

QUADRO 2. Atributos químicos do solo na camada de 0-10 e 10-20 cm ao fim da safra 2018/19 18

QUADRO 3. Palhiço total, palhiço remanescente (RE) e palhiço residual (RS) da cana-de-açúcar, em função do sistema de plantio, níveis de palhiço e manejo com escarificação. Dourados, MS/Brasil 20

QUADRO 4. Valores médios de carbono da biomassa microbiana (C-BMS), respiração basal (C-CO_2), quociente metabólico (qCO_2), quociente microbiano (qMIC) e matéria orgânica do solo (MOS), em sistemas de preparo e níveis de palhiço no solo em outubro de 2015 29

QUADRO 5. Valores médios de carbono da biomassa microbiana (C-BMS), respiração basal (C-CO_2), quociente metabólico (qCO_2), quociente microbiano (qMIC) e matéria orgânica (MOS), em sistemas de preparo e níveis de palhiço no solo 30

QUADRO 6. Carbono da biomassa microbiana (C-BMS) em plantio direto e preparo convencional, em níveis de palhiço remanescente no solo, em outubro/2015 e julho/2019 32

QUADRO 7. Quociente microbiano (qMIC) em plantio direto e preparo convencional e níveis de palhiço remanescente no solo, em outubro de 2015 33

QUADRO 8. Densidade e riqueza de organismos da fauna edáfica em plantio direto e preparo convencional de cana-de-açúcar, e em função dos níveis de palhiço remanescente na primeira avaliação da safra, nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm 34

QUADRO 9. Riqueza de organismos da fauna edáfica em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC) de cana-de-açúcar, em função dos níveis de palhiço remanescente em diferentes épocas de coleta, e nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm 37

QUADRO 10. Densidade de organismos da fauna edáfica em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC) de cana-de-açúcar, e em função dos níveis de

palhiço remanescente em diferentes épocas de coleta, e nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm 38
QUADRO 11. Frequência relativa de organismos, diversidade de Shannon e equitabilidade de Pielou da macrofauna edáfica em função do plantio direto (PD) e preparo convencional (PC) em níveis de palhiço remanescente no solo, nas profundidades de 0-10 cm e10-20 cm em quatro épocas de avaliação.... 40
QUADRO 12. Teor de carbono (C), nitrogênio (N) e relação carbono/nitrogênio (C/N) do palhiço de cana-de-açúcar ao longo de um ano de decomposição em função de níveis de palhiço remanescente, uso de escarificação em plantio direto e preparo convencional na safra 2014/15 50
QUADRO 13. Teor de carbono (C), nitrogênio (N) e relação carbono/nitrogênio (C/N) da palha de cana-de-açúcar ao longo de um ano de decomposição em função de níveis de palhiço remanescente, uso de escarificação em plantio direto e preparo convencional no início da safra 2015/16 52
QUADRO 14. Teor de carbono (C), nitrogênio (N) e relação carbono/nitrogênio (C/N) da palha de cana-de-açúcar função de níveis de palhiço remanescente, uso de escarificação em plantio direto e preparo convencional no fim da safra 2015/16 53
QUADRO 15. Teor de carbono (C), nitrogênio (N) e relação carbono/nitrogênio (C/N) da palha de cana-de-açúcar ao longo de um ano de decomposição em função de níveis de palhiço remanescente, uso de escarificação em plantio direto e preparo convencional na safra 2016/17 54
QUADRO 16. Teor de carbono (C), nitrogênio (N) e relação carbono/nitrogênio (C/N) da palha de cana-de-açúcar função de níveis de palhiço remanescente, uso de escarificação em plantio direto e preparo convencional na safra 2016/17 55
QUADRO 17. Teor de carbono (C), nitrogênio (N) e relação carbono/nitrogênio (C/N) da palha de cana-de-açúcar ao longo de um ano de decomposição sob níveis de palhiço remanescente, uso de escarificação em plantio direto e preparo convencional na safra 2017/18..... 57
QUADRO 18. Teor de carbono (C), nitrogênio (N) e relação carbono/nitrogênio (C/N) da palha de cana-de-açúcar função de níveis de palhiço remanescente, uso de escarificação em plantio direto e preparo convencional na safra 2017/18 58

QUADRO 19. Relação C/N da palha de cana-de-açúcar ao longo de um ano de decomposição sob taxas de remoção e escarificação em plantio direto e preparo convencional, safra 2018/19 65
QUADRO 20. Teores de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) de cana-de-açúcar em plantio direto e preparo convencional, em função dos níveis de palhiço remanescente e manejo com e sem escarificação, na safra 2014/15 85
QUADRO 21. Teores de nitrogênio (N), potássio (K) e cálcio (Ca) de cana-de-açúcar com e sem escarificação, em plantio direto e preparo convencional em função dos níveis de palhiço remanescente, na safra 2014/15..... 86
QUADRO 22. Teores de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) de cana-de-açúcar em plantio direto e preparo convencional, em função dos níveis de palhiço remanescente e manejo com e sem escarificação, na safra 2015/16 87
QUADRO 23. Teores de nitrogênio (N) e enxofre (S) de cana-de-açúcar em plantio direto e preparo convencional, em função dos níveis de palhiço remanescente, na safra 2015/16..... 88
QUADRO 24. Teores de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) de cana-de-açúcar em plantio direto e preparo convencional, em função dos níveis de palhiço remanescente e manejo com e sem escarificação, na safra 2016/17 89
QUADRO 25. Teores de cálcio (Ca) de cana-de-açúcar em plantio direto e preparo convencional em função dos níveis de palhiço remanescente, na safra 2016/17 90
QUADRO 26. Teores de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) de palhiço de cana-de-açúcar em plantio direto e preparo convencional, em função dos níveis de palhiço remanescente e manejo com e sem escarificação, na safra 2017/18..... 91
QUADRO 27. Teores de potássio (K) de cana-de-açúcar com (CE) e sem (SE) escarificação em função dos níveis de palhiço remanescente, na safra 2017/18 92

QUADRO 28. Teores de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) de palhiço de cana-de-açúcar em plantio direto e preparo convencional, em função dos níveis de palhiço remanescente e manejo com escarificação, na safra 2018/19 92
QUADRO 29. Teores de potássio (K) e cálcio (Ca) de cana-de-açúcar com escarificação em função dos níveis de palhiço remanescente, na safra 2018/19 93
QUADRO 30. Tonelada de colmos por hectare (TCH) e tonelada de açúcar por hectare (TAH) acumulados de 2014-19, em cultivo de cana-de-açúcar em plantio direto e preparo convencional, em função dos níveis de palhiço remanescente e manejo com e sem escarificação 94
QUADRO 31. Tonelada de colmos por hectare (TCH) e tonelada de açúcar por hectare (TAH) acumulados de 2014-19, em cultivo de cana-de-açúcar em plantio direto e preparo convencional, em função dos níveis de palhiço remanescente e manejo com escarificação 96

LISTA DE FIGURAS

PÁGINA

FIGURA 1. Precipitação pluviométrica, temperatura máxima e mínima dos anos que compreenderam o experimento (2015-2019). Fonte: CEMTEC, estação meteorológica Centro, Dourados/MS. 16

FIGURA 2. Croqui representando a disposição dos tratamentos na área experimental, Dourados - MS. SE: sem escarificação, CE: com escarificação, %: níveis remanescentes de palhiço. Fonte: Elaborado pelo autor. 16

FIGURA 3. Cronologia da condução do experimento. PD: plantio direto, PC: preparo convencional, C-BMS: carbono da biomassa microbiana do solo. Fonte: Elaborado pelo autor. 21

FIGURA 4. Esquema dos tratamentos, sistemas de plantio e o posicionamento dos litter bags em cada parcela experimental. SE: sem escarificação, CE: com escarificação, %: níveis remanescentes de palhiço. Fonte: Elaborado pelo autor. 22

FIGURA 5. Cronologia de coleta de litter bags (dias) e épocas de avaliação de celulose, hemicelulose e lignina. 22

FIGURA 6. Decomposição de palhiço da cana-de-açúcar, em função do sistema de plantio, níveis de palhiço e manejo com e sem escarificação, nas safras de 2014/15 (A), 2015/16 (B) e 2016/17 (C), 2017/18 (D) e 2019/19 (E) Dourados, MS/Brasil. PD: plantio direto, PC: preparo convencional, SE: sem escarificação, CE: com escarificação. 44

FIGURA 7. Massa seca de palhiço de cana-de-açúcar em plantio direto (A) e preparo convencional (B), respectivamente, em função do tempo de decomposição e níveis de palhiço remanescente e manejo com escarificação. 50% com escarificação (◆), 50% sem escarificação (■), 100% com escarificação (▲) e 100% sem escarificação (●). * e ** Significativo a 5% e 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente. 46

FIGURA 8. Liberação de massa seca de palhiço de cana-de-açúcar em plantio direto (A) e preparo convencional (B), respectivamente, em função do tempo de decomposição, níveis de palhiço remanescente e manejo com (CE) e sem escarificação (SE). 48

FIGURA 9. Teor de carbono (C) de palhiço de cana-de-açúcar em sistema de plantio direto (A) e convencional (B), em função do tempo de decomposição e níveis de palhiço remanescente e manejo com escarificação, na safra 2018/19.50% com escarificação (◆), 50% sem escarificação (■), 100% com escarificação (▲) e 100% sem escarificação (●). * e ** Significativo a 5% e 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente. 59

FIGURA 10. Teor de nitrogênio (N) de palhiço de cana-de-açúcar em sistema de plantio direto (A) e convencional (B), em função do tempo de decomposição e níveis de palhiço remanescente e manejo com escarificação, na safra 2018/19.50% com escarificação (◆), 50% sem escarificação (■), 100% com escarificação (▲) e 100% sem escarificação (●). * e ** Significativo a 5% e 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente. 61

FIGURA 11. Liberação de nitrogênio (N) de palhiço de cana-de-açúcar em plantio direto (A) e preparo convencional (B), respectivamente, em função do tempo de decomposição, níveis de palhiço remanescente e manejo com (CE) e sem escarificação (SE), na safra 2018/19. 62

FIGURA 12. Liberação de carbono (C) de palhiço de cana-de-açúcar em plantio direto (A) e preparo convencional (B), respectivamente, em função do tempo de decomposição, níveis de palhiço remanescente e manejo com (CE) e sem escarificação (SE), na safra 2018/19. 64

FIGURA 13. Teores de fósforo (P) de palhiço de cana-de-açúcar em plantio direto (A) e preparo convencional (B), em função do tempo de decomposição e níveis de palhiço remanescente e manejo com escarificação. 50% com escarificação (◆), 50% sem escarificação (■), 100% com escarificação (▲) e 100% sem escarificação (●). ** Significativo a 5% e 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente. 67

FIGURA 14. Teores de potássio (K) de palhiço de cana-de-açúcar em plantio direto (A) e preparo convencional (B), em função do tempo de decomposição e níveis de palhiço remanescente e manejo com escarificação. 50% com escarificação (◆), 50% sem escarificação (■), 100% com escarificação (▲) e 100% sem escarificação (●). ** Significativo a 5% e 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente. 68

FIGURA 15. Teores de cálcio (Ca) de palhiço de cana-de-açúcar em plantio direto (A) e preparo convencional (B), em função do tempo de decomposição e níveis de palhiço remanescente e manejo com escarificação.50% com escarificação (◆), 50% sem escarificação (■), 100% com escarificação (▲) e 100% sem escarificação (●). * Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F, respectivamente..... 70
FIGURA 16. Teores de magnésio (Mg) de palhiço de cana-de-açúcar em plantio direto (A) e preparo convencional (B), em função do tempo de decomposição e níveis de palhiço remanescente e manejo com escarificação.50% com escarificação (◆), 50% sem escarificação (■), 100% com escarificação (▲) e 100% sem escarificação (●). * Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F, respectivamente..... 71
FIGURA 17. Teores de enxofre (S) de palhiço de cana-de-açúcar em plantio direto (A) e preparo convencional (B), em função do tempo de decomposição e níveis de palhiço remanescente e manejo com escarificação.50% com escarificação (◆), 50% sem escarificação (■), 100% com escarificação (▲) e 100% sem escarificação (●). * Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F, respectivamente..... 72
FIGURA 18. Liberação de fósforo (P) de palhiço de cana-de-açúcar em plantio direto (A) e preparo convencional (B), em função do tempo de decomposição, níveis de palhiço remanescente e manejo com (CE) e sem escarificação (SE)..... 73
FIGURA 19. Liberação de potássio (K) de palhiço de cana-de-açúcar em plantio direto (A) e preparo convencional (B), em função do tempo de decomposição, níveis de palhiço remanescente e manejo com (CE) e sem escarificação (SE)..... 75
FIGURA 20. Liberação de cálcio (Ca) de palhiço de cana-de-açúcar em plantio direto (A) e preparo convencional (B), em função do tempo de decomposição, níveis de palhiço remanescente e manejo com (CE) e sem escarificação (SE)..... 76
FIGURA 21. Liberação de magnésio (Mg) de palhiço de cana-de-açúcar em plantio direto (A) e preparo convencional (B), em função do tempo de decomposição, níveis de palhiço remanescente e manejo com (CE) e sem escarificação (SE). 77

FIGURA 22. Liberação de enxofre (S) de palhiço de cana-de-açúcar em plantio direto (A) e preparo convencional (B), em função do tempo de decomposição, níveis de palhiço remanescente e manejo com (CE) e sem escarificação (SE)..... 79

FIGURA 23. Concentração de celulose de palhiço de cana-de-açúcar em plantio direto (A) e preparo convencional (B) em função do tempo de decomposição, níveis de palhiço remanescente e manejo com escarificação. 50% com escarificação (◆), 50% sem escarificação (■), 100% com escarificação (▲) e 100% sem escarificação (●). * e ** Significativo a 5% e 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente. 80

FIGURA 24. Concentração de hemicelulose de palhiço de cana-de-açúcar em plantio direto (A) preparo convencional (B) em função do tempo de decomposição, níveis de palhiço remanescente e manejo com escarificação. 50% com escarificação (◆), 50% sem escarificação (■), 100% com escarificação (▲) e 100% sem escarificação (●). ** Significativo 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente. 82

FIGURA 25. Concentração de lignina de palhiço de cana-de-açúcar em plantio direto (A) e preparo convencional (B) em função do tempo de decomposição, níveis de palhiço remanescente e manejo com escarificação. 50% com escarificação (◆), 50% sem escarificação (■), 100% com escarificação (▲) e 100% sem escarificação (●). ** Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente..... 83

RESUMO

Com a adoção de cultivos conservacionistas de cana-de-açúcar a preocupação com práticas de manejo de solo e o uso da colheita mecanizada, a manutenção de palhiço no solo se tornou uma preocupação. A quantidade mínima de palhiço a permanecer no campo ainda é bastante discutida, devido os efeitos que essa retirada pode ocasionar no solo, principalmente quanto aos processos de decomposição e liberação de nutrientes, sem comprometer a produtividade da cultura. Assim objetivou-se com este estudo foi avaliar a dinâmica de decomposição do palhiço de cana-de-açúcar e sua influência na liberação de nutrientes, qualidade biológica do solo e produtividade da cana-de-açúcar, em dois sistemas de manejo do solo. Este estudo foi desenvolvido em área experimental da Embrapa Agropecuária Oeste em parceria com a Usina São Fernando no município de Dourados-MS, em um Latossolo Vermelho Distroférrico, textura muito argilosa. O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com quatro repetições, em esquema de parcelas sub-subdivididas. As parcelas foram compostas pelo plantio direto e preparo convencional, as subparcelas por níveis de palhiço remanescente: 0, 50 e 100%, e as sub-subparcelas por escarificação mecânica (com e sem escarificação nas entrelinhas). Foram instalados bolsas de decomposição contendo quantidades pré-definidas de palhiço, conhecidas como *litter bags*, nas parcelas com 50 e 100% de manutenção para avaliar os teores e liberação de massa e macroutrientes ao longo de uma safra, totalizando 11 coletas na última safra. Assim como o acompanhamento da relação C/N, celulose, hemicelulose e lignina do palhiço em 6 coletas durante a safra 2018/19. As avaliações da biomassa microbiana e fauna edáfica foram realizadas em 4 épocas distintas. A manutenção de 100% de palhiço em campo beneficiou melhores valores de carbono da biomassa microbiana (C-BMS), maior abundância de organismos da macrofauna, degradação de celulose e hemicelulose, maior decomposição de palhiço e liberação de nutrientes. A produtividade de colmos (TCH) e de açúcar (TAH) também foram superiores na área com 100% de palhiço sem escarificação em plantio direto, indicando que o preparo convencional e escarificação não são necessários em condições edafoclimáticas semelhantes.

Palavras-chave: lignina, *litter bag*, escarificação.

ABSTRACT

With the adoption of conservationist sugarcane crops with mechanized cultivation practices and the use of mechanized harvesting, the maintenance of soil cultivation no longer becomes palpable. The amount of pallor still remains in the field is still considerable occasionally, due to the effects that the removal or not soil, mainly regarding the processes of decomposition and nutrient release, without minimal crop profitability. Therefore, this study was carried out in the experimental area of Embrapa Agropecuária Oeste in partnership with Usina São Fernando in the municipality of Dourados-MS, in a Distroferric Red Latosol, with a very clayey texture. The experimental design was randomized, with four series, in a split-plot scheme. As plots, they were composed by no-tillage and conventional tillage, as subplots by remaining levels of straw: 0, 50 and 100%, and as subplots by mechanical scarification (with and without scarification between the rows). Harvest bags were installed containing pre-defined packages of a crop, known as garbage, in the crops evaluated with 50 and 100% maintenance for the contents and plots of mass and macronutrients harvest at the harvest of a harvest, totaling 11 last collections. As well as the monitoring of the C/N, cellulose, hemicellulose and lignin ratio of the straw in 6 collections during the 2018/19 harvest. The estimates of microbial biomass and edaphic fauna were carried out at 4 different times. The maintenance of 100% straw for the benefit of the biomass field (CBMS), greater abundance of macrofauna organisms, degradation of cellulose and hemicellulose, greater decomposition of straw and release of nutrients. The productivity of sugar (TCH) and sugar (TAH) were also in the planting area with 100% straw without chiseling, indicating that conventional tillage and chiseling are not superior under similar direct soil and climate conditions.

Keywords: lignin, litter bag, scarification

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas altamente mecanizados adotados pelos produtores de cana-de-açúcar, tem promovido agilidade e eficiência nos tratos culturais e colheita, no entanto a preocupação com a compactação do solo tem ganhado destaque. Um solo compactado pode reduzir de forma expressiva a produtividade e longevidade de um canavial, acarretando em maiores custos na correção do solo e novo plantio antecipado.

Assim a adoção de práticas com menor impacto no solo podem amenizar os problemas de compactação que se tornam inevitáveis com o passar das safras agrícolas. Entre os mais utilizados está o plantio direto e preparo reduzido, que tem ganhado mais visibilidade entre os produtores, na busca de sistemas mais conservacionistas. Mesmo em um plantio direto em que a premissa é o não revolvimento de solo, o uso da escarificação é permitido pois é considerado um preparo mínimo, em casos que seja constatada a compactação esta operação pode romper a camada superficial na linha da soqueira e reduzir a densidade e resistência a penetração do solo.

A melhoria da qualidade física e química do solo em área de cultivo de cana-de-açúcar é de grande relevância para os produtores, mas um solo saudável também deve ter boa atividade e diversidade biológica, que muitas vezes é prejudicada em sistemas de monocultivo intensivo. Contudo a adoção de práticas conservacionistas nos canaviais pode ajudar a minimizar esta problemática. Visto que os organismos do solo são responsáveis por diversas funções ecológicas, desde a mineralização e disponibilização de nutrientes para a cultura, com influência até na porosidade do solo.

Uma das atuais preocupações entre os produtores é a destinação adequada da grande quantidade de palhiço que permanece em campo após a colheita mecanizada. Há alguns anos a indústria tem reaproveitado estes resíduos na produção de bioenergia e etanol de segunda geração, mas até que ponto esta exportação é vantajosa, sem que haja prejuízos para a cultura, ainda é um questionamento.

Os benefícios de manter o palhiço no campo abrangem diversos fatores, como a ciclagem de nutrientes, melhoria das condições de temperatura e umidade do solo, que por sua vez refletem na melhoria da atividade microbiana, entradas constantes de carbono no solo, garantindo melhoria na matéria orgânica, entre outros. Além da proteção contra erosão e o impacto causado pelos maquinários nas entrelinhas da cultura.

Mas a quantidade ideal de palhiço a se manter em campo ainda é muito discutida, pois depende de diversos fatores, tanto de características vegetais, como edafoclimáticas, que pode variar em cada região cultivada. Esses fatores definem a velocidade de decomposição deste palhiço no solo, e a quantidade de manutenção pode definir esse tempo. A rápida decomposição pode liberar nutrientes no solo para reciclagem pelo canavial, mas por outro lado o maior tempo de permanência deste palhiço em campo pode ajudar a manter as qualidades físicas pela camada protetora formada no solo.

Poucos estudos conseguem integrar os diversos fatores que influenciam sobre a dinâmica de decomposição do palhiço, principalmente com um acompanhamento a longo prazo, para que haja uma gestão adequada deste resíduo. No estado do Mato Grosso do Sul não há nenhum estudo com essa premissa, que integre avaliações da qualidade biológica do solo e estudo detalhado da complexa dinâmica de decomposição e liberação de nutrientes, com diferentes práticas de manejo de solo na produtividade da cana-de-açúcar. Assim a hipótese é que altas remoções de palhiço pode alterar a decomposição e atividade biológica do solo, interferindo na produtividade final da cultura.

Diante do exposto objetivou-se com este estudo foi avaliar a dinâmica de decomposição do palhiço de cana-de-açúcar e sua influência na liberação de nutrientes, qualidade biológica do solo e produtividade da cana-de-açúcar, em dois sistemas de manejo do solo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cana-de-açúcar e panorama econômico nacional

O setor sucroalcooleiro no Brasil tem papel importante no agronegócio, com destaque para o etanol, o açúcar e a bioenergia. A cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum* sp. L.) é uma das melhores opções para produção de combustíveis provenientes de fontes renováveis (OLIVEIRA et al., 2016) e devido a grande quantidade de áreas cultiváveis e condições edafoclimáticas favoráveis, tornaram o país o maior produtor mundial (CONAB, 2022).

A busca por sistemas de produção mais conservacionista tem promovido pesquisas a fim de reduzir os impactos no meio ambiente, e o interesse no uso da biomassa da cana-de-açúcar vem ganhando destaque no mercado mundial, como alternativa para reduzir o uso de combustíveis fósseis (VIANA, 2011; SOUTO et al., 2018).

A produção e uso de biocombustíveis tem sido uma ótima alternativa para alcançar práticas com baixo carbono (VAILLANCOURT et al., 2019), e com a ampliação do uso de veículos com tecnologia *flex-fuel*, que possibilitou o abastecimento com etanol, tornou a prática extremamente vantajosa e economicamente favorável para o setor sucroalcooleiro, levando o país a ser referência mundial no mercado agroenergético (CAMARGO et al., 2019).

A posição que o Brasil ocupa de maior produtor mundial de cana-de-açúcar é amplamente conhecida, o Centro-Oeste é a segunda maior região produtora do país, ficando atrás apenas do Sudeste. Na safra de 2020/21 alcançou área plantada de 1.823,3 mil ha, com produtividade de 76.676 kg ha^{-1}, 4.651,0 mil t de açúcar e 8,7 milhões de litros de etanol. O estado do Mato Grosso do Sul (MS) é o segundo maior produtor da região, nos parâmetros de área plantada, produtividade, produção de açúcar e etanol (CONAB, 2021).

A produção de cana-de-açúcar em Mato Grosso do Sul nos últimos teve um pico de produtividade na safra 2016/17 com 50.292.003 t, uma pequena redução e estabilização de toneladas produzidas até a safra atual, que atingiu 48.803.899 t. O açúcar na safra atual teve a maior produção da história, chegou a 1.847.534 t, e a maior produção de etanol foi observada na safra 2018/19 com 3.342.389 m^3 (BIOSUL, 2021).

Segundo dados da Biosul (2021) no estado do MS há 18 usinas em funcionamento, todas produzem etanol, 10 produzem açúcar e todas geram energia, mas somente 13 delas comercializam essa energia para a rede nacional. Somente a partir de 2010 que o estado passou a comercializar bioeletricidade no país, anteriormente era produzido apenas para consumo interno da indústria.

Atualmente os preços de etanol e açúcar são atrativos para o setor sucroenergético, por isso mesmo com as quedas de produção o setor não sofreu tanto com as oscilações do mercado (CEPEA-USP, 2022). A rentabilidade também foi grande para os cultivos anuais, como a soja e milho, por consequência houve concorrência pelas áreas de cultivo no país. Assim a área cultivada de cana-de-açúcar tem estimativa de 8.264,4 mil hectares cultivados, 4,1% inferior a safra 2020/21, assim como para a produtividade também está prevista queda, com estimativa de 68,780 kg ha^{-1} para a safra 2021/22 (CONAB, 2021).

Na safra de 2021/22 houve maior valorização do açúcar nacional, devido a algumas problemáticas envolvendo a produtividade do setor, reduzindo assim a estimativa de exportação. A safra 2020/21 o país exportou 32,2 milhões de toneladas,

59% superior a safra de 2019/20. Com relação ao etanol exportado, a tendência foi a mesma, uma estimativa de queda na safra atual, entretanto na safra 2020/21 o país exportou 2,95 milhões de litros, 64,8% superior ao ano anterior (CONAB, 2021).

A necessidade de importação de etanol teve grande queda de 2019 até o momento; na safra 2020/21 o Brasil importou apenas 582 milhões de toneladas, 287% a menos que a safra anterior, resultante do valor elevado do dólar, e as taxas provenientes do Estados Unidos (CONAB, 2021).

2.2 Efeito da escarificação no solo

Com o estabelecimento da colheita totalmente mecanizada da cana-de-açúcar no Brasil, a queima dos canaviais foi eliminada quase por completo, no estado do Mato Grosso do Sul após o disposto no Artigo 3°, da Lei Estadual n° 3.404, de 30 de julho de 2007, houve a adoção da colheita mecanizada de cana crua (PAREDES JUNIOR et al., 2015).

A colheita mecanizada trouxe benefícios ambientais para os canaviais brasileiros, contudo vem agravando problemas com risco de compactação do solo, que prejudica o desenvolvimento radicular da cultura. Esta compactação é denominada como a redução do volume de massa do solo, provocando assim mudanças na densidade, rearranjamento de partículas que influencia na redução da porosidade, afetando assim sua estrutura (FU et al., 2019; BERTOLLO e LEVIEN, 2019). A degradação da estrutura ocasionado pelo tráfego das colhedoras, transbordos, e em todos os manejos durante o ciclo (adubação, escarificação, tratos culturais, etc), ocorre quando são realizados em solos com umidade inadequada (SOUZA et al., 2015).

Um sistema com preparo convencional as operações são sucessivas e pesadas, incluem gradagem, gradagem niveladora, subsolagem e sulcação para então ser possível o plantio da cana-de-açúcar (BARBIERI et al., 1997). Todas as operações neste cultivo são necessárias para destruir a soqueira do último plantio, romper camadas compactadas e corrigir o solo, a fim de estabelecer condições favoráveis fisicamente para o próximo plantio (PINHEIROS, 2018).

Com o intuito de reduzir o problema com a compactação do solo a adoção de sistemas de plantio direto e preparo mínimo tem sido adotado, reduzindo assim a quantidade de operações em campo, tendo como recurso implementos que não revolvem a camada arável, por isso é considerado como preparo reduzido (PINHEIROS, 2018), que pode trazer benefícios ao sistema como maior estabilidade de agregados, melhoria da

macroporosidade, manutenção de resíduos em cobertura, redução de custos operacionais, etc (KUHWALD et al., 2017).

Em sistemas de preparo mínimo é comum o uso da escarificação do solo, que muitas vezes é usada isoladamente, a fim de romper a camada superficial nas entrelinhas da cana-de-açúcar. Segundo Cortez et al. (2011), o equipamento que realiza a escarificação trabalha com a ação de hastes, sem a inversão da leiva, considerado então menos agressivo mecanicamente ao solo, sendo indicado inclusive em sistemas de plantio direto, para aliviar a densidade do solo e possível compactação nesses sistemas em que não há revolvimento do solo (CAMARA et al., 2005).

A escarificação mecânica no solo é eficiente nesses sistemas, contudo o tempo que esse efeito vai perdurar no solo ainda é muito discutido, principalmente em culturas como a cana-de-açúcar que podem ficar em campo de 5 a 6 safras consecutivas, assim seu uso deve levar em conta a real necessidade para definição do manejo correto. Drescher et al. (2016) avaliaram em um Latossolo argiloso o tempo de reposta (horas e meses) do uso da escarificação, e através do estudo da infiltração de água verificaram uma tendência estável até 24 meses após a operação, e o efeito nos aspectos físicos como densidade, resistência a penetração e porosidade, foram inferiores a uma safra agrícola.

O efeito da escarificação, seja em sistemas de preparo reduzido ou em plantio direto vai depender da eficácia da operação, do tipo de solo e o estado atual do solo em questão, contudo seu efeito tende a ser temporário. Muitas vezes, sendo necessário mais operações para que seja alcançado os resultados esperados, em busca da redução de problemas na estrutura e densidade de sistemas conservacionistas (SKARABOTO et al., 2018).

Em sistemas de cultivo de cana-de-açúcar a escarificação costuma ser realizada na entrelinha da soqueira, pois além dos efeitos na qualidade física do solo é usada para depositar fertilizantes durante os anos consecutivos da cultura até o próximo plantio, que pode ocorrer a cada 5 a 6 anos (GARBIATE et al., 2014; SÁ et al., 2016).

Com o uso da escarificação espera-se melhorar as condições de crescimento e desenvolvimento radicular da cultura devido a melhoria da porosidade do solo (NUNES et al., 2015). Apesar da premissa de melhorar a resistência a penetração de raízes Sá et al. (2016) ao trabalhar com a escarificação nas entrelinhas da soqueira não encontraram influência na massa de raízes da cana-de-açúcar e nos atributos físicos do solo, devido ao efeito localizado deste implemento.

Garbiate et al. (2014) também verificaram efeito restrito ao ponto de passagem da haste com o uso da escarificação nas entrelinhas da soqueira de cana-de-açúcar, mas houve redução da resistência à penetração independente do uso de haste simples ou dupla. Com o escarificador de haste dupla houve maior movimentação do solo, conferindo maior amplitude do efeito, contudo não foi suficiente para provocar influência na densidade e porosidade do solo, assim a operação pode não ser necessária em sistemas com objetivo de menor revolvimento, enquanto o uso de haste simples é suficiente para aliviar a resistência à penetração.

Portanto corrobora com a principal expectativa do uso deste implemento, que é melhorar a qualidade física do solo para um desenvolvimento das culturas, contudo, o efeito que essa operação pode provocar na produtividade da cana-de-açúcar ainda é discutido. Prado et al. (2014) trabalhando em uma área com solo argiloso e observaram melhoria na resistência à penetração de raízes, na densidade e porosidade de camadas superficiais com o uso da escarificação da soqueira da cana-de-açúcar, mas apesar da melhoria física do solo não houve influência na produtividade e características tecnológicas da cultura. Pinheiros et al. (2021) também não observaram diferenças significativas na produtividade de colmos em áreas submetidas à escarificação, mas houve aumento do volume de macroporos no solo e redução da resistência à penetração.

Mesmo diante dos benefícios que possam agregar no sistema de cultivo, também há questões a se considerar além do alívio da compactação, como foi apontado por Tim Chamen et al. (2015), através do mínimo revolvimento que ocorre durante o rompimento da camada superficial, pode acelerar a mineralização da matéria orgânica e aumento da emissão de gases de efeito estufa. Sendo necessário cautela na utilização da escarificacão para resolver problemas de solos compactados, para que não seja realizada uma operação desnecessária em campo, a localização e intensidade de seu uso deve ser estudada.

2.3 Fatores que influenciam na decomposição do palhiço

Com o estabelecimento da colheita mecanizada em grande parte dos canaviais brasileiros, em consonância com a legislação que proíbe a queima da cana, levou a permanência de grande quantidade de palhiço na superfície do solo (MENANDRO et al., 2017; MATEUS et al., 2017). Este palhiço é composto por folhas verdes, secas, ponteiros e pedaços de colmo.

De acordo com Pierossi e Fagundes (2013) um sistema com colheita de cana crua apresenta média de 12 a 15 Mg ha^{-1} de palhiço no campo, que pode variar de acordo

com diversos fatores, como a produtividade de colmos alcançada, a cultivar selecionada, clima, solo, entre outros. Em cultivos onde há fertirrigação ou outras tecnologias adotadas a quantidade de palhiço residual pode ser muito maior (OLIVEIRA e SIMÕES, 2020), assim a quantidade a se manter no solo para o próximo ciclo deve ser definido de acordo com as necessidades e objetivos.

Menandro et al. (2017) avaliaram em sete campos no centro sul do Brasil, o potencial de produção e heterogeneidade do palhiço de cana-de-açúcar, para definição de uma quantidade ideal de manutenção, levando em conta as diferenças de suas composições (umidade, cinzas, nutrientes, celulose, hemicelulose e lignina), concluíram que para suas condições de cultivo o ideal seria que com 14 Mg ha^{-1} de palhiço produzido, manter apenas 40% em campo, os 60% restantes poderiam ser destinados à cogeração de energia.

Além da vantagem da cogeração de energia que o palhiço pode proporcionar, sua presença no campo também trará vantagens na liberação e ciclagem de nutrientes, redução de oscilação térmica no solo, mantendo a umidade e tornando um ambiente altamente favorável para atividade e dinâmica da microbiota do solo (OLIVEIRA e SIMÕES, 2020). Portanto, além do tempo e eficiências de decomposição do palhiço e seus componentes deve-se avaliar o sistema de maneira geral, para definição do nível adequado de manutenção de palhiço e alcançar um agroecossistema eficiente e sustentável (SILVA et al., 2016).

A decomposição de material vegetal é um processo dependente de diversos fatores, com grande influência dos organismos decompositores, contudo depende da composição química do material orgânico (FORTES et al., 2012). Normalmente a relação carbono/nitrogênio (C/N) é associada como indicativo da velocidade que irá ocorrer a mineralização (SOUZA et al., 2020).

A relação C/N para o palhiço de cana-de-açúcar pode variar de 80/1 a 100/1, momento em que o N fica imobilizado, sua liberação só ocorre quando esta relação é abaixo de 20/1 (ROSSETTO et al., 2013). Sendo necessária a aplicação de N externo a fim de promover a mineralização, e quando o N começa a ser liberado não há disponibilidade na mesma velocidade que ocorre decomposição da palha. Segundo Ferreira et al. (2015) apenas 16,2% do teor de N foi reciclado pela cultura da cana-de-açúcar, em três anos de avaliação.

A quantidade de N imobilizado no decorrer da decomposição é expressivo, pois há melhoria na dinâmica microbiana e assim a imobilização de N ocorre até que o solo

tenha matéria orgânica estável (MEIER et al., 2006; TRIVELIN et al.,2013). Portanto a ciclagem de N para a cultura não deve ser considerada a curto prazo, mas mantendo um sistema de manejo com a regular manutenção deste palhiço, haverá entradas constantes de N no solo (DOURADO-NETO et al., 2010).

Além da relação C/N há outros parâmetros que podem ajudar na avaliação de decomposição de resíduos vegetais, como a perda inicial de carboidratos estruturais (celulose e hemicelulose), juntamente com os teores de lignina (KOGEL-KNABER, 2000). Os materiais lignocelulósicos da indústria canavieira são formados principalmente por esses três componentes, que se encontram alinhados por pontes de hidrogênio e ou ligações covalentes, constituindo assim a parede celular da planta (BORGES e GIGIOLLI, 2020).

Essas estruturas da parede vegetal são encarregadas de dificultar a ação de microrganismos, devido suas características individuais de conversão em biocombustíveis ou outros produtos de interesse (SOUZA, 2016). São resistentes a hidrólise enzimática devido a diversos fatores como o teor de umidade, área de superfície e até o teor de lignina no material (WU et al., 2016), o teor de celulose e hemicelulose é decomposto mais facilmente quanto menor for a presença de lignina.

A celulose normalmente é encontrada em maiores proporções em materiais vegetais, cerca de 35-50%, a hemicelulose geralmente tem rápida decomposição e apresenta média de 20-35%, a lignina que tem lenta decomposição representa cerca de 10-25% (DENG e TABATABAI, 1994; SANTOS et al., 2014). Yanni et al. (2011) relataram que a lignina pode ser considerada para prever a mineralização de N, portanto uma ótima indicadora da eficiência e rapidez de decomposição, aliado ao acompanhamento da relação C/N.

As porcentagens desses parâmetros presentes no palhiço podem variar de forma significativa em função das condições de crescimento, variedade, idade de colheita e a parte escolhida da cultura (OGEDA e PETRI, 2010; PARAJULI et al., 2015). A celulose apresenta em média de 29,0 a 50,0 % do material vegetal, a hemicelulose varia de 27,0 a 40,0 e a lignina pode representar de 10,0 a 34,0% do palhiço de cana-de-açúcar (SANTOS et al., 2012; MOUTTA et al., 2014; PIMENTEL et al., 2019). Portanto para qualquer tomada de decisão quanto ao manejo do palhiço esses compostos devem ser caracterizados.

As condições edafoclimáticas têm grande representatividade durante a decomposição de qualquer material vegetal no solo, com a manutenção de palhiço a

superfície fica protegida de altas temperaturas e preserva a umidade local, promovendo um ambiente adequado a atividade microbiana (FREITAS et al., 2004). Pimentel et al., (2019) trabalharam com níveis de remoção de palhiço de cana-de-açúcar (0, 25, 50, 75%), e somente observaram influência na decomposição devido às épocas de chuva e estiagem e tipos de solos, o experimento em solo arenoso propiciou maior taxa de decomposição. Resultados que esses autores correlacionaram com a atividade microbiana das áreas, corroborando sua influência na taxa de decomposição.

Sendo assim, devido à grande complexidade que envolve a decomposição de palhiço, ainda há muitas incertezas quanto à quantidade adequada a se deixar na superfície (VARANDA et al., 2018), que demanda estudos mais abrangentes e únicos para cada local de ação.

2.4 Mineralização e ciclagem de nutrientes do palhiço de cana-de-açúcar

A decomposição do palhiço da cana-de-açúcar depende de diversos fatores, e apresenta períodos longos de persistência no solo principalmente por sua composição, sejam os compostos orgânicos e inorgânicos. De acordo com Varanda et al. (2018) aproximadamente 60% do palhiço é decomposto dentro de 1 ano, ou seja, o restante irá permanecer e continuar sua liberação e reciclagem de nutrientes durante a próxima safra da lavoura.

Uma ciclagem de nutrientes eficiente depende de fatores que envolvem a qualidade do solo, seja pela capacidade de a cultura ter uma alta produtividade, um bom desenvolvimento radicular, absorção adequada de nutrientes, até com relação a capacidade do solo de receber os nutrientes e converter ou manter em formas prontamente disponíveis à cultura (KEESSTRA et al., 2016). Assim, não somente os fatores do solo vão interferir na eficiência da ciclagem, condições edafoclimáticas e de manejo também são determinantes, para que o processo seja considerado sustentável (SHRODER et al., 2016).

O palhiço contém cerca de 60% do nitrogênio (N) contido em toda planta de cana-de-açúcar acima do solo (CHAPMAN et al., 1994). Dentre os nutrientes o N é o mais abundante, contudo sua liberação está diretamente ligada a relação C/N do resíduo vegetal, que por sua vez é responsável pela mineralização do material, podendo ser acelerada com a utilização de N mineral (FIORETTO, 2017). Potrich et al. (2014) ao estudarem a decomposição de palhiço de cana-de-açúcar em função da aplicação de doses

de nitrogênio, verificaram um aumento na taxa de decomposição, de acordo com o aumento das doses de adubos nitrogenados aplicadas.

Devido à necessidade de aplicação de fertilizante nitrogenado para ajudar na mineralização do N contido na palha, segundo Otto et al. (2016) grande parte dos agricultores tem aumentado a aplicação de 1 para 1,2 kg de N por tonelada de colmos colhido, principalmente devido à preocupação com a imobilização decorrente do acúmulo de palha na superfície do solo (GONZAGA et al., 2018). Otto et al. (2016) ainda afirmam que 75% dos canaviais que realizam a colheita de cana crua respondem de forma moderada ou nula à fertilização nitrogenada, corroborando com a premissa de que a o N proveniente do palhiço será a principal fonte em médio e longo prazo, desde que haja manutenção de palhiço na superfície.

Robertson e Thorburn (2007) em seus experimentos de dinâmica de decomposição de palhiço de cana-de-açúcar verificaram que após 1 ano cerca de 82-98% da massa seca foi decomposta, seguindo a mesma tendência de liberação de C após este período (84-98%), já o N variou de 67-95% liberados no solo, totalizando aproximadamente de 1-20 kg N ha^{-1} ao final de uma safra.

Os efeitos a médio e longo prazo de incremento de N são promissores, contudo, a nova realidade de remoção da palha para fins bioenergéticos pode interferir na nutrição da cultura nos canaviais brasileiros (CHERUBIN et al., 2019).

Entre os nutrientes mais limitantes em solos tropicais está o fósforo (P), e sua presença nos resíduos culturais geralmente é baixa (DAMON et al., 2014), mas sua solubilidade em água é alta, de acordo com Noack et al. (2012) cerca de 40 a 60%, é disponível para absorção das plantas. Mas a forma de P que é encontrada no palhiço é que determina a sua mineralização no processo de decomposição, o P inorgânico solúvel é liberado em poucos dias, mas os compostos orgânicos (insolúveis) podem levar vários meses ou anos para sua liberação (ZHU et al., 2018).

Portando além da forma de P liberada no solo, também há a dependência da relação carbono/fósforo (C/P) e as características da cultura, da mineralogia e atividade biológica do solo (DAMON et al., 2014; CHERUBIN et al., 2019).

Outro nutriente essencial é o potássio (K), mas este não participa diretamente das estruturas orgânicas da cana-de-açúcar, está presente principalmente na forma de íons K^+, razão pela qual é altamente solubilizado pela água da chuva (RODRÍGUEZ-LIZANA et al., 2010). Assim a manutenção da palha no campo pode melhorar o K no solo de forma significativa e mais eficiente do que o uso de adubos orgânicos (KAUR e BENIPAL

(2006). Em sistemas com colheita de cana-crua que atualmente é o mais usual no Brasil, deve ser considerado a quantidade de K liberado pela palhada remanescente, ou caso seja feita a fertirrigação com vinhaça a necessidade de fertilização mineral pode ser suprida totalmente.

De acordo com Trivelin et al. (2013) a presença de palhiço no solo pode reduzir o uso de fertilizantes potássicos em curto prazo, e nitrogenados em médio e longo prazo, pois observaram em seus ensaios que a liberação de 100 kg ha^{-1} de K proveniente do palhiço foram decompostos e disponibilizados no solo para a cultura. Já Fortes et al. (2012) verificaram 92% de liberação, que era equivalente a 35 kg ha^{-1} de K após 3 safras da cultura da cana-de-açúcar.

A remoção do palhiço do campo traz mais perdas de K prontamente disponíveis, que qualquer outro nutriente poderia proporcionar à cultura, corroborando com Almeida et al. (2015), que verificaram uma economia de 50% na aplicação de adubos potássicos, comparado aos locais com manejo convencional (sem palhiço remanescente). Os autores afirmam que independente do ótimo aproveitamento do K oriundo do palhiço e das economias que irão proporcionar aos produtores, a vantagem de liberação mais lenta do que ocorre com fertilizantes minerais é de suma importância, reduzindo o potencial de lixiviação tão comum para este nutriente no solo.

Outro exemplo de nutrientes essenciais, podemos citar o cálcio (Ca) e magnésio (Mg) que fazem parte das estruturas orgânicas, por isso dependem da mineralização do material orgânico para estarem disponíveis no solo (FIORETTO, 2017), portanto o tempo para que ocorra a ciclagem é maior. Os demais macros e micronutrientes tem suas particularidades únicas para que aconteça sua mineralização e pronta disposição às culturas, dependentes também de fatores estruturais, ambientais e do solo.

Cherubin et al. (2019) realizaram um longo estudo para avaliar a quantidade de nutrientes perdidos com a remoção do palhiço no solo, e a partir da análise individual das partes das plantas (colmo, folhas superiores e inferiores), onde inicialmente definiram um sistema de avaliação da remoção, se baseando em taxas de remoção (0, 50 e 100% de retirada). Concluíram que no momento da colheita com a retirada dos colmos são retirados 54, 65, 66, 28, 50 e 60% de N, P, K, Ca, Mg e S, respectivamente. O restante do material que poderia ser mantido no solo, caso sejam retirados removeram grande parte de nutrientes que poderiam ser reaproveitados pela cultura futuramente, cerca de N (58%), P (75%) e K (80%) se concentram nas folhas superiores, e Ca (68%), Mg (63%) e S (54%) nas inferiores. Fica evidente a importância de uma boa análise para definir as

quantidades a serem removidas da superfície, para que não haja perdas nutricionais tão significativas.

Diante do exposto, é inquestionável que a cobertura promovida pelo palhiço vai influenciar diretamente na perda de nutrientes por lixiviação, transporte de sedimentos e escoamento (SILVA et al., 2012). Contudo essas perdas são inevitáveis, cabe então a iniciativa de melhorar o uso do solo e manejo adequado do palhiço em campo incrementos nutricionais e melhoria na atividade biológica do solo (SOUSA JÚNIOR et al., 2017).

2.5 Bioindicadores de qualidade do solo

A qualidade ambiental é composta por três principais componentes, a qualidade da água, do ar e do solo (ANDREWS et al., 2002). Contudo diferente dos parâmetros para avaliar a água e o ar, a qualidade do solo não se limita a somente sua poluição. Como definida por Doran e Parkin (1996), um solo saudável deve ter a capacidade de funcionamento ecológico e de uso da terra, que seja capaz de manter a produtividade biológica, vegetal e ambiental.

A degradação de um solo se deve ao aumento do uso e expansão agrícola ao longo dos anos, e a qualidade dos solos variam quanto as suas características, manejos e mudanças em seus atributos químicos, físicos e biológicos (CHAVES et al., 2017).

Assim a qualidade do solo pode ser mensurada tanto para agroecossistemas produtivos quanto para sistemas com vegetação natural, desde que os principais objetivos sejam a manutenção e conservação da biodiversidade (BÜNEMANN et al., 2018). A escolha das formas de quantificação de sua qualidade deve ser feita através de métodos sensíveis às alterações que surgirão no solo, e que reflitam respostas ao manejo aplicado em campo, para sistemas de cultivo. Entre os métodos mais sensíveis para quantificação de um solo saudável, estão os indicadores biológicos, também conhecidos como “bioindicadores”, ou seja, são avaliados a partir de organismos do solo e suas respostas ao manejo (MOGHIMIAN et al., 2019; VASCONCELOS et al., 2020).

Os organismos edáficos permanecem grande parte ou todo seu ciclo de vida no perfil do solo (DIONÍSIO et al., 2016), e são classificados de acordo com diversos parâmetros. A funcionalidade dos organismos de solo pode ser dividida em microfauna, mesofauna e macrofauna (ASSAD, 1997). A classificação pode seguir diferentes critérios: morfológica - tamanho e/ou diâmetro corporal (SWIFT et al., 1979; LAVELLE et al., 1997); aspectos funcionais (LAVELLE et al., 1994; LAVELLE et al., 1997;

LAVELLE e SPAIN 2001) e categorias ecológicas segundo o critério de localização espacial e mobilidade (BOUCHÉ, 1977).

Com relação ao fator morfológico, para Parron et al. (2015) a fauna edáfica é composta por milhares de organismos, de diversas espécies que em relação ao tamanho podem variar desde alguns micrômetros (microfauna) a organismos com até metros de comprimentos (macrofauna) e com ciclos completamente diferentes. Como proposto por Swift et al. (1979) e Lavelle et al. (1994), sobre o tamanho dos organismos, pode ser identificado como invertebrados da microfauna o grupo que possuem diâmetro corporal < 0,2mm (protozoários, nematóides e pequenos indivíduos de grupo Collembola), e atuam de forma indireta na ciclagem de nutrientes. Os organismos da mesofauna possuem diâmetro de 0,2 a 4 mm, composto pelos grupos Acari, Collembola, dipluros, entre outros pequenos insetos, e se movimentam nos poros do solo e entre a serapilheira. Já os organismos da macrofauna possuem diâmetro corporal de > 4 mm, é o grupo composto pelas formigas, coleópteros, anelídeos, aracnídeos, etc.

Supõe-se que em 1 g de solo há cerca de 1 bilhão de células bacterianas, assim a imensa quantidade de microrganismos no solo é capaz de aferir mudanças estabelecidas nos agroecossistemas com grande sensibilidade e eficiência (DING et al., 2016). Os microrganismos são responsáveis por diversas funções como a ciclagem e solubilização de nutrientes, estruturação e manutenção de carbono no solo (NOGUEIRA et al., 2006).

Um solo com uma microbiota em harmonia, apresenta alta atividade metabólica dos organismos, em consequência haverá maior decomposição de matéria orgânica e ciclagem de nutrientes (ELBL et al., 2019). A atividade desses microrganismos pode ser mensurada através do carbono da biomassa microbiana (CBM), que é definido como a parte viva da matéria orgânica do solo (KASCHUK et al., 2010).

O maior reservatório de C terrestre está no solo, chamado de carbono orgânico do solo (COS) (SPARKS, 2003), e sua presença no solo indica altos teores de matéria orgânica, e em consequência boa atividade microbiana. Entre as formas de avaliação da atividade microbiana, temos o quociente metabólico (qCO_2) que indica a respiração basal por unidade de carbono da biomassa, ou seja, a eficiência que os microrganismos utilizam o C como substrato (DILLY e MUNCH, 1998). Este quociente é a melhor forma de detectar algum distúrbio ou estresse no sistema de manejo adotado, um ambiente estressante, haverá maior consumo de C pelos microrganismos.

A eficácia dos organismos edáficos como bioindicadores depende de diversos fatores como a diversidade, abundância e sua localização no ecossistema (PARRON et

al., 2015). Como é o caso dos organismos da macrofauna que estão em posições mais expostas no solo, grande parte encontrada na superfície do solo são afetados diretamente pelas práticas de manejo agrícolas (GRANDY et al., 2016). Alguns desses são considerados ‘engenheiros-do-solo’ devido a sua atuação no solo, pois além de transformarem o material vegetal, agem na formação de estruturas no solo, formação de galerias e ninhos, como as formigas, cupins, besouros e minhocas (TOYOTA et al., 2006; SWIFT et al., 2010).

O uso de sistemas de monocultura intensiva e os processos mecânicos de revolvimento no solo, comuns nos sistemas convencionais normalmente causam distúrbios na atividade e biodiversidade da macrofauna, podendo causar a redução ou extinção de alguns grupos de invertebrados (BEDANO et al., 2016). Como foi observado por Franco et al. (2016), que tiveram como objetivo avaliar a comunidade da macrofauna diante da mudança de uso do solo, de um sistema de expansão para cana-de-açúcar, comparando com o antigo cultivo de pastagem e vegetação nativa (Figura 2). Para estes autores ficou evidente a perda de biodiversidade da fauna do solo neste processo de expansão.

Cultivos intensivos como o da cana-de-açúcar, caracterizado pela mecanização durante o ciclo da cultura, podem provocar alteração ou diminuição de recursos alimentares devido à remoção da palhiço da superfície, podendo potencializar efeitos negativos em suas relações ecológicas no solo (CHERUBIN et al., 2016; SANTORO et al., 2017; MENANDRO et al., 2019). Vanolli et al. (2021) ao avaliarem sistemas de expansão de pastagem para cultivos de cana-de-açúcar, observaram perdas significativas da diversidade e abundância da macrofauna edáfica, corroborando com a premissa de que as perturbações físicas aos sistemas de cultivo provocam nos organismos do solo. Contudo a presença de palhiço na cana soca beneficiou esses atributos, indicando a preferência desses organismos por áreas de solo coberto.

Siqueira et al. (2016) observaram melhoria na diversidade da macrofauna ao longo de cultivos sucessivos de cana-de-açúcar, comparado ao início da expansão do canavial, onde o equilíbrio ecológico foi próximo às áreas com vegetação nativa. Assim a adoção de sistemas conservacionistas no cultivo de cana-de-açúcar como a manutenção de palhiço na superfície, cultivos em plantio direto, sucessão de plantas de cobertura no momento da renovação de canavial podem proporcionar ambientes benéficos para a macrofauna (VANOLLI et al., 2021).

Portanto quanto maior a deposição e manutenção de palhada no solo no cultivo de cana-de-açúcar, haverá maior abundância de organismos edáficos, influenciando na melhoria da qualidade biológica do solo (PANT et al., 2017) e com maior equilíbrio ecológico através da sucessão de boas práticas de cultivo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local, clima e solo

A pesquisa teve início no ano de 2014 em uma área experimental da Embrapa Agropecuária Oeste em parceria com a Usina São Fernando no município de Dourados-MS. O local situa-se na latitude -22º25’86’’S, e longitude -54º97’47’’W, altitude de 410 m. O clima da região, conforme a classificação de Köppen é Am, tropical monçônico, com estações chuvosa no verão e seca no inverno (ALVARES et al., 2013).

O solo foi classificado como Latossolo Vermelho Distroférrico, textura muito argilosa (SANTOS et al., 2018). Os atributos químicos iniciais do solo podem ser verificadss no Quadro 1, e as médias de precipitação e temperatura do período de condução do experimento na Figura 1.

QUADRO 1. Atributos químicos do solo na camada de 0-10 e 10-20cm antes do plantio da cultura

Atributos do solo	PD		PC	
	0-10 cm	10-20 cm	0-10 cm	10-20 cm
P (mg dm^{-3})	4,13	1,5	4,08	1,4
K (mg dm^{-3})	50	33,3	66,67	30
Ca ($cmol_c$ dm^{-3})	4,57	3,17	4,88	2,97
V%	59,07	36,63	60,96	39,47
Al ($mmol_c$ dm^{-3})	0,03	0,2	0,03	0,18

PD: plantio direto, PC: preparo convencional.

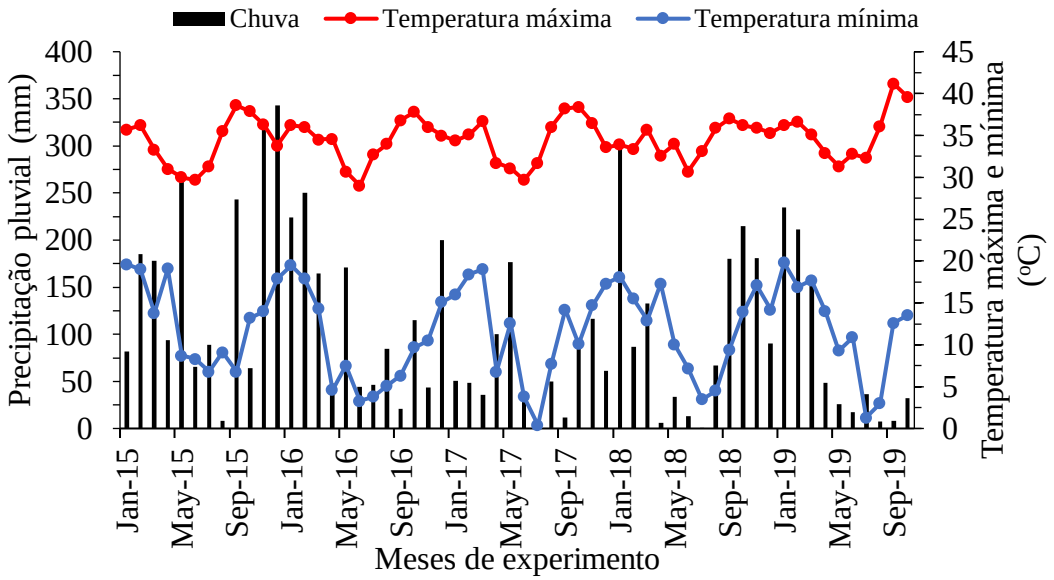


FIGURA 1. Precipitação pluviométrica, temperatura máxima e mínima dos anos que compreenderam o experimento (2015-2019). Fonte: CEMTEC, estação meteorológica Centro, Dourados/MS.

3.2 Delineamento experimental

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com quatro repetições, em esquema de parcelas sub-subdivididas. As parcelas foram compostas pelos sistemas de plantio (direto e convencional), as subparcelas por níveis de palhiço remanescente: sem retirada de palhiço – (100 %), retirada parcial de palhiço – (50%) e retirada total de palhiço (0%), e as sub-subparcelas por escarificação mecânica no cultivo das soqueiras (com e sem escarificação nas entrelinhas da cana-de-açúcar). As 48 parcelas experimentais foram compostas por seis linhas de cana-de-açúcar espaçadas de 1,5 m com 30 metros de comprimento (270 m^2), representado na Figura 4.

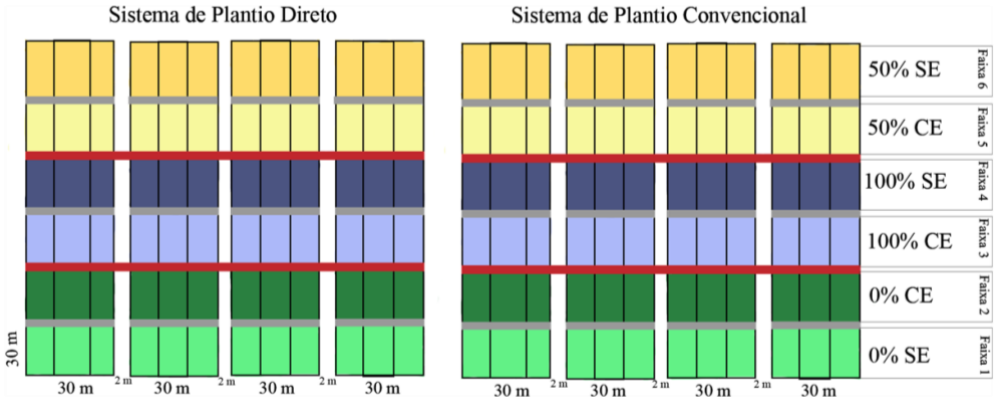


FIGURA 2. Croqui representando a disposição dos tratamentos na área experimental, Dourados - MS. SE: sem escarificação, CE: com escarificação, %: níveis remanescentes de palhiço. Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3 Histórico e condução da área

No início do experimento nas duas áreas com (PD e PC) foi feita a eliminação química do rebrote da última soqueira, através da aplicação de 6,0 L ha^{-1} do herbicida glifosathe + 1,8 L ha^{-1} do herbicida 2,4-D e volume de calda de 150 L ha^{-1}. Aplicação de corretivos (2,0 Mg ha^{-1} de gesso agrícola e 4,0 Mg ha^{-1} de calcário dolomítico) na superfície do solo.

Na área com plantio direto não foi feita nenhuma operação mecânica, mas no preparo convencional os corretivos juntamente com o palhiço residual foram incorporados através das operações sucessivas de gradagem com grade aradora, subsolagem, gradagem com grade intermediária e gradagem com grade niveladora.

Toda a área do experimento foi cultivada com soja durante a safra 2012/13, após a colheita da soja em março de 2013 implantou-se o novo canavial com a cultivar RB12966928, através do plantio mecanizado no espaçamento simples de 1,5 m entre as linhas de cana. A adubação de plantio utilizada em toda a área experimental foi de 600 kg ha^{-1} da fórmula N-P-K (05-25-25), no fundo do sulco aplicado com a plantadora no momento do plantio. Juntamente com a operação de quebra-lombo, após 150 dias do plantio, foi aplicado 130 kg ha^{-1} de N (Ureia).

A adubação das soqueiras foi feita anualmente após o 1º, 2º, 3º, 4º e 5º corte. Anualmente foi aplicado 150 kg ha^{-1} de K_2O (cloreto de potássio), de forma manual ao lado da linha de cana, em superfície 30 dias após a colheita. Anualmente também foi aplicado 150 kg ha^{-1} de N (Ureia) aos 30 dias após a colheita, mecanicamente com um cultivador/adubador de soqueiras equipado com discos de corte da palha e haste escarificadora simples, que trabalham a uma profundidade aproximada de 0,3 m no centro da entrelinha da cana-de-açúcar. Não foi feita nenhuma adubação com micronutrientes durante toda a condução do experimento.

Após a colheita da terceira soca em 2017 foi aplicado 4 Mg ha-1 de calcário dolomítico sobre as soqueiras em ambos sistemas de plantio. Os demais tratos culturais para controle das plantas daninhas e pragas foram realizados sempre que necessários e de acordo com as recomendações para a cultura. A caracterização química do solo ao fim do experimento pode ser observada no Quadro 2.

QUADRO 2. Atributos químicos do solo na camada de 0-10 e 10-20 cm ao fim da safra 2018/19.

Plantio direto														
Camada do Solo	Escar.	Palhiço	P	MO	C	pH	Ca	Mg	K	H+Al	Al	SB	CTC	V
		(%)	(mg dm^{-3})	(g kg^{-1})	(g kg^{-3})	(CaCl2)	(cmolc dm^{-3})							%
0-10 cm	CE	0	5,23	29,89	1,73	6,31	6,33	1,79	0,14	2,24	0,00	8,26	10,50	78,66
		50	2,18	28,64	1,66	5,68	4,64	1,29	0,30	3,26	0,00	6,23	9,48	65,08
		100	3,28	36,67	2,13	6,08	6,18	1,85	0,28	3,21	0,00	7,79	11,00	70,86
	SE	0	2,57	29,39	1,70	5,78	4,58	1,24	0,19	3,61	0,00	6,01	9,63	62,44
		50	8,31	32,27	1,87	6,31	5,21	1,53	0,29	3,18	0,00	7,01	10,19	68,71
		100	6,81	35,23	2,04	6,25	6,59	1,80	0,35	1,93	0,00	9,31	11,24	82,83
10-20 cm	CE	0	2,67	29,01	1,68	6,26	5,80	1,49	0,06	2,12	0,00	7,35	9,47	77,92
		50	2,93	25,49	1,48	5,65	4,70	1,20	0,08	3,24	0,03	5,98	9,22	64,76
		100	2,15	27,70	1,61	5,87	4,90	1,34	0,13	3,25	0,00	6,37	9,62	65,92
	SE	0	2,11	27,43	1,59	5,33	3,60	0,91	0,06	4,48	0,00	4,57	9,05	50,31
		50	1,60	23,54	1,37	5,89	4,74	1,13	0,05	2,23	0,03	5,92	8,15	72,71
		100	3,37	25,48	1,48	5,65	3,92	0,97	0,11	3,86	0,00	5,00	8,86	56,31
Preparo convencional														
Camada do solo	Escar.	Palhiço	P	MO	C	pH	Ca	Mg	K	H+Al	Al	SB	CTC	V
		(%)	(mg dm^{-3})	(g kg^{-1})	(g kg^{-1})	(CaCl2)	(cmolc dm^{-3})							%
0-10 cm	CE	0	2,28	30,51	1,77	5,70	4,56	1,39	0,22	4,40	0,03	6,17	10,56	58,35
		50	2,88	31,54	1,83	5,32	3,60	1,13	0,38	5,40	0,07	5,11	10,52	48,73
		100	2,24	33,10	1,92	5,20	3,99	1,27	0,35	4,41	0,10	5,61	10,02	55,68
	SE	0	2,48	31,11	1,80	5,17	4,36	1,28	0,33	4,56	0,03	5,97	10,53	56,72
		50	1,89	31,93	1,85	5,09	3,44	1,07	0,32	5,06	0,13	4,83	9,89	49,03
		100	2,95	36,41	2,11	5,29	4,40	1,57	0,33	5,26	0,03	6,30	11,57	54,52
10-20 cm	CE	0	1,93	26,75	1,55	5,32	4,25	1,34	0,16	3,83	0,17	5,75	9,58	59,76
		50	2,10	27,47	1,59	5,18	2,85	0,90	0,12	5,55	0,20	3,88	9,43	41,07
		100	1,46	26,67	1,55	5,26	3,04	0,90	0,15	5,16	0,07	4,09	9,25	44,26
	SE	0	2,14	27,32	1,58	5,47	4,95	1,34	0,07	3,71	0,03	6,36	10,07	63,17
		50	1,87	27,97	1,62	5,28	2,96	0,97	0,08	5,40	0,17	4,01	9,42	42,72
		100	2,65	31,63	1,83	5,47	4,42	1,49	0,08	4,31	0,03	5,98	10,29	58,47

Escar.: escarificação, CE: come sacarificação, SE: sem escarificação. P(mehlich-3

3.4 Determinação dos níveis de palhiço

Após a colheita da cana-planta foi determinada a massa de palha total correspondente a cada tratamento, através do uso de um quadrado de metal com área interna de 0,5 m^2 (1,0 m x 0,50 m), lançado aleatoriamente em dois pontos (repetições) das parcelas e então feita a coleta do palhiço de seu interior, para secagem e pesagem. Após a avaliação do palhiço total, foram aplicados nas subparcelas os níveis de palhiço remanescente calculados: sem retirada de palhiço – (100 %), retirada parcial de palhiço – (50%) e retirada total de palhiço (0%).

A massa foi avaliada pelo método do quadrado, o palhiço remanescente que permaneceram sobre o solo após a aplicação dos tratamentos, bem como a quantidade de palhiço residual que permaneceu sobre o solo até a próxima colheita, e suas respectivas porcentagens de decomposição, são apresentadas no Quadro 3.

Para recolhimento do palhiço foram realizadas as operações de enleiramento com um ancinho enleirador, modelo AL 1290, marca New Holland, tracionada por trator de 110 CVs. Em seguida realizou-se o enfardamento das leiras de palha com enfardadeira marca New Holland, modelo BB 1290, tracionada por trator de 180 CVs. Por último realizou-se o recolhimento dos fardos com carreta, marca New Holland, modelo AC 1290, tracionada por trator de 110 CVs. O recolhimento parcial (50%) foi estabelecido através de regulagem da altura de trabalho do ancinho enleirador de palha.

Esta metodologia de recolhimento e avaliação da quantidade total, remanescente (após o recolhimento parcial ou total) e residual (antes da colheita da cana no próximo ano), foram repetidas da mesma forma em todas as safras (2014/15 a 2018/19).

QUADRO 3. Palhiço total, palhiço remanescente (RE) e palhiço residual (RS) da cana-de-açúcar, em função do sistema de plantio, níveis de palhiço e manejo com escarificação. Dourados, MS/Brasil

	MS (Mg ha^{-1})														
	2014/15			2015/16			2016/17			2017/18			2018/19		
	Total	RE[1]	RS[2]	Total	RE[1]	RS[2]	Total	RE[1]	RS[2]	Total	RE[1]	RS[2]	Total	RE[1]	RS[2]
Plantio															
PD	11,62	5,6	1,44	12,46	7,06	3,94	11,99	5,95	1,65	13,52	7,56	2,09	17,31	9,58	1,24
PC	10,27	4,5	1,27	13,42	7,68	3,69	12,41	6,33	1,44	13,27	7,89	2,35	17,87	9,47	1,511
Palhiço (%)															
0	12,75	1,64	0,34	12,06	1,31	0,2	12,06	1,5	0,16	12,98	1,12	0,22	15,62	0,76	0,19
50	10,74	4,17	1,24	12,78	6,83	3,29	10,56	2,96	0,81	13,24	8,09	2,09	16,97	7,63	1,27
100	9,35	9,35	2,48	13,97	13,97	7,96	13,97	13,97	3,67	13,96	13,96	4,36	20,18	20,18	2,67
Escarificação															
SE	10,18	5,44	1,55	13,3	7,39	3,78	13,22	6,67	2,03	14,05	8,24	2,95	18,54	10,43	1,89
CE	11,71	4,66	1,16	12,57	7,35	3,85	11,18	5,62	1,05	12,74	7,21	1,50	16,64	8,62	0,86

[1] Remanescente: Palhiço que ficou no solo após o recolhimento dos níveis. [2]Residual: Palhiço que permaneceu sobre o solo até a próxima colheita, não decomposta.

A cronologia dos processos realizados durante a condução do experimento de 2013 até 2019 pode ser observado na Figura 3.

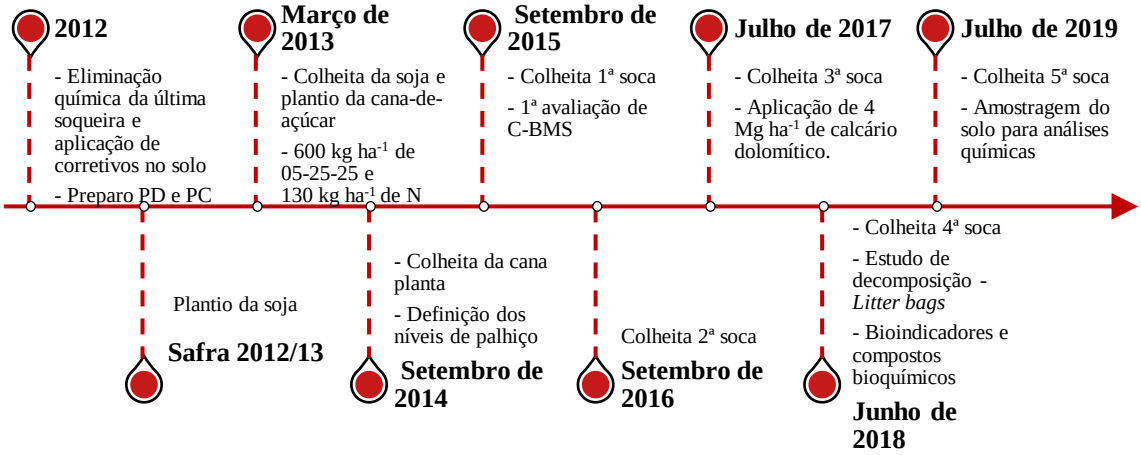


FIGURA 3. Cronologia da condução do experimento. PD: plantio direto, PC: preparo convencional, C-BMS: carbono da biomassa microbiana do solo. Fonte: Elaborado pelo autor.

3.5 Decomposição de palhiço e liberação de nutrientes

A avaliação de decomposição e mineralização de nutrientes ocorreu através do método de amostragem com "*litter bags*", segundo Bocok e Gilbert (1975) adaptado. Essa avaliação consiste em acompanhar a alteração de massa e composição química da palha em função do tempo, através da quantidade inicial pré-determinadas acondicionadas em sacos especialmente confeccionados.

Para a confecção dos *litter bags* foi utilizado material telado, nas dimensões de 75 cm x 50 cm. A partir das quantidades avaliadas de palhiço total na área, foram calculadas a quantidade equivalente para cada nível de palhiço, de acordo com a área (m^2) correspondente do *litter bag*. O enchimento com o palhiço foi feito em campo, sendo o material retirado dos locais onde seriam posicionados os *litter bag*, então pesado e feita a costura para fechamento e distribuição nas parcelas.

Os *litters bags* foram dispostos nas 3 linhas centrais, próximos a linha da cana-de-açúcar nas parcelas com 50% e 100% de palhiço remanescente, totalizando 12 por parcela (Figura 4). Antes da instalação dos *litter bags* devidamente fechados, todo material vegetal original da superfície do local foi retirado, para que os *litter bags* fossem acomodados sobre o solo da mesma forma do palhiço naturalmente depositado no solo.

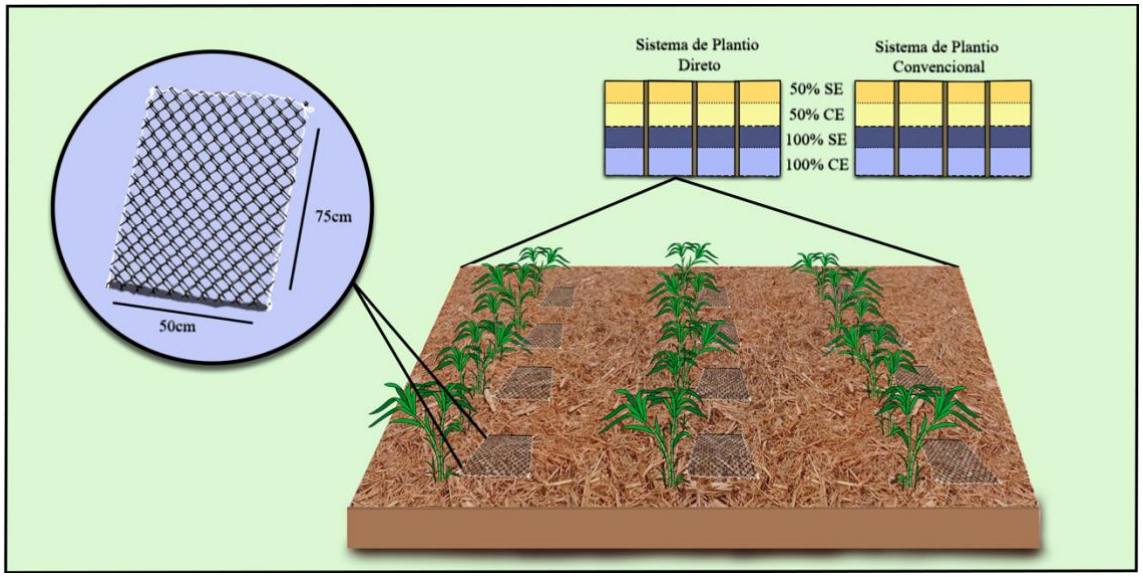


FIGURA 4. Esquema dos tratamentos, sistemas de plantio e o posicionamento dos *litter bags* em cada parcela experimental. SE: sem escarificação, CE: com escarificação, %: níveis remanescentes de palhiço. Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram definidos intervalos para o recolhimento dos *litter bags* no campo, nos primeiros 60 dias as coletas foram feitas com menor intervalo (6, 18, 33, 47, 63 dias), devido à dinâmica de liberação de alguns nutrientes ser mais rápida em curto prazo, e após esse período o intervalo de amostragem aumentou até a época de colheita (94, 124, 185, 243, 304 e 360 dias) (Figura 5).

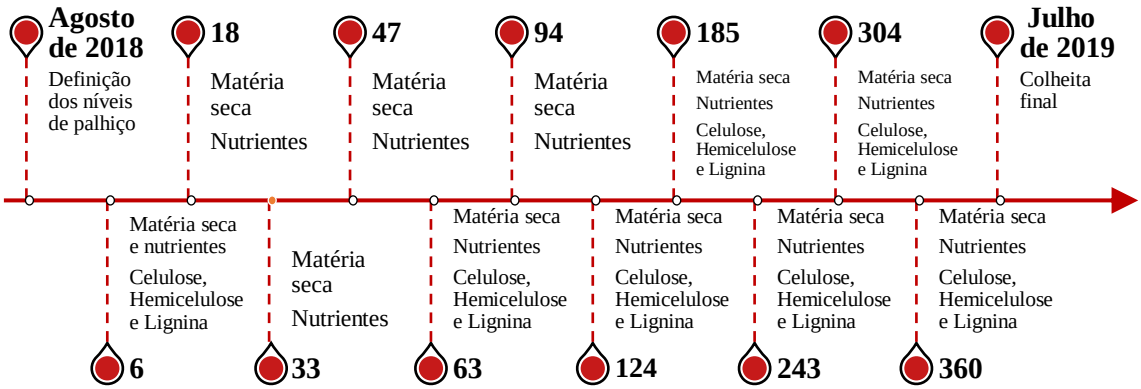


FIGURA 5. Cronologia de coleta de *litter bags* (dias) e épocas de avaliação de celulose, hemicelulose e lignina.

Após a coleta a campo dos *litter bags* em cada época avaliada, os mesmos foram levados para limpeza de possíveis impurezas (solo e raízes), acondicionados em sacos de ráfia e armazenados em casa de vegetação com circulação de ar, por 48 horas para pré-secagem. Após este período o palhiço foi submetido a secagem em estufa com circulação e renovação de ar por 24 horas a 65 °C, então foi determinada a massa das amostras em balança de precisão para obtenção da massa seca final.

De acordo com os resultados da matéria seca, obteve-se a quantidade de palhiço remanescente a partir da diferença entre a quantidade inicial apresentada nos tratamentos. Os resultados também foram ajustados ao modelo exponencial em função dos dias de experimento, como utilizado por Rezende et al. (1999):

$$X = X_0\, e^{-Kt} \tag{1}$$

Em que:

X: quantidade de matéria seca após um período de tempo t.

X_0: quantidade de matéria seca inicial.

K: constante de decomposição.

Para calcular a constante K, foi feita a reorganização da Equação 2:

$$K = \ln\left(\frac{X}{X_0}\right)/t \tag{2}$$

Para reduzir e homogeneizar o palhiço de cada amostra para sequentes análises, o material passou por triturador forrageiro (diâmetro médio de 3 mm), e em seguida por moinho de facas tipo Willey (diâmetro médio de 0,5 mm), e então encaminhadas para as análises. O palhiço foi caracterizado quimicamente quanto aos teores de C e N pelo Analisador elementar automático CHNS (ANALYTICAL METHODS COMMITTEE, 2006). Os teores de macronutrientes foram analisadas de acordo com a metodologia proposta por Malavolta et al. (1997).

3.6 Análises de compostos bioquímicos

As avaliações dos compostos bioquímicos foram feitas em 7 coletas durante a safra 2018/19, com intervalos de 60 dias (6, 63, 124, 185, 243, 304 e 360 dias), utilizando

parte do mesmo palhiço coletado com os *litter bags*, que foi anteriormente triturado e moído (Figura 5). Por ser um experimento de longa duração, as avaliações mais detalhadas durante a safra ocorreram somente na última safra da condução do experimento, através da coleta dos *litter bags*.

Para calcular a quantidade de celulose, hemicelulose e lignina, primeiramente foram feitas análises de fibra em detergente neutro (FDN) e fibra em detergente ácido (FDA), originalmente desenvolvidas por Van Soest e Robertson (1985).

Foram confeccionados sacos com tecido não tecido (TNT, 100g m^{-2}) com dimensão de 5 x 5 cm, identificados com marcador para tecidos, e em seguida lavados com acetona. Após as devidas pesagens, foram adicionadas 0,500 g da amostra previamente moídas e acondicionadas nos sacos, e então selados. Após este procedimento as amostras foram submersas na solução de FDN levadas a autoclave vertical por 1 hora à 105 °C, então lavados com água destilada quente e acetona. Após a secagem em estufa com circulação forçada de ar e pesagem, os sacos foram submetidos à análise sequencial de FDA, seguindo os mesmos procedimentos, com sua devida solução de detergente ácida.

A avaliação de lignina foi sequencial ao método de FDA, utilizando os mesmos sacos no método de hidrólise ácida (Método INTC-CA F005/01), adaptado. Após a obtenção da massa de FDA, os sacos foram submersos em solução de ácido sulfúrico à 72%, por 2 horas, seguidos da secagem em estufa e pesagem em balança analítica. Para determinação da lignina é necessária a quantificação das cinzas, portanto os mesmos sacos foram acondicionados em cadinhos de porcelana, anteriormente pesados, e dispostos em mufla à 600 °C por 5 horas, e pesados após atingirem temperatura ambiente em dessecador.

Com as massas das cinzas, de FDN e FDA foi possível calcular as porcentagens de lignina, celulose e hemicelulose nas amostras do palhiço de cana-de-açúcar, de acordo com as seguintes Equações:

$$\%\ Lignina: \frac{lignina\ (g)}{ASE} * 100 \tag{3}$$

$$\%\ Lignina\ corrigida: \%\ Lignina - \%\ Cinza \tag{4}$$

$$\% \, Cinza: \frac{cinza \ (g)}{ASE} * 100$$

(5)

$$\%Hemicelulose = \%FDN - \%FDA$$

(6)

$$\%Celulose = \%FDA - \%Lignina$$

(7)

Em que:

Lignina (g): massa após hidrólise ácida + saquinho

ASE: amostra seca em estufa

Cinza (g): massa da cinza + cadinho após queima na mufla.

3.7 Bioindicadores da qualidade do solo

O solo foi coletado na profundidade de 0-10 cm com auxílio de trado holandês, constituídos de 4 amostras simples para formar a amostra composta das linhas centrais das parcelas que receberam a escarificação mecânica, nos três níveis de palha. Foram realizadas quatro coletas, a primeira em outubro de 2015 para caracterizar a condição inicial (primeira soqueira) do experimento, as demais na quinta soqueira com menor intervalo, em setembro de 2018, abril e julho/2019. Este pequeno intervalo de meses é importante para caracterizar a biomassa microbiana em diferentes condições climáticas, pois pela sua sensibilidade a alterações do ambiente, épocas de chuva e seca influenciam em seus resultados.

As amostras de solo foram passadas por peneira com malha de 2,0 mm, para retirar resíduos visíveis de plantas, organismos e raízes. Posteriormente foram armazenadas em sacos plásticos e mantido em câmara fria.

O carbono da biomassa microbiana (C-BMS) foi avaliado pelo método de fumigação-extração proposto por Vance et al. (1987). As quantificações de carbono (C) ocorrem de duas formas, parte das amostras passaram pelo processo de fumigação (F) que consiste em manter as amostras por 48 horas, em dessecador contendo 20 mL de clorofórmio livre de álcool. A outra forma de extração foi feita imediatamente após a pesagem do solo no frasco de vidro *snap-cap*, não necessitando desta incubação, portanto são chamadas de amostras não fumigadas (NF). Após esses processos foram adicionados

50 mL de K_2SO_4 0,5 mol L^{-1} nas amostras e submetidos à agitação (150 rpm) por 30 minutos, e o sobrenadante resultante foi filtrado. A partir desta amostra foi determinado C por espectrofotometria (SILVA et al., 2013), e o resultado foi calculado com a Equação 8:

$$C - BMS = \frac{mg\ de\ C\ de\ solo\ fumigado - mg\ de\ C\ de\ solo\ não\ fumigado}{Kec} \tag{8}$$

Em que:

Kec: quantidade de carbono proveniente da biomassa microbiana.

A respiração basal do solo (C-CO_2) foi determinada através da incubação das amostras de solo por 7 dias, em frascos hermeticamente fechados em ambiente fresco e livre de luminosidade, junto a solução de NaOH 1 M, que captura todo o CO_2 liberado pelos microoganismos no solo. Após este período na solução de NaOH 1 M foi adicionado fenolftaleína 1% e submetido à titulação com solução de 0,5 M de ácido clorídrico padronizado. A quantificação do C emitido em forma de CO_2 foi determinado pela Equação 9:

$$C - CO_2 = (mg\ de\ C - CO_2\ kg^{-1}\ solo\ hora^{-1}) = (\frac{(V_b - V_a).M.6.1000}{Ps})/T \tag{9}$$

Em que:

V_b (mL): volume de ácido clorídrico gasto na titulação do controle.

V_a (mL): volume gasto na titulação da amostra.

M: molaridade exata do HCl.

Ps (g): peso de solo seco.

T: tempo de incubação da amostra (horas).

O quociente metabólico (qCO_2) foi definido pela relação entre o fluxo de C-CO_2 pelo conteúdo de C-BMS, proposto por Anderson e Domsch (1993). De acordo com Kalembasa e Jenkinson (1973) para avaliação do carbono orgânico (CO), o solo foi macerado e analisado pelo método de dumas, por combustão no aparelho Total Organic Carbon Analyser, TOC-V.

Para a avaliação de fauna foram coletadas, em 4 épocas (setembro/2018, novembro/2018, março/2019 e julho/2019), em cada sistema, monólitos de solo de 0,25

x 0,25 x 0,10 m (comprimento x largura x profundidade), em cada sistema sem uso de escarificação, nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm conforme metodologia de Anderson e Ingram (1993). As épocas de coleta também foram definidas para captar os resultados da macrofauna, e sua sensibilidade em épocas chuvosas e de seca durante a última safra (2018/19).

Os monólitos foram encaminhados para imediata triagem manual, e os organismos encontrados foram armazenados em solução com álcool a 70%. A identificação e contagem dos organismos considerando os grandes grupos taxonômicos de ordem e alguns organismos até a classificação de família, foi feita com o auxílio de lupa binocular com capacidade de aumento de 40 vezes, em placas de Petri (ANDERSON e INGRAM, 1993).

Os atributos ecológicos da fauna foram avaliados com base na densidade (n° de indivíduos por m^2), riqueza (nº de grupos) e índice de diversidade de Shannon (MAGURRAN, 1988). O índice de diversidade de Shannon foi analisado de acordo com Shannon e Weaver (1949), pela Equação 10:

$$H' = -\sum(pi) = 1(lnpi) \tag{10}$$

Em que:

H'=

pi: $\frac{ni}{N}$

ni: abundância de cada grupo

N: número total de grupos

Com relação ao índice de equitabilidade de Pielou proposto por Pielou (1977) foi calculado de acordo com a Equação 11:

$$e = \frac{H}{Log\ S} \tag{11}$$

Em que:
H: índice de Shannon
S: número total de grupos na comunidade.

Em função do experimento de longa duração, a maioria das análises foi feita na última safra para verificar os efeitos dos sistemas em cinco soqueiras, e as análises biológicas de concentraram neste período (2018/19). Não foi utilizado o fator

escarificação para o carbono da biomassa microbiana e macrofauna, devido a grande quantidade de amostras necessárias para abranger todo o experimento, que tornaria o serviço de triagem e análises laboratoriais inviáveis.

3.8 Diagnose foliar e produtividade da cana-de-açúcar

A folha de diagnóstico coletada é chamada de +1, que é a primeira folha da haste de acordo com o sistema de Kuijper (DILLEWJIN, 1952). A coleta foi feita ao acaso dentro do talhão nas linhas centrais. Então foi feita a retirada da nervura central, secagem em estufa com circulação de ar e então moídas em moinho de facas tipo Willey. As amostras foram analisadas de acordo com a metodologia descrita por Malavolta et al. (1997).

Para avaliação da produtividade, foi calculada a tonelada de colmos por hectare (TCH), obtida através do peso de 2 feixes de 10 canas colhidos nas linhas centrais de cada parcela, e o número total de colmos em 10 metros. O TAH (tonelada de açúcar por hectare) foi calculado através da razão entre o teor de açúcares totais recuperáveis (ATR), analisado nos colmos e o TCH.

3.9 Análise estatística

Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) para testar os efeitos da manutenção do palhiço nos atributos avaliados. Quando significativos foram aplicados o teste de Tukey, a 5% de probabilidade, para a comparação de médias e verificação da interação entre manejos, usando o software SISVAR 5.6 (FERREIRA, 2003).

A decomposição da palha, os teores de nutrientes, quando significativos pela análise de variância, foram submetidos à regressão polinomial usando o software SISVAR 5.6 (FERREIRA, 2003).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Bioindicadores de qualidade do solo

Para os atributos da biomassa microbiana somente houve interações entre os sistemas de manejo e níveis de palha para carbono da biomassa microbiana (C-BMS) (outubro/2015 e julho/2019) e *q*MIC (outubro/2015) (Quadro 5 e 6). O C-BMS foi influenciado somente pelo preparo de solo nas duas primeiras coletas, o PD beneficiou este parâmetro na primeira avaliação (outubro/2015), que alcançou 266,54 $\mu g\ C\ g^{-1}$

solo seco. Em resposta ao mínimo revolvimento na área com PD, o efeito do preparo de solo no início do experimento refletiu nos menores valores na área com PC (198,76 μg C g^{-1} solo seco) (Quadro 4).

QUADRO 4. Valores médios de carbono da biomassa microbiana (C-BMS), respiração basal (C-CO_2), quociente metabólico (*q*CO_2), quociente microbiano (qMIC) e matéria orgânica do solo (MOS), em sistemas de preparo e níveis de palhiço no solo em outubro de 2015

	C-BMS	C-CO_2	*q*C-CO_2	*q*MIC	MOS
	μg C g^{-1} solo seco	μg C-CO_2 g^{-1} solo dia^{-1}	μg C-CO_2 μg^{-1} C-BMS h^{-1}	%	g kg^{-1}
Preparo de solo					
PD	266,545 a	25,403 a	48,382 a	1,593 a	28,584 b
PC	198,763 b	15,403 b	34,927 a	1,100 b	31,322 a
CV (%)	20,00	1,29	40,56	21,73	4,38
Palhiço (%)					
0	187,252 a	24,762 a	39,805 a	1,112 a	29,384 a
50	269,756 a	19,360 b	30,022 a	1,349 a	29,647 a
100	240,953 a	17,520 c	54,200 a	1,578 a	30,829 a
CV (%)	32,33	48,48	59,95	29,74	5,90
Teste F					
Preparo x Palhiço	$8,210^{*}$	$0,149^{ns}$	$2,731^{ns}$	$6,167^{*}$	$0,682^{ns}$

Médias seguidas por letras iguais na coluna não diferem entre si pelo Tukey a 5% de significância. PD: plantio direto, PC: preparo convencional.

O efeito do preparo do solo foi observado com o passar do tempo, como pode ser verificado no Quadro 5, a segunda coleta (setembro/2018) o PC foi superior (210,69 μg C g^{-1} solo seco), e a partir da terceira avaliação já não há diferenças significativas ($p<0,05$) entre os sistemas de preparo de solo, exceto para a MOS e C-CO_2, porém, pode-se verificar diferenças entre os níveis de palhiço remanescente.

O recolhimento total do palhiço em campo apresentou redução significativa ($p<0,05$) no C-BMS em áreas com 100% de palhiço em abril e julho de 2019, com médias de 227,56 e 310,43 μg C g^{-1} solo seco, respectivamente (Quadro 5). Sistemas com maior aporte de cobertura vegetal na superfície proporcionam ambientes favoráveis aos microrganismos, como maior umidade, boa temperatura e abundância de recursos nutricionais (WANG et al., 2020).

QUADRO 5. Valores médios de carbono da biomassa microbiana (C-BMS), respiração basal (C-CO_2), quociente metabólico ($q$$CO_2$), quociente microbiano (qMIC) e matéria orgânica (MOS), em sistemas de preparo e níveis de palhiço no solo

	C-BMS	C-CO_2	qC-CO_2	qMIC	MOS
	μg C g^{-1} solo seco	μg C-CO_2 g^{-1} solo dia^{-1}	μg C-CO_2 μg^{-1} C-BMS h^{-1}	%	g kg^{-1}
		Setembro/2018			
Preparo de solo					
PD	149,131 b	20,177 b	60,200 a	0,974 a	26,475 b
PC	210,696 a	24,833 a	50,616 a	1,235 a	29,507 a
CV (%)	25,95	2,90	22,04	21,43	4,67
Palhiço (%)					
0	196,471 a	25,733 a	57,727 a	1,178 a	28,263 a
50	188,614 a	18,096 a	42,795 a	1,198 a	26,936 a
100	157,656 a	23,73 a	65,703 a	0,936 a	28,774 a
CV (%)	23,18	26,62	33,94	24,34	6,02
Teste F					
Plantio x Palhiço	$1,789^{ns}$	$1,947^{ns}$	$0,159^{ns}$	$1,885^{ns}$	$0,386^{ns}$
		Abril/2019			
Preparo de solo					
PD	189,73 a	23,61 a	55,61 a	1,04 a	31,16 b
PC	176,97 a	14,75 b	40,84 a	0,90 a	33,46 a
CV (%)	23,55	11,81	35,29	24,29	3,90
Palhiço (%)					
0	131,76 b	17,70 a	56,68 a	0,74 b	30,78 b
50	190,73 ab	19,26 a	48,32 a	1,01 ab	32,34 ab
100	227,56 a	20,58 a	39,67 a	1,16 a	33,80 a
CV (%)	27,18	17,13	34,24	28,35	5,53
Teste F					
Plantio x Palhiço	$0,909^{ns}$	$2,240^{ns}$	$3,369^{ns}$	$0,741^{ns}$	$0,163^{ns}$
		Julho/2019			
Preparo de solo					
PD	232,64 a	19,72 a	35,01 a	1,28 a	31,17 a
PC	250,21 a	19,98 a	36,25 a	1,33 a	32,01 a
CV (%)	5,97	4,15	7,22	10,47	6,49
Palhiço (%)					
0	180,42 c	18,59 b	42,98 a	1,03 c	30,23 b
50	233,43 b	19,34 b	34,64 b	1,31 b	30,76 ab
100	310,43 a	21,64 a	29,27 b	1,58 a	33,79 a
CV (%)	6,13	2,97	6,33	9,02	7,27
Teste F					
Plantio x Palhiço	$4,339^{*}$	$1,333^{ns}$	$2,191^{ns}$	$2,393^{ns}$	$0,131^{ns}$

Médias seguidas por letras iguais na coluna não diferem entre si pelo Tukey a 5% de significância. PD: plantio direto, PC: preparo convencional.

Em ambos sistemas de plantio as áreas com 100% de palhiço, independente do manejo de escarificação, tiveram as maiores quantidades de massa seca decomposta. Entre os demais níveis de palhiço, aos 360 dias (julho/2019) foram decompostos 0,413 e 0,063 Mg h^{-1} ao fim da safra (julho/2019) no PD e PC, respectivamente. Com o aumento do C-BMS e da decomposição da palha leva o sistema a aumentar os teores de carbono orgânico do solo (MALHI et al. 2012), como observado neste estudo, onde a partir de abril de 2019 as áreas com 100% de palhiço tiveram aumento ($p<0,05$) no teor de MOS (Quadro 5).

A respiração basal (C-CO_2), apresentou maiores no PC em setembro/2018, e no mês de abril/2019 se destacou no PD, essa mudança pode ter sido influenciada pela menor pluviosidade (48,8mm) neste mês (Figura 1), mantendo melhor ambiente aos microrganismos (Quadro 5). Esse parâmetro normalmente indica a atividade geral ou a energia gasta pelos microrganismos, para seu próprio armazenamento (BOLAT, 2019). Assim a retirada total de palhiço pode ter acarretado na perda de C, pois um valor de C-CO_2 alto pode indicar perda de C orgânico no solo a longo prazo (CUNHA et al., 2011).

Na última avaliação (julho/2019) o alto valor de C-CO_2 na área com 100% de palhiço (21,64 μg C-CO_2 g^{-1} solo dia^{-1}) não pode ser interpretado como uma perda de C, pois refletiu nos resultados do C-BMS, indicando boa atividade microbiana (Quadro 5). De acordo com Souto et al. (2009) a respiração é um ótimo indicador de decomposição, e pode apresentar aumento quando há umidade ótima e altas temperaturas. Como pode ser observado na figura 1, os meses em que o PD foi superior (outubro/2015 e abril/2019) tiveram baixa pluviosidade (64 e 48,8 mm, respectivamente), assim o PD foi mais eficiente na manutenção da umidade do solo nos meses com menores umidades relativas do ar em campo.

Para o quociente metabólico (qCO_2) não houve significância ($p>0,05$) entre o preparo de solo e níveis de palhiço até a terceira coleta, sendo a área com 0% de palhiço superior (42,98 μg C-CO2 μg^{-1} C-BMS h^{-1}) em julho de 2019 (Quadro 5). Este atributo é baseado na premissa de que há declínio em sistemas mais estáveis, e aumento decorrente de perturbações no sistema de manejo (BOLAT, 2019), pois a biomassa microbiana gasta mais C para sua manutenção (SOUZA et al., 2006).

Portanto diante do baixo C-BMS e C-CO_2 neste estudo, a área com retirada total de palhiço indica alguma perturbação no sistema de manejo, provocada pela ausência de cobertura na superfície. Estes resultados corroboram com Almeida et al. (2016), que ao avaliar diferentes sistemas de cultivo de cana-de-açúcar irrigados, observaram maiores

valores de qCO_2 em área sem manutenção de palhiço em campo, resultando em um ambiente estressante para a microbiota.

Os níveis de palhiço foram significativos ($p<0,05$) nas avaliações realizadas após 5 anos de recolhimento e manutenção (abril e julho/2019), com grande relação entre o C-BMS e MO. A área com 100% de palhiço foi superior apresentando médias de 1,16% e 1,58%, respectivamente (Quadro 5). Maiores valores de *q*MIC resultam de ambientes com C disponível para os microrganismos, ou seja, com bons teores de matéria orgânica (ALMEIDA et al., 2016), como foi verificado nas áreas com maior aporte de palhiço em campo.

A interação entre os sistemas de plantio e níveis de palhiço na primeira (outubro/2015) e na quarta coleta (julho/2019) pode ser observado no Quadro 6.

QUADRO 6. Carbono da biomassa microbiana (C-BMS) em plantio direto e preparo convencional, em níveis de palhiço remanescente no solo, em outubro/2015 e julho/2019

Preparo de solo	C-BMS (μg C g^{-1} solo seco)		
	Palhiço (%)		
	0	50	100
	Outubro/2015		
PD	182,40 aB	323,88 aA	293,72 aA
PC	192,47 aA	215,63 bA	188,19 aA
	Julho/2019		
PD	183,38 aC	222,71 aB	291,84 aA
PC	177,47 aC	244,15 aB	329,02 aA

Médias seguidas por letras minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. PD: plantio direto, PC: preparo convencional.

É evidente o incremento do C-BMS nos sistemas com maiores níveis de palhiço remanescentes (50 e 100%) no PD no início do experimento (outubro/2015), enquanto que não houve melhoria no PC (Quadro 6). Assim a adoção do plantio direto tende a reduzir a perturbação no solo (GUO et al., 2014), contudo na quarta avaliação (julho/2019) o preparo de solo não influenciou, apenas quanto aos níveis de palhiço, em que 100% de manutenção foi eficiente para manter altos valores de C-BMS mesmo no inverno, quando tende a haver uma queda na atividade microbiana. Portando aliando a manutenção de um ambiente propício para a atividade microbiana, a ação dos microrganismos na decomposição e ciclagem de nutrientes é eficiente mesmo em

condições estressantes, como em baixas temperaturas (JIN et al., 2017; WANG et al., 2020).

Para *q*MIC a interação entre os sistemas de plantio e palhiço foi significativa (Quadro 7) em que devido à grande dependência do C-BMS, *q*MIC manteve resultados semelhantes ao observado no Quadro 7, onde há forte influência do nível de 50% de palhiço em campo, semelhante a manutenção de 100%. O quociente microbiano (*q*MIC) é obtido através da relação entre a matéria orgânica (MO) e o C-BMS, e reflete a quantidade de C orgânico que ficará imobilizado na biomassa microbiana, indicando a eficiência do acúmulo de C no solo (ANDERSON e DOMSCH, 1993). Somente na primeira coleta o preparo de solo causou efeito, o PC foi superior com 50% de manutenção (1,35%), e alcançou o maior valor (1,68%) nos 5 anos de experimento na área com 100% de manutenção (Quadro 4). Resultado explicado pela estabilização do sistema com o passar do tempo, onde o preparo de solo realizados no plantio da cultura não interferiram de forma negativa.

QUADRO 7. Quociente microbiano (*q*MIC) em plantio direto e preparo convencional e níveis de palhiço remanescente no solo, em outubro de 2015

*q*MIC (%)			
Preparo de solo	Palhiço (%)		
	0	50	100
	Outubro/2015		
PD	1,07 aB	1,27 bAB	1,50 aA
PC	0,99 aB	1,35 aA	1,68 aA

Médias seguidas por letras minúscula na coluna, e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. PD: plantio direto, PC: preparo convencional.

A MOS não apresenta alterações com pouco tempo de manejo, é um indicador analisado a longo prazo, e neste experimento nas três primeiras avaliações o PC apresentava valores superiores (31,32; 29,507 e 33,46 g kg^{-1}, respectivamente), somente na última avaliação houve uma estabilização (Quadro 5). De acordo com Tomazi et al. (2019), uma área com grande revolvimento pode acelerar a decomposição da cobertura vegetal incorporada ao solo, acarretando um possível aumento do C-BMS, e em consequência influenciar na mineralização e aumento da matéria orgânica a curto prazo. Como foi constatado neste experimento, pois na terceira coleta houve um incremento de

MO devido aos níveis de palhiço, onde havia 100% de manutenção alcançou os maiores valores (33,80 g kg^{-1}), seguindo a mesma tendência dos resultados de *q*MIC (Quadro 5).

De acordo Arruda et al. (2019), a matéria orgânica apresenta cercar de 80% do P total do solo, e aproximadamente 95% do N e S, dependentes somente dos processos de mineralização para que ocorra a disponibilização ao sistema vegetal. Assim manter altos níveis de palhiço em campo garantirão estoque de nutrientes disponíveis em longo prazo.

A qualidade biológica do solo deve ser avaliada diante de diferentes parâmetros e organismos, e os indivíduos da macrofauna são tão eficientes quanto os microrganismos em aferir perturbações ou estresses ambientais por causas antrópicas. Entre os atributos da fauna edáfica temos a densidade que indica a quantidade de indivíduos por m^2 e a riqueza de organismos, que equivale ao número total de grupos em cada sistema. Na primeira avalição (setembro/2018) não houve significância ou interação entre os sistemas em nenhuma profundidade avaliada (Quadro 8).

QUADRO 8. Densidade e riqueza de organismos da fauna edáfica em plantio direto e preparo convencional de cana-de-açúcar, e em função dos níveis de palhiço remanescente na primeira avaliação da safra, nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm

	Riqueza (n° de grupos)	Densidade (indivíduos m^2)	Riqueza (n° de grupos)	Densidade (indivíduos m^2)
	0-10 cm		10-20 m	
	Setembro/2018			
Preparo de solo				
PD	2,08 a	9,33 a	1,16 a	2,58 a
PC	2,33 a	10,00 a	1,25 a	11,58 a
CV (%)	40,99	175,66	88,86	164,71
Palhiço (%)				
0	1,87 a	5,00 a	1,12 a	2,25 a
50	2,25 a	8,37 a	1,37 a	6,25 a
100	2,50 a	15,62 a	1,12 a	12,75 a
CV (%)	38,11	115,26	87,78	224,11
Teste F				
Preparo x Palhiço	$1,235^{ns}$	$0,339^{ns}$	$0,593^{ns}$	$0,907^{ns}$
	Novembro/2018			
Preparo de solo				
PD	3,58 b	7,75 b	2,33 b	20,66 b
PC	3,66 a	13,91 a	2,58 a	22,58 a
CV (%)	29,62	9,91	43,67	4,96
Palhiço (%)				
0	3,87 a	6,25 c	2,37 b	18,37 b

...continua...

“QUADRO 9. Cont.”

50	3,75 b	9,75 b	2,87 a	30,00 a
100	3,25 c	16,50 a	2,12 c	16,50 c
CV (%)	29,26	9,79	43,15	4,90
Teste F				
Preparo x Palhiço	0,259*	301,03*	3,111*	6,259*
		Março/2019		
Preparo de solo				
PD	4,33 a	17,75 b	3,58 a	25,41 b
PC	4,16 b	33,91 a	3,16 b	30,58 a
CV (%)	25,26	4,16	31,81	3,83
Palhiço (%)				
0	4,37 a	21,12 c	3,37 b	21,12 c
50	4,37 a	27,00 b	3,75 a	35,37 a
100	4,00 b	29,37 a	3,00 c	27,50 b
CV (%)	24,96	4,11	31,43	3,79
Teste F				
Preparo x Palhiço	0,037*	391,37*	0,481*	23,593*
		Julho/2019		
Preparo de solo				
PD	4,16 a	20,91 b	4,08 a	15,91 b
PC	3,83 b	24,50 a	3,83 b	21,41 a
CV (%)	26,84	4,73	27,12	5,75
Palhiço (%)				
0	4,12 a	21,75 c	4,00 a	13,12 c
50	4,00 b	22,37 b	3,87 b	19,50 b
100	3,87 c	24,00 a	4,00 a	23,37 a
CV (%)	26,52	4,67	26,80	5,68
Teste F				
Preparo x Palhiço	0,259*	91,593*	0,111*	30,333*

Médias seguidas por letras minúsculas iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. PD: plantio direto, PC: preparo convencional.

A ausência de significância entre os sistemas é devido à baixa densidade comparada às demais coletas, se deve pela perturbação com os manejos de colheita mecanizada e de recolhimento de palha, pois em sistemas de monocultura e alta intensidade de uso do solo, a recuperação da macrofauna tende a ser mais lenta (VASCONCELOS et al., 2020). Aliado a fatores climáticos, pois a avaliação no mês de setembro de 2018, demonstrou a população da macrofauna após o inverno, com baixas temperaturas e baixa pluviosidade (Figura 1), que pode ter provocado estresse aos organismos edáficos.

Para as demais coletas, riqueza e densidade tiveram interação significativa ($p<0,05$) entre os sistemas de plantio e níveis de palhiço nas duas profundidades (Quadro 8). Entre os preparos de solo as áreas com PC tiveram maior riqueza em ambas as

profundidades no mês de novembro de 2018. Nas demais avaliações o PC foi superior para densidade e o PD para a riqueza.

Contrariando a teoria de que ambientes com maior oferta de alimento, com maior diversidade vegetal, o maior aporte de palhiço na superfície poderia ser benéfico, que resultaria em maior biodiversidade de grupos taxonômicos (AMAZONAS et al., 2018), neste estudo as áreas com retirada total de palha se destacaram ao longo da safra. De acordo com Correia et al. (2018) somente há uma estabilização dos índices de riqueza em ambientes após sete anos sem que haja manejos de cultivos, portanto em sistemas mecanizados de cana-de-açúcar onde há frequentes intervenções, a riqueza de grupos pode não ter um padrão estabelecido.

Na profundidade de 0-10 cm as áreas com 50 e 100% de palhiço a densidade de organismos foi superior ($p<0,05$) nas ultimas três últimas avaliações no PC (Quadro 8), contudo as maiores riquezas se concentraram nos sistemas com 0%. Na camada de 10-20 cm o sistema com 50% de palhiço apresentou maior densidade e riqueza nas coletas de novembro/2018 e março/2019, já na última avaliação a área com 100% se destacou ($p<0,05$) das demais (Quadro 8). Através da diminuição dos efeitos e perturbações da superfície do solo provocadas pelos manejos no sistema, e após 5 anos dos preparos mais intensos realizados no plantio garantiram maior estabilidade e microclima adequado nas maiores profundidades (GULLAN e CRASTON, 2017).

Houve interação significativa ($p<0,05$) entre os fatores preparo e palhiço remanescente para riqueza e densidade em ambas profundidades a partir da segunda avaliação realizada em novembro de 2018 (Quadro 9). A riqueza de grupos na profundidade de 0-10 cm se manteve constante nas três avaliações, variando de 4 a 4,5 grupos, com destaque nas áreas com 0% de palhiço no PD (Quadro 9), indicando pouca influência dos níveis de palhiço remanescentes em atrair maior diversidade de organismos. Ambientes com diversidade vegetal, geram maior e melhor oferta alimentar aos grupos taxonômicos, que permite a presença de diferentes grupos funcionais (SARDO e LIMA, 2019), contudo não há diversidade vegetal no cultivo de cana-de-açúcar, o que explica a pouca biodiversidade.

QUADRO 9. Riqueza de organismos da fauna edáfica em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC) de cana-de-açúcar, em função dos níveis de palhiço remanescente em diferentes épocas de coleta, e nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm

	Riqueza de organismos (nº de grupos)					
	Palhiço (%)					
Preparo de solo	0	50	100	0	50	100
	0 – 10 cm			10 – 20 cm		
	Novembro/2018					
PD	4 aA	3,75 bB	3,25 aC	3,25 aA	2,75 bB	1,75 bC
PC	3,75 bB	4 aA	3,25 aC	1,5 bC	3 aA	2,5 aB
	Março/2019					
PD	4,5 aA	4,5 aA	4 aB	3,5 aB	3,75 aA	3,5 aB
PC	4,25 bA	4,25 bA	4 aB	3,25 bB	3,75 aA	2,5bC
	Julho/2019					
PD	4,5 aA	4 aB	4 aB	4,25 aA	4 aB	4 aB
PC	3,75 bB	4 aA	3,75 bB	3,75 bB	3,75 bB	4 aA

Médias seguidas por letras minúsculas iguais na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. PD: plantio direto, PC: preparo convencional.

Quanto às interações na camada de 0-10 cm de profundidade, observou-se grande influência do sistema com 100% de manutenção de palhiço no PC, superior aos demais níveis nas três coletas (Quadro 10). Uma grande abundância de organismos não é um indicativo de solo saudável, deve haver um equilíbrio com a biodiversidade, tanto vegetal como de organismos vivos. Assim cultivos de cana-de-açúcar tendem a perder sua biodiversidade devido ao sistema de monocultura altamente mecanizado. Por isso a manutenção de palhiço no campo pode favorecer a ocorrência de organismos, como ocorreu no sistema com 100% de palhiço.

Pant et al. (2017) afirmam que a manutenção de palhada no solo promove maior abundância e riqueza da macrofauna, devido seu importante papel na fragmentação da serapilheira, impulsionando melhorias na qualidade do solo. Corroborando com outros autores que a remoção total de palhiço do campo em sistemas de cana-de-açúcar potencializam a perda do número de organismos da macrofauna do solo (PORTILHO et al., 2011; MENANDRO et al., 2019).

QUADRO 10. Densidade de organismos da fauna edáfica em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC) de cana-de-açúcar, e em função dos níveis de palhiço remanescente em diferentes épocas de coleta, e nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm

Densidade de organismos (indivíduos m^2)						
	Palhiço (%)					
Preparo de solo	0	50	100	0	50	100
	0 – 10 cm			10 – 20 cm		
	Novembro/2018					
PD	9,5 aA	7 bB	6,75 bC	16,5 aB	30 aA	15,5 bC
PC	3 bC	12,5 aB	26,25 aA	20,25 bB	30 aA	17,5 aC
	Março/2019					
PD	16,75 bB	23,75 bA	12,75 bC	20 bC	30,75 bA	25,5 bB
PC	25,5 aC	30,25 aB	46 aA	22,25 aC	40 aA	29,5 aB
	Julho/2019					
PD	23 aA	21,5 bB	18,25 bB	10,2 bC	22,75 bA	14,75 bB
PC	20,5 bC	23,25 aB	29,75 aA	16 aC	24 aB	24,25 aA

Médias seguidas por letras minúsculas iguais na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. PD: plantio direto, PC: preparo convencional.

Com relação as interações na camada de 10-20 cm de profundidade, a densidade de organismos se destacou no nível de 50% de manutenção nas coletas de novembro/2018 e de março/2019, enquanto que na última avaliação (julho/2019) 100% de manutenção alcançou a maior densidade no PC. Para o preparo de solo houve maior densidade no PC, na primeira coleta com 100% de palha, e nas duas últimas coletas para todos os níveis de palha (Quadro 10). A combinação de 50% de palhiço no PC propiciou a maior densidade de organismos na coleta do mês de março de 2019, alcançando 40,0 indivíduos por m^2 (Quadro 10). Corroborando com Franco et al. (2016), que observaram aumento da diversidade da macrofauna em áreas que manutenção de 50% ou mais de palhiço no cultivo de cana-de-açúcar em maiores profundidades, assim esse maior aporte de palhiço na superfície garante um bom microclima aos organismos.

Um fator importante que pode ser observado a partir da densidade de organismos é que o PC se manteve com destaque na terceira e quarta coleta na profundidade de 10-20 cm (Quadro 10). Isso pode ser resultado da melhoria na qualidade física do solo das áreas, que receberam grande revolvimento para plantio da cana, em razão da melhoria estrutural com influência nos macroporos onde há grande movimentação de organismos.

Quanto à frequência relativa (FR) dos principais grupos taxonômicos, observou-se a predominância das ordens Hymenoptera e Isoptera e principalmente da família Formicidae nos sistemas na camada mais superficial de 0 a 10 cm (Quadro 11). As formigas se destacaram nas duas profundidades de amostragem e manteve presença em todos sistemas. As maiores frequências deste grupo foram observadas no PC com 50% (78,57%) e 100% (66,66%) de palhiço remanescente em setembro/2018 na camada de 10-20 cm. Contudo nas demais avaliações a predominância das formigas foi na camada de 0-10 cm, devido a maior proximidade dos resíduos vegetais da superfície (Quadro 11).

As formigas desempenham papel de fitófagos, e participam de diversas funções ecológicas como na aeração do solo, dispersão de sementes e no processo de decomposição de resíduos vegetais (CREPALDI et al., 2014; BRITO et al., 2016). Neste estudo sua dominância entre os demais grupos se manteve até a última avaliação na camada de 0-10 cm (Quadro 11). Em áreas com monocultivo intensivo, é comum a redução da diversidade de organismos da fauna edáfica, que favorece a abundância de grupos mais competitivos como a família Formicidae que são capazes de se adaptar em ambientes com pouca diversidade vegetal (GUTIÉRREZ et al., 2017). Fato que explica a grande frequência nas áreas com 0% de palhiço no mês de novembro/2018, a menor oferta alimentar facilitou a colonização deste grupo em relações aos demais.

O grupo Isoptera teve maior frequência na camada de 10-20 cm, em ambos preparos de solo e níveis de palhiço, sua maior presença (71,57%) foi no sistema 0% no PC em março de 2019 (Quadro 11). Portilho et al. (2011) destacam a maior presença destes organismos nas camadas mais profundas, e sua estreita ligação com decompositores no solo. Os isópteros, conhecidos como cupins, assimilam produtos oriundos da decomposição dos resíduos, como celulose, hemicelulose e amido, portanto atuam diretamente no processo de decomposição da palha em campo (MEDEIROS et al., 2004; BRITO et al., 2016).

QUADRO 11. Frequência relativa de organismos, diversidade de Shannon e Equitabilidade de Pielou da macrofauna edáfica em função do plantio direto (PD) e preparo convencional (PC) em níveis de palhiço remanescente no solo, nas profundidades de 0-10 cm e10-20 cm em quatro épocas de avaliação

Frequência relativa de organismos (%)												
	Setembro/2018											
Organismos	PD			PC			PD			PC		
	Palhiço (%)											
	0	50	100	0	50	100	0	50	100	0	50	100
	----------0-10 cm----------						----------10-20 cm----------					
Diplura	6,90	3,70	75,86	7,50	-	5,26	-	7,14	11,11	-	-	-
Formicidae	3,45	24,07	3,45	10,00	25,35	60,53	37,5	78,57	66,66	30	27,27	26,88
Hymenoptera*	68,97	64,81	6,90	7,50	69,01	7,89	-	-	-	-	22,72	-
Isoptera	6,90	1,85	6,90	-	1,41	23,68	37,5	-	-	30	50	68,81
L. Coleoptera	3,45	1,85	6,90	2,50	1,41	-	25	14,28	22,22	30	-	-
Oligochaeta	10,34	3,70	-	-	2,82	2,63	-	-	-	10	-	4,301
Índice de Shannon	0,487	0,416	0,397	0,477	0,285	0,475	0,408	0,316	0,368	0,570	0,352	0,312
Equitabilidade de Pielou	0,060	0,052	0,044	0,068	0,023	0,052	0,081	0,052	0,122	0,142	0,070	0,052
	Novembro/2018											
Organismos	PD			PC			PD			PC		
	Palhiço (%)											
	0	50	100	0	50	100	0	50	100	0	50	100
	----------0-10 cm----------						----------10-20 cm----------					
Diplura	7,58	1,67	-	3,70	2,50	7,14	5,26	7,14	3,70	8,33	2,00	-
Formicidae	62,12	48,33	35,48	50,62	34,17	64,29	28,95	39,29	33,33	25,00	46,00	25,71
Hymenoptera*	18,18	39,17	27,42	16,05	40,00	4,29	13,16	-	-	-	42,00	-
Isoptera	3,03	7,50	30,65	24,69	20,00	20,00	34,21	39,29	51,85	33,33	6,00	69,52
L. Coleoptera	3,03	0,83	3,23	1,23	1,67	2,86	10,53	7,14	7,41	25,00	2,00	0,95
Oligochaeta	6,06	2,50	3,23	3,70	1,67	1,43	7,89	7,14	3,70	8,33	2,00	3,81
Índice de Shannon	0,353	0,337	0,366	0,358	0,344	0,363	0,486	0,416	0,471	0,610	0,380	0,275
Equitabilidade de Pielou	0,022	0,024	0,028	0,023	0,021	0,027	0,037	0,037	0,067	0,101	0,031	0,027

...continua...

“QUADRO 11, cont.”

Organismos	Março/2019											
	PD			PC			PD			PC		
	Palhiço (%)											
	0	50	100	0	50	100	0	50	100	0	50	100
	0-10 cm						10-20 cm					
Diplura	10,00	4,07	3,92	4,49	1,25	4,24	1,49	3,16	3,92	1,96	0,83	1,09
Formicidae	47,50	56,91	51,96	52,81	54,38	72,88	32,84	31,58	17,65	18,63	57,02	41,85
Hymenoptera*	20,00	28,46	16,67	14,61	28,75	5,08	10,45	15,79	21,57	2,94	4,96	2,72
Isoptera	16,25	7,32	23,53	22,47	11,88	14,41	47,76	45,26	47,06	71,57	33,88	51,63
L. Coleoptera	2,50	1,63	0,98	2,25	1,25	2,54	4,48	2,11	5,88	3,92	1,65	0,54
Oligochaeta	3,75	1,63	2,94	3,37	2,50	0,85	2,99	2,11	3,92	0,98	1,65	2,17
Índice de Shannon	0,353	0,300	0,339	0,343	0,306	0,293	0,376	0,368	0,413	0,326	0,304	0,282
Equitabilidade de Pielou	0,019	0,016	0,021	0,020	0,018	0,018	0,026	0,024	0,029	0,025	0,020	0,028

Organismos	Julho/2019											
	PD			PC			PD			PC		
	Palhiço (%)											
	0	50	100	0	50	100	0	50	100	0	50	100
	0-10 cm						10-20 cm					
Diplura	9,76	5,49	6,78	6,25	2,08	1,03	2,17	3,49	2,74	3,66	2,15	4,20
Formicidae	31,71	58,24	35,59	31,25	54,17	59,79	18,48	37,21	26,03	24,39	36,56	43,70
Hymenoptera*	19,51	13,19	20,34	7,81	13,54	4,12	8,70	6,98	15,07	6,10	2,15	2,52
Isoptera	26,83	19,78	32,20	51,56	26,04	28,87	60,87	47,67	46,58	60,98	54,84	44,54
L. Coleoptera	7,32	2,20	3,39	1,56	1,04	3,09	4,35	2,33	5,48	3,66	3,23	1,68
Oligochaeta	4,88	1,10	1,69	1,56	3,13	3,09	5,43	2,33	4,11	1,22	1,08	3,36
Índice de Shannon	0,391	0,334	0,370	0,347	0,332	0,323	0,334	0,332	0,374	0,331	0,305	0,320
Equitabilidade de Pielou	0,021	0,020	0,023	0,023	0,020	0,021	0,019	0,020	0,023	0,022	0,020	0,020

* Exceto Formicidae. L. Coleoptera: larva de coleoptera. PD: plantio direto, PC: preparo convencional

Esse grupo também é conhecido como “engenheiro do ecossistema”, devido as funções ecológicas citadas anteriormente, e sua presença nos sistemas de cultivo são bons indicativos de manejo (FERREIRA et al., 2011). Assim como a ocorrência do grupo Oligochaeta, representados pelas minhocas, são frequentes nas camadas mais profundas, atuam como ótimos indicadores de qualidade do solo, devido sua influência nas formações de bioporos no solo e dinâmica da matéria orgânica (LAVELLE, 1996). Neste estudo o grupo com menor frequência relativa em todos sistemas foi de Oligochaeta, não ultrapassando a porcentagem de 10,34% (Quadro 11). Mesmo que em menor número, sua presença em um sistema de monocultivo de cana-de-açúcar indica um ambiente com qualidade biológica, o sistema estava mais estável em sua última safra (2018/2019). Apesar das funções ecológicas dos grupos Formicidae e Isoptera, sua presença com grande densidade, em detrimento da diversidade de outros grupos pode prejudicar áreas cultivadas (GULLAN e CRANSTON, 2017).

Para avaliação da biodiversidade da fauna edáfica deve ser feita além da quantificação de sua riqueza de grupos, o cálculo de índices de diversidade. O índice de diversidade de Shanon (H’) é importante indicador utilizado nos estudos edáficos, ele determina a dominância de certos grupos, varia de 0 a 5, quanto maior seu índice, melhor será a diversidade (SILVA et al., 2013). Neste estudo o nível de 0% de palhiço apresentou os maiores índices, alcançando seu máximo de 0,610 no PD na profundidade de 10-20 cm (Quadro 11). Em geral o índice de Shannon segue a tendência da riqueza de grupos, de acordo com Souto et al. (2008), está interligado com o número de espécies e suas quantificações no sistema, então quanto menor a variação da riqueza no ambiente, maior será o índice.

Para o índice de equitabilidade de Pielou os menores valores foram verificados na terceira e quarta época (março e julho/2019), seguindo a tendência do índice de Shannon (Quadro 11). A equitabilidade de Pielou varia de 0 a 1 e determina a dominância de determinados grupos (PASQUALIN et al., 2012), ou seja, um sistema com maior equitabilidade, e uma boa distribuição de grupos, irá refletir no aumento desse índice (SANTOS, et al., 2015).

Ambientes mais estressantes e com grande abundância de organismos tendem a ter a predominância de certos grupos, o que reduz a equitabilidade do índice de Pielou (NUNES et al., 2008). Como pode ser observado no Quadro 11, o menor índice (0,016) ocorreu no mês de março de 2019 no sistema com 50% de palhiço na camada de 0-10 cm,

a grande presença de Formicidae (56,96%) prejudicou a equitabilidade, ou seja, a distribuição entre os demais grupos foi desuniforme.

Todos os índices de diversidade estão correlacionados com a densidade e riqueza de organismos, diante disso é importante compreender sua distribuição o sistema (WALKER, 1989). Quando há a extinção de certos grupos edáficos e perdas de suas ações no solo, pode acarretar sérias consequências, como a queda na fertilidade e ciclagem de nutrientes (BEDANO et al., 2016). Assim como compreender a influência que os sistemas de cultivo têm com a atividade da fauna edáfica, é imprescindível para alcançar a preservação da qualidade do solo (SILVA et al., 2019).

A manutenção de 100% de palhiço em campo beneficiou melhores valores de C-BMS, incremento na matéria orgânica e maior abundância de organismos da macrofauna, que resultarão em melhorias na produtividade da cultura.

4.2 Decomposição do palhiço de cana-de-açúcar

A taxa de decomposição do palhiço residual que permaneceu em campo ao fim de cada safra foi quantificada, observando-se que o preparo de solo o uso da escarificação (SE e CE) não influenciou ($p>0,05$) até a safra 2017/18 (Figura 6).

Na primeira soqueira não houve influência ($p>0,05$) em nenhum sistema (Figura 6A), somente a partir da safra 2015/16 (Figura 6B), em que a maior retirada de palhiço do campo (0%) acelerou a decomposição de massa vegetal, chegando a decompor 83,9% do palhiço remanescente (1,31 Mg ha^{-1}). A alta precipitação na safra 2015/16 (Figura 1) pode explicar a diferença na taxa de decomposição entre os níveis de palhiço, (Figura 6B).

O mesmo padrão de maior decomposição com a retirada total de palhiço permaneceu na safra de 2016/17, onde as áreas com 0% de palhiço alcançaram 88,42% decompostos, semelhante ($p<0,05$) ao 100% de manutenção com 73,17% (Figura 6C). Já na safra 2017/18 não houve diferença significativa entre os níveis de (Figura 6D).

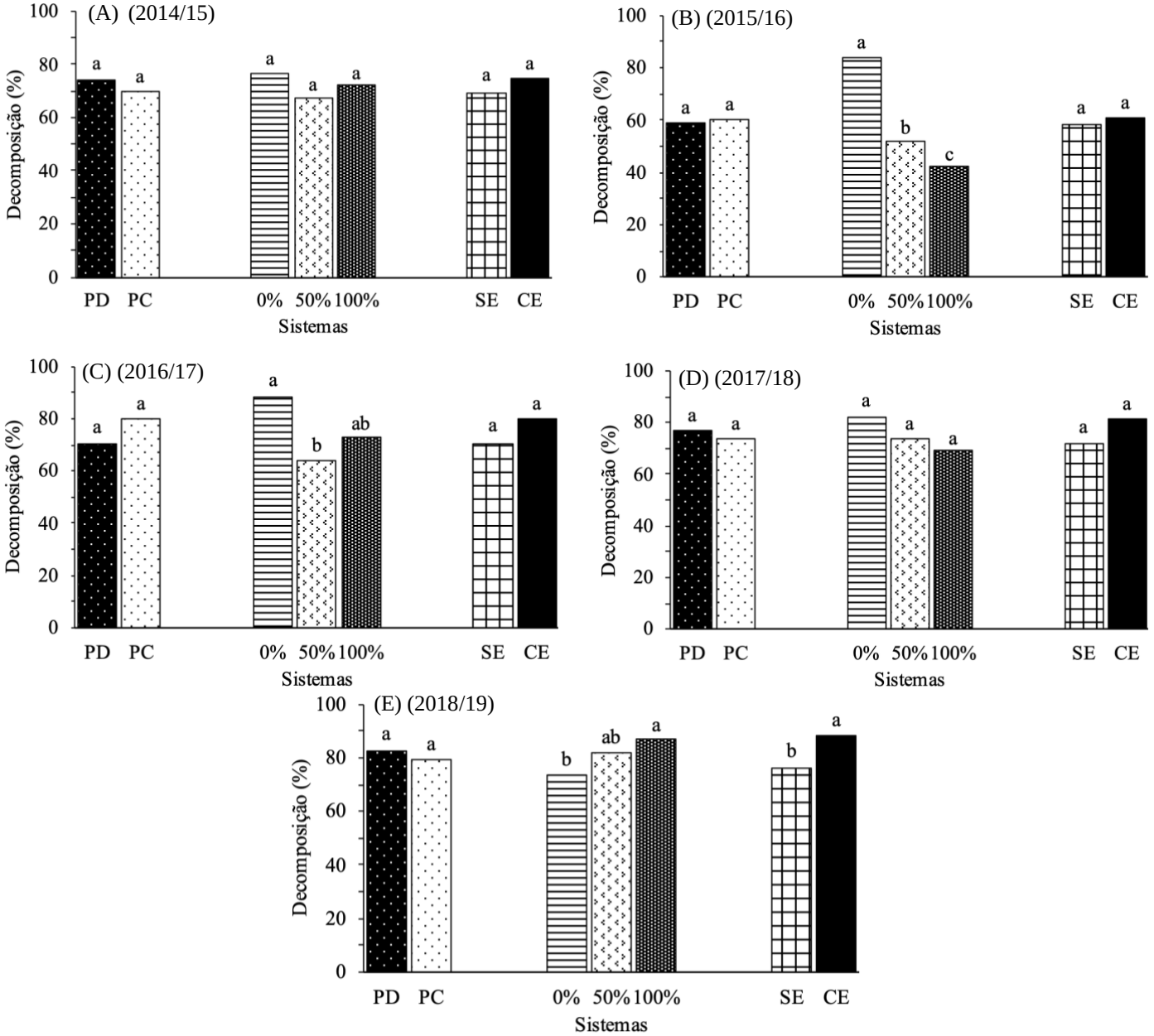


FIGURA 6. Decomposição de palhiço da cana-de-açúcar, em função do sistema de plantio, níveis de palhiço e manejo com e sem escarificação, nas safras de 2014/15 (A), 2015/16 (B) e 2016/17 (C), 2017/18 (D) e 2019/19 (E) Dourados, MS/Brasil. PD: plantio direto, PC: preparo convencional, SE: sem escarificação, CE: com escarificação.

A taxa de decomposição do palhiço na safra 2018/19 foi significativa ($p<0,05$) para os níveis de palhiço e uso da escarificação (Figura 6E). Apenas na quinta soqueira os maiores níveis de palhiço remanescente (50 e 100%) tiveram maior decomposição, 82,04 e 87,27%, respectivamente. O maior aporte de palhiço no solo e sua maior decomposição é observada por diversos autores, que relacionam tal resposta ao ambiente (umidade e temperatura) favorável a atividade microbiana (FORTES et al., 2012; PIMENTEL et al., 2019).

Corroborando com os resultados de C-BMS em julho de 2019 (Quadro 5), período da última avaliação de palhiço residual, o sistema com 100% de manutenção indicou maior C-BMS, C-CO_2, *q*MIC e MOS, além da perturbação que a retirada total de palhiço provocou aos microrganismos neste período. Portanto a ação microbiana foi responsável pela maior decomposição na quinta soqueira em áreas com maior aporte de palhiço no solo.

O uso da escarificação foi significativo apenas na última safra (Figura 6E), em que áreas com escarificação tiveram taxa de 85,98% de decomposição de massa de palhiço mantido sobre o solo ao fim da safra. Áreas com escarificação normalmente apresentaram maior taxa de decomposição, pois o material vegetal fica em maior contato com o solo, tornando então esse palhiço mais susceptível à atividade microbiana presente no solo (MARTINS, 2016). Fortes et al. (2012) observaram decomposição de 72% ao final de uma safra em áreas com incorporação da palha durante o uso de escarificador, corroborando com este estudo na quinta soqueira da cultura.

A massa seca remanescente de palhiço na safra 2018/19 apresentou melhor ajuste quadrático para o nível de 100% (CE e SE), e as áreas com 50% (CE e SE) com tendência de queda linear em plantio direto (PD) (Figura 7A), enquanto no preparo convencional (PC) somente 100% sem escarificação (SE) teve ajuste quadrático (Figura 7B). A maior perda de massa ocorreu até os 63 dias para todos níveis de palhiço e sistemas de plantio (Figura 7), após esse período houve certa estabilização.

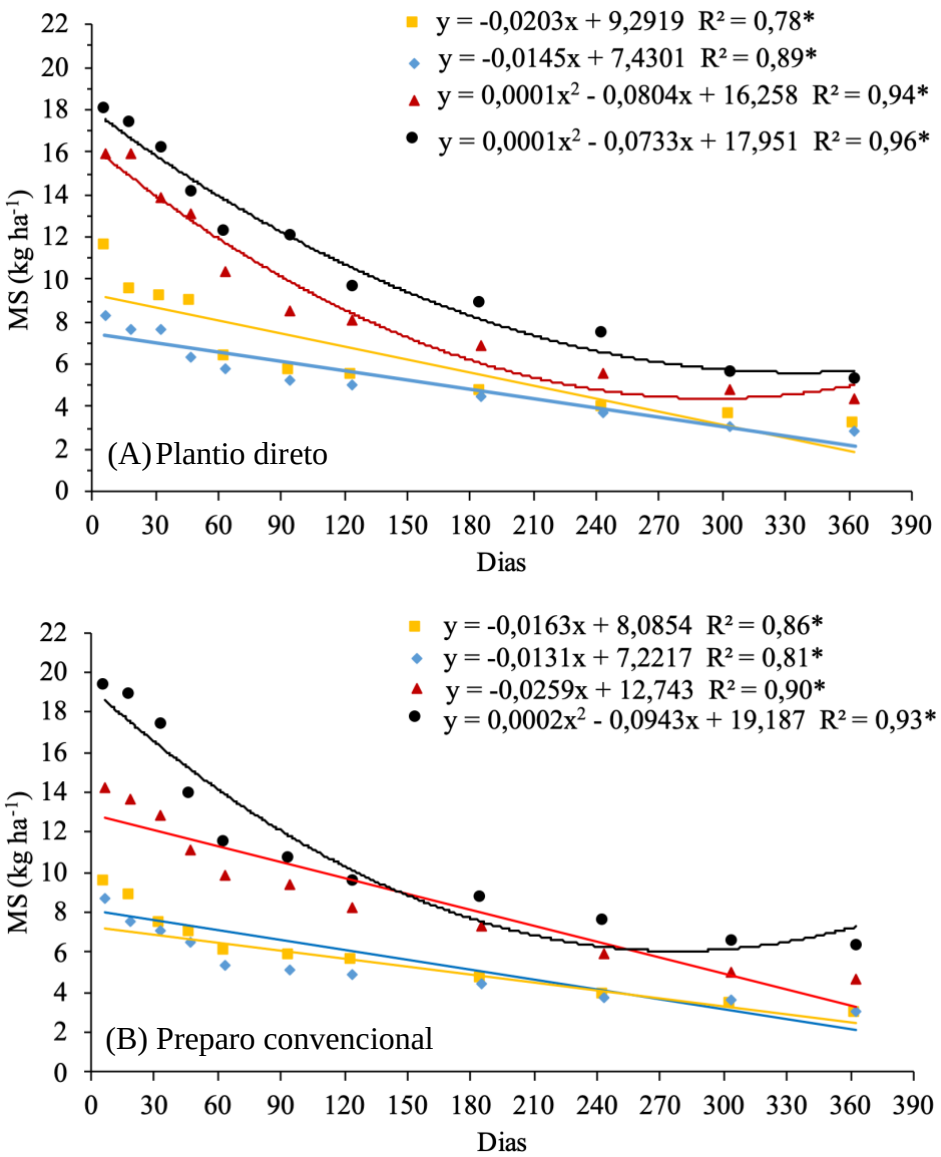


FIGURA 7. Massa seca de palhiço de cana-de-açúcar em plantio direto (A) e preparo convencional (B), respectivamente, em função do tempo de decomposição e níveis de palhiço remanescente e manejo com escarificação. 50% com escarificação (◆), 50% sem escarificação (■), 100% com escarificação (▲) e 100% sem escarificação (●). * e ** Significativo a 5% e 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

Na fase inicial de decomposição há grande quantidade de componentes facilmente decomponíveis, como proteínas, carboidratos e açúcares, que facilitam a rápida decomposição (ABIVEN et al., 2005; SOUZA JÚNIOR et al., 2017). Em contraste nas fases posteriores, a lenta decomposição é reflexo de componentes mais recalcitrantes como celulose e lignina que permanecem na palha (JENSEN et al., 2005). Outros autores relataram padrão semelhante na dinâmica de decomposição, onde avaliaram níveis de remoção de palhiço de cana-de-açúcar no estudo da decomposição e liberação de

nutrientes, e ocorreu essa queda acentuada na massa seca nos primeiros dois meses, e posterior estabilização (SOUSA JÚNIOR et al., 2017; PIMENTEL et al., 2019).

Outro fator que pode interferir de forma significativa na decomposição acelerada na fase inicial (até os 63 dias) são fatores climáticos, segundo Austin e Ballaré (2010), altos volumes de chuva induzidos a radiação ultravioleta favorecem a decomposição de material vegetal na superfície. Para as condições experimentais, nota-se que após a definição dos níveis de palhiço na safra de 2018/19 (agosto/2018), a precipitação nos 60 dias seguintes obteve média de 197 mm (Figura 1), aliado a altas temperaturas, favoreceram a decomposição. Cabe lembrar que as plantas de cana-de-açúcar estavam na fase de brotação, o que favoreceu ainda mais para incidência direta de luz sobre o palhiço.

A menor liberação de massa, indica lenta decomposição, que nas condições experimentais ocorreu a partir dos 184 dias (Figura 8), que correspondeu ao mês de março de 2019, em resposta à redução drástica da pluviosidade e temperaturas mais amenas a partir deste mês (Figura 1). Supõe-se que as condições edafoclimáticas tenham reduzido a atividade microbiana, devido a redução da umidade e temperatura, aliado a maior concentração de lignina na fase final da dinâmica de decomposição de palhiço. Resultados semelhantes foram encontrados por Yang et al. (2020) e Wang et al. (2021), que também atribuíram a menor taxa de decomposição a estes fatores.

Ao final da safra os sistemas com 50 e 100 de manutenção com e sem escarificação mantiveram sobre o solo uma média de 29,58% do palhiço remanescente no sistema plantio direto. Já no preparo convencional este palhiço residual representava 32,9% (2,97, 3,06, 4,63 e 6,33 Mg ha^{-1}, para 50%SE, 50%CE, 100%CE e 100%SE, respectivamente), do total deixado sobre o solo (Figura 8B). O efeito deste palhiço residual sobre o novo resíduo não foi abordado neste estudo, mas outros autores definem como “efeito legado”, quando é feita uma avaliação para definir se o tipo ou qualidade do resíduo antigo pode influenciar na dinâmica de decomposição e ciclagem de nutrientes (ZHENG et al., 2017).

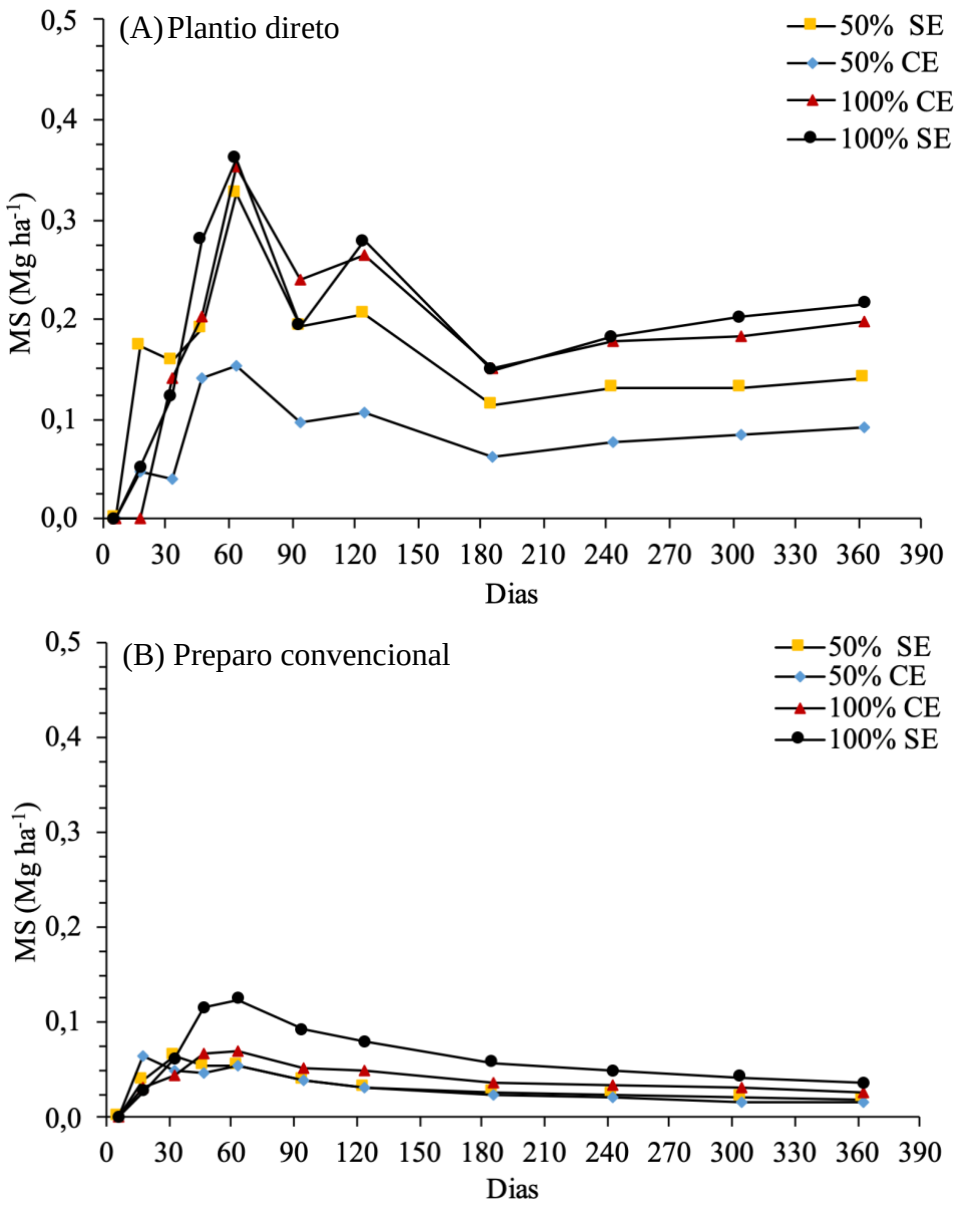


FIGURA 8. Liberação de massa seca de palhiço de cana-de-açúcar em plantio direto (A) e preparo convencional (B), respectivamente, em função do tempo de decomposição, níveis de palhiço remanescente e manejo com (CE) e sem escarificação (SE).

A liberação de massa de palhiço apresenta tendência contrária a massa seca remanescente, pois é calculada através da constante de decomposição k em função do aporte inicial de palha (Figura 8). As áreas com maior aporte de palha (100%) independente do uso da escarificação se destacaram com alta decomposição, e apresentaram maiores valores de k (constante de decomposição), com 0,0069 dia^{-1} (100% CE) e 0,0061 dia^{-1} (100% SE) aos 63 dias (Figura 8A). A tendência de maior liberação de massa seca em áreas com maior aporte de palhiço corroboraram com outros autores em estudos semelhantes (SOUSA et al., 2017; ZHENG et al., 2017). Fato que é explicado pela maior ação da microbiota do solo nas áreas com maior aporte de massa na superfície,

e como aumento da oferta de alimento e fonte de energia para os microrganismos, principalmente nos estágios inicias de decomposição (PIMENTEL et al., 2019).

Para o PD houve a máxima de liberação de 0,361 Mg ha^{-1} para 100% SE, e 0,327 Mg ha^{-1} para 50% SE, entre os 30 e 60 dias após a colheita da cana (Figura 8A). Estes resultados evidenciam mais uma vez que a maior liberação de massa não está ligada somente ao aporte de palhiço, e sim com a constante de k para cada sistema de manejo, que é dependente das condições edafoclimáticas e biológicas do ambiente. Os mesmos tratamentos no PC tiveram comportamentos completamente diferentes, e com menor liberação, para 100% SE a máxima foi de 0,125 Mg ha^{-1} liberado no mesmo período (Figura 8B).

O pico da liberação de massa foi aos 63 dias, neste período o tratamento com menor aporte de palhiço (remoção 50% CE) promoveu a maior velocidade de decomposição (k) no PD, com velocidade de 0,0095 dia^{-1} e tempo de meia vida (t ½) de 72,7 dias, enquanto que no PC a maior velocidade foi de 0,0082 dia^{-1} com t ½ de 84,1 dias para 100% SE (Apêndice 1). Após os 185 dias no PC a velocidade de decomposição não ultrapassou 0,003 dia^{-1} independentemente do nível de palhiço remanescente (Figura 8B), que reflete a liberação de massa em função dessa constante, havendo uma pequena queda e posterior estabilização na liberação e decomposição. Para o PD todos tratamentos tiveram uma estabilização na decomposição após os 243 dias de manutenção do palhiço (Figura 8A).

A resposta de maior liberação de massa no PD pode estar relacionada a formação de uma camada de palhiço sem interferências (preparo e revolvimento do solo entre os ciclos de cana), com melhor umidade no solo (CORREA et al., 2017), estoque de carbono (BORDONAL et al., 2018) e atividade biológica (PAREDES JUNIOR et al., 2015). Mesmo que o preparo de solo que diferiu entre os sistemas tenha ocorrido somente há cinco anos durante o plantio da cana planta, pode haver efeito residual que influencia a dinâmica de decomposição, como pode ser observado no Quadro 3 onde na safra 2018/19 o PC teve decomposição de 79,11%, enquanto que o PD alcançou 82,72% de palhiço decomposto ao fim da safra.

Nas três primeiras soqueiras a retirada total de palhiço resultou na maior decomposição de massa, contudo após este período 100% de manutenção foi superior, aliado ao uso da escarificação nas entrelinhas da soqueira, na última safra. Com o aumento de decomposição nestes períodos indica a estabilização dos sistemas e melhoria da qualidade do solo, confirmada com as análises biológicas (Quadro 5 e 9).

4.3 Decomposição do palhiço e ciclagem de nutrientes

A decomposição do material vegetal está relacionada com a quantidade de carbono, nitrogênio e sua relação (C/N). O carbono (C) é o fator determinante na construção da matéria orgânica (CASTIONI et al., 2019), e a entrada de C através da deposição de resíduos vegetais na superfície é um dos principais e mais vantajosos manejos, para garantir estoque constante no solo (CARVALHO et al., 2016; PIMENTEL et al., 2019).

Nos primeiros quatro anos de experimento as avaliações foram realizadas no início (após a definição dos níveis de palhiço) e no fim de cada safra (antes da colheita). Na primeira soca de 2014/15 não houve interação entre nenhum dos fatores (preparo x palha x escarificação) (Quadro 12). Os níveis de palhiço influenciaram no teor C, onde 100% de manutenção proporcionou maior teor no início da safra (419,61 g kg^{-1}), que em reposta aumentou a relação C/N neste mesmo período (113/1), quando comparado aos demais níveis de palhiço dentro da mesma época de avaliação (Quadro 12).

QUADRO 12. Teor de carbono (C), nitrogênio (N) e relação carbono/nitrogênio (C/N) do palhiço de cana-de-açúcar ao longo de um ano de decomposição em função de níveis de palhiço remanescente, uso de escarificação em plantio direto e preparo convencional na safra 2014/15

	Início de safra[1]			Fim de safra[2]		
	C	N	C/N	C	N	C/N
	g kg^{-1}			g kg^{-1}		
Preparo de solo						
PD	397,23 a	3,85 a	104,16 a	334,56 a	6,82 a	49,23 a
PC	398,51 a	3,75 a	106,86 a	349,28 a	7,08 a	49,63 a
CV (%)	3,82	7,80	7,63	17,92	9,99	16,43
Palhiço (%)						
0	376,21 c	3,73 a	101,40 b	344,11 a	6,95 a	49,72 a
50	397,79 b	3,93 a	101,93 ab	339,39 a	6,71 a	50,87 a
100	419,61 a	3,73 a	113,20 a	342,26 a	7,19 a	47,7 a
CV (%)	3,58	12,03	11,47	10,43	8,69	10,23
Escarificação						
SE	401,18 a	3,81 a	106,23 a	341,37 a	7,35 a	46,47 b
CE	394,55 a	3,79 a	104,79 a	342,46 a	6,56 b	52,39 a
CV (%)	4,03	9,22	8,33	11,81	9,84	7,40

...continua...

“QUADRO 13. Cont.”

Teste F						
Preparo x Palhiço	0,443^{ns}	2,449^{ns}	1,757^{ns}	0,291^{ns}	0,265^{ns}	0,655^{ns}
Escarificação x Preparo	0,913^{ns}	0,299^{ns}	0,779^{ns}	0,048^{ns}	0,021^{ns}	0,090^{ns}
Escarificação x Palhiço	0,118^{ns}	0,738^{ns}	0,903^{ns}	1,147^{ns}	0,292^{ns}	1,318^{ns}
Escarificação x Preparo x Palhiço	0,496^{ns}	1,855^{ns}	2,908^{ns}	0,886^{ns}	1,569^{ns}	1,744^{ns}

Médias seguidas por letras minúsculas na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. [1] inicio da safra: logo após o recolhimento e manutenção dos níveis de palhiço (outubro/2014). [2]fim de safra: antes da colheita (setembro/2015). PD: plantio direto, PC: preparo convencional, SE: sem escarificação, CE: com escarificação.

A palha da colheita anterior pode melhorar a atividade microbiana no solo, e estimular a mineralização fornecendo uma fonte de C lábil para o solo (SARKER et al., 2019), corroborando com este estudo em que a área com 100% de manutenção teve maior teor logo no início de safra, indicando que houve menor liberação para o solo, devido a manutenção do palhiço acumulado durante a safra da cana-planta (2013/14).

O teor de nitrogênio (N) apresentou alteração com o uso da escarificação (CE), onde houve redução do teor (6,56 g kg^{-1}), resultando na maior relação C/N (52,39/1) ao fim da safra (Quadro 12). Com o aumento do teor de N do palhiço a relação C/N tem tendência de queda linear, visto que sempre há perdas de C de acordo com a decomposição do palhiço (VARANDA et al., 2018). Entre os níveis de palhiço a relação C/N foi reduzida em 49,03%, 49,90% e 42,13% ao fim da safra nos níveis de 0%, 50% e 100% de manutenção, respectivamente (Quadro 12). A não significância entre os níveis de palhiço mantidos no solo confirmam que a dinâmica de decomposição ao longo do ano não está relacionada a quantidade de material vegetal (SOUZA JÚNIOR et al., 2017).

Os sistemas de preparo não influenciaram os teores de C,N e C/N, durante a safra da segunda soqueira (2015/16), somente os níveis de palhiço e uso da escarificação (Quadro 13). No início da safra a remoção quase que total de palhiço (0%) promoveu menores teores de C e N no resíduo que ficou sobre o solo, em consequência aumentaram a relação C/N (130/1) (Quadro 13), induzindo decomposição mais lenta no início da safra. As áreas com ausência da escarificação apresentaram maior teor de N no início de safra e para C e N no fim da safra 2015/16, fator que induziu menor relação C/N, que deve acelerar a decomposição do palhiço (Quadro 13).

QUADRO 13. Teor de carbono (C), nitrogênio (N) e relação carbono/nitrogênio (C/N) da palha de cana-de-açúcar ao longo de um ano de decomposição em função de níveis de palhiço remanescente, uso de escarificação em plantio direto e preparo convencional no início da safra 2015/16

	Início de safra[1]			Fim de safra[2]		
	C	N	C/N	C	N	C/N
			g kg^{-1}			
Preparo de solo						
PD	417,17 a	3,42 a	123,56 a	292,89 a	7,59 a	39,39 a
PC	414,37 a	3,47 a	120,43 a	282,11 a	7,46 a	38,97 a
CV (%)	3,34	8,43	11,17	14,88	12,82	10,21
Palhiço (%)						
0	405,53 b	3,14 b	130,93 a	299,73 a	6,59 b	46,31 a
50	417,52 a	3,52 a	119,40 b	276,72 a	7,59 a	36,66 b
100	424,26 a	3,68 a	115,65 b	286,05 a	8,39 a	34,55 b
CV (%)	1,97	6,02	7,01	13,67	13,10	13,49
Escarificação						
SE	414,50 a	3,61 a	116,10 b	300,50 a	8,31 a	36,58 b
CE	417,03 a	3,29 b	127,89 a	274,50 b	6,74 b	41,77 a
CV (%)	2,42	9,69	10,83	14,73	15,87	16,31
Teste F						
Preparo x Palhiço	2,576^{ns}	2,211^{ns}	1,243^{ns}	1,531^{ns}	0,042^{ns}	2,262^{ns}
Escarificação x Preparo	0,496^{ns}	0,179^{ns}	0,628^{ns}	8,687**	9,324**	0,028^{ns}
Escarificação x Palhiço	0,656^{ns}	1,509^{ns}	2,602^{ns}	8,557**	1,965^{ns}	3,763*
Escarificação x Preparo x Palhiço	2,000^{ns}	0,458^{ns}	0,103^{ns}	2,250^{ns}	4,179*	0,427^{ns}

Médias seguidas por letras minúsculas na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. [1] Inicio da safra: logo após o recolhimento e manutenção dos níveis de palhiço (novembro/2015). [2] Fim de safra: antes da colheita (setembro/2016). PD: plantio direto, PC: preparo convencional, SE: sem escarificação, CE: com escarificação.

A manutenção de palhiço no solo tem grandes responsabilidade com a dinâmica de C, e a sua retirada total aliada à ausência de escarificação reduzir a entrada de C no solo, ainda prejudica a qualidade biológica, pois um solo descoberto está mais sujeito a estresse microbiano que irá gerar perdas de C (TORMENA et al., 2017).

Na safra 2015/16 houve interação ($p<0,05$) no fim do ciclo para C, N e relação C/N. As áreas escarificadas (CE) reduziram os teores de C e N no PC, assim como entre os níveis de palhiço, onde as áreas com 50% e 100% CE tiveram uma redução ($p<0,05$) na relação C/N (Quadro 14). A retirada total de palhiço (0%) refletiu nos maiores valores de relação C/N (52/1), indicando uma lenta de decomposição.

QUADRO 14. Teor de carbono (C), nitrogênio (N) e relação carbono/nitrogênio (C/N) da palha de cana-de-açúcar função de níveis de palhiço remanescente, uso de escarificação em plantio direto e preparo convencional no fim da safra 2015/16

Preparo do solo	C (g kg^{-1})		N (g kg^{-1})	
	Escarificação		Escarificação	
	SE	CE	SE	CE
PD	287,88 aA	297,91 aA	7,85 aA	7,33 aA
PC	313,13 aA	251,09 bB	8,77 aA	6,15 aB

Palhiço (%)	C/N	
	Escarificação	
	SE	CE
0	40,15 bA	52,49 aA
50	36,01 aA	37,32 aB
100	33,58 aA	35,51 aB

Médias seguidas por letras minúsculas na linha e maiúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. PD: plantio direto, PC: preparo convencional, SE: sem escarificação, CE: com escarificação.

Apesar de ser considerada um preparo mínimo, o uso da escarificação pode acarretar em perdas de C e N devido ao revolvimento provocado nas camadas mais superficiais, a palha tem maior contato com o solo, acelerando seu processo de mineralização (SOUSA JÚNIOR et al., 2017).

Na terceira soca da cultura, o preparo convencional (PC) apresentou maior teor de N (4,05 g kg^{-1}) no palhiço no início da safra (Quadro 15). Os teores de C e C/N não tiveram interação significativa ($p>0,05$) entre os fatores, somente entre os níveis de palhiço e uso da escarificação (Quadro 15). A maior relação C/N foi de 51/1 no nível de 0% de manutenção ao fim da safra, confirmando a menor decomposição de palhiço nesses sistemas. Esse valor de relação C/N no fim da safra ainda é um valor muito alto, segundo Fortes et al. (2012) para que pelo menos 90% do nitrogênio do palhiço seja decomposto, é preciso que a relação C/N chegue a 24/1, aliado a redução significativa da lignina.

QUADRO 15. Teor de carbono (C), nitrogênio (N) e relação carbono/nitrogênio (C/N) da palha de cana-de-açúcar ao longo de um ano de decomposição em função de níveis de palhiço remanescente, uso de escarificação em plantio direto e preparo convencional na safra 2016/17

	Início de safra[1]			Fim de safra[2]		
	C	N	C/N	C	N	C/N
			g kg^{-1}			
Preparo de solo						
PD	381,68 a	3,84 b	103,53 a	368,61 a	8,39 a	45,28 a
PC	387,91 a	4,05 a	97,61 a	369,08 a	8,65 a	44,45 a
CV (%)	4,73	4,34	9,44	8,10	18,92	29,28
Palhiço (%)						
0	364,67 b	3,91 b	95,05 b	363,19 a	7,37 b	51,16 a
50	378,17 b	4,42 a	88,19 b	355,42 a	8,83 a	41,60 b
100	411,54 a	3,51 c	118,46 a	387,94 a	9,37 a	41,84 b
CV (%)	3,89	7,72	10,74	10,73	13,14	18,77
Escarificação						
SE	388,06 a	3,56 b	110,01 a	354,23 b	9,08 a	39,69 b
CE	381,53 a	4,34 a	91,12 b	383,47 a	7,96 b	50,04 a
CV (%)	3,31	7,35	7,84	7,86	10,39	17,69
Teste F						
Preparo x Palha	11,306**	1,627^{ns}	1,226^{ns}	0,525^{ns}	2,563^{ns}	1,538^{ns}
Escarificação x Preparo	0,057^{ns}	1,811^{ns}	0,616^{ns}	0,156^{ns}	1,341^{ns}	0,732^{ns}
Escarificação x Palhiço	5,386**	22,833**	16,475**	4,696^{ns}	5,408*	1,322^{ns}
Escarificação x Preparo x Palhiço	8,212**	7,332**	8,520**	0,212^{ns}	1,816^{ns}	1,256^{ns}

Médias seguidas por letras minúsculas na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. [1] Inicio da safra: logo após o recolhimento e manutenção dos níveis de palhiço (setembro/2016). [2] Fim de safra: antes da colheita (julho/2017). PD: plantio direto, PC: preparo convencional, SE: sem escarificação, CE: com escarificação.

A interação dos níveis de palhiço a escarificação (CE) foi significativa para C, N e C/N ($p<0,05$) (Quadro 16). Com a manutenção de 100% nas duas épocas avaliadas, o teor de C foi superior, assim os sistemas com 0 e 50% liberaram mais C, em consequência reduziram a relação C/N nas áreas escarificadas (0 e 50%), facilitando o processo de decomposição do palhiço. Em contrapartida houve aumento de N no palhiço no tratamento com 50% com escarificação (Quadro 16), reduzindo a liberação do nutriente para o solo no início da safra.

QUADRO 16. Teor de carbono (C), nitrogênio (N) e relação carbono/nitrogênio (C/N) da palha de cana-de-açúcar função de níveis de palhiço remanescente, uso de escarificação em plantio direto e preparo convencional na safra 2016/17

Palhiço (%)	C (g kg^{-1})			
	Escarificação[1]		Plantio[1]	
	SE	CE	PD	PC
0	376,32 aB	353,02 aB	347,23 bC	382,11 aAB
50	375,89 aB	380,45 aB	384,21 aB	372,13 aB
100	411,97 aA	411,11 aA	413,48 aA	409,48 aA
	N (g kg^{-1})		N (g kg^{-1})	
	Escarificação[1]		Escarificação[2]	
Palhiço (%)	SE	CE	SE	CE
0	3,43 bA	4,4 aB	7,52 aB	7,22 aAB
50	3,47 bA	5,1 aA	9,97 aA	7,69 aA
100	3,51 aA	3,51 aC	9,75 aAB	8,98 aA

Palhiço (%)	C/N	
	Escarificação[1]	
	SE	CE
0	109,9 aA	80,3 bB
50	101,54 aA	74,84 bB
100	118,7 aA	118,22 aA

Médias seguidas por letras minúsculas na linha e maiúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. [1] Início da safra: logo após o recolhimento e manutenção dos níveis de palhiço (setembro/2016). [2] Fim de safra: antes da colheita (julho/2017). PD: plantio direto, PC: preparo convencional, SE: sem escarificação, CE: com escarificação.

Supõe-se que o revolvimento feito durante o cultivo da soqueira com escarificador tenha aumentado a decomposição do palhiço, consequentemente apresentou menores teores de C nas maiores remoções (0 e 50%), indicando maior liberação deste elemento para o solo. Outros autores também relataram maior decomposição devido a liberação do C, ocorreu em função da maior remoção de palhiço em diferentes condições climáticas e tipos de solos do Brasil (SOUSA JÚNIOR et al., 2017; VARANDA et al., 2019; PIMENTEL et al. 2019).

O efeito da escarificação não foi observado ($p>0,05$) ao longo do ano, prevalecendo apenas a influência do maior aporte de palhiço (50 e 100%) no

enriquecimento de N (Quadro 16). Isso resultou em uma decomposição mais lenta do palhiço, e menor liberação de N para a cultura.

De acordo com Pimentel et al. (2019) a manutenção de palhiço de safras anteriores é responsável pelo incremento nos teores de N, pois há a constante entrada de material vegetal com diferentes composições nutricionais. A influência do resíduo novo adicionado ao solo pode interferir na dinâmica de decomposição e ciclagem de nutrientes da safra atual, devido à qualidade dos diferentes palhiços depositados em campo (ZHENG et al., 2017). A partir da safra 2016/17 (terceira soca) a taxa de decomposição na área com 100% de manutenção (73,17%) subiu de forma expressiva até a quinta soca (87,27%), e aliado ao alto teor de N nos períodos iniciais de cada ano (Quadro 3).

Nas áreas com menor teor de N foram observadas as maiores relações C/N do palhiço, com média de 118,46 na manutenção de 100% de palhiço, e com valores significativamente superiores nas áreas sem escarificação. Ficando evidente que a escarificação pode acelerar a decomposição do palhiço residual, liberando de forma significativa o C para o solo.

A retirada de palhiço do campo nos sistemas de cana-de-açúcar devem ser estudados com maior profundidade, pois a maior fonte de C que pode ser controlada nestes cultivos é a manutenção do palhiço no solo (CARMO et al., 2013), contudo se a intenção é a ciclagem de nutrientes do material vegetal, é benéfico a retirada de parte do palhiço do campo, ou adotar outras práticas como o cultivo intercalar de leguminosas, aplicação de composto orgânico ou vinhaça enriquecida, como fontes de N, com o objetivo de equilibrar a relação C/N dos resíduos sobre o solo.

Na quarta-soca (2017/18) da cultura o efeito do sistema de plantio já foi perdido, assim como da escarificação nas soqueiras, exceto para a relação C/N no início da safra que seu uso (CE) apresentou um pequeno aumento ($p<0,05$) (Quadro 17).

Com maior estabilização dos sistemas de manutenção de palhiço em campo, seus efeitos são mais significativos nesta safra (2017/18). O carbono apresentou maiores teores nos níveis de 0% e 50%, refletindo na alta relação C/N (137/1) com 0% de manutenção (Quadro 17). Não diferindo estatisticamente ($p>0,05$) no fim da safra entre os níveis de palha no teor de C, a relação inversa acontece com o teor de N, maiores níveis de palha (50% e 100%) proporcionam maiores teores no palhiço, reduzindo a relação C/N em consequência nas duas avaliações (Quadro 17). O microclima criado entre a espessa camada de palhiço e o solo garante excelentes condições para a abundância e atividade microbiana, garantindo o enriquecimento de N (VARANDA et al., 2018).

QUADRO 17. Teor de carbono (C), nitrogênio (N) e relação carbono/nitrogênio (C/N) da palha de cana-de-açúcar ao longo de um ano de decomposição sob níveis de palhiço remanescente, uso de escarificação em plantio direto e preparo convencional na safra 2017/18

	Início de safra[1]			Fim de safra[2]		
	C	N	C/N	C	N	C/N
			g kg^{-1}			
Preparo do solo						
PD	421,53 a	3,50 a	122,17 b	275,98 b	7,53 a	37,68 a
PC	431,09 a	3,31 a	131,35 a	301,97 a	7,56 a	40,13 a
CV (%)	2,71	9,20	7,75	8,38	12,14	14,63
Palhiço (%)						
0	430,97 a	3,16 b	137,06 a	282,66 a	7,36 ab	38,96 ab
50	428,79 ab	3,48 a	123,85 b	284,58 a	7,03 b	41,22 a
100	419, b	3,58 a	119,37 b	299,68 a	8,25 a	36,53 b
CV (%)	2,53	8,29	8,08	18,56	13,40	8,95
Escarificação						
SE	424,41 a	3,53 a	121,78 b	290,27 a	7,82 a	37,21 a
CE	428,22 a	3,28 a	131,74 a	287,67 a	7,27 a	40,59 a
CV (%)	5,06	12,44	7,34	14,66	16,10	14,48
Teste F						
Preparo x Palhiço	9,414**	3,447ns	5,597**	2,161ns	7,307**	1,441ns
Escarificação x Preparo	0,084ns	1,355ns	3,121ns	0,324ns	2,709ns	1,771ns
Escarificação x Palhiço	0,115ns	0,064ns	0,907ns	3,024ns	1,411ns	1,890ns
Escarificação x Preparo x Palhiço	0,167ns	1,225ns	4,798ns	0,001ns	1,216ns	1,223ns

Médias seguidas por letras minúsculas na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. [1] Inicio da safra: logo após o recolhimento e manutenção dos níveis de palhiço (agosto/2017). [2] Fim de safra: antes da colheita (junho/2018). PD: plantio direto, PC: preparo convencional, SE: sem escarificação, CE: com escarificação.

Houve interação entre os sistemas de plantio e níveis de palhiço para C, N e C/N na quarta-soca avaliada na safra 2017/18 (Quadro 18). No início da safra, o plantio direto (SPD) reduziu o teor de C, promovendo a redução da relação C/N neste mesmo período no sistema com manutenção de 100% de palhiço. Já no fim da safra, os teores de N não foram significativos entre o plantio, somente entre os níveis de palhiço em que 100% de manutenção manteve os maiores teores de N (9,01 g kg^{-1}) no palhiço no PD (Quadro 18). Acelerando o processo de decomposição do palhiço no SPD, como pode ser observado no Quadro 3 o plantio direto decompôs 76,61% do palhiço ao fim safra.

QUADRO 18. Teor de carbono (C), nitrogênio (N) e relação carbono/nitrogênio (C/N) da palha de cana-de-açúcar função de níveis de palhiço remanescente, uso de escarificação em plantio direto e preparo convencional na safra 2017/18

Palhiço (%)	C (g kg^{-1})		C/N	
	Preparo[1]		Preparo[1]	
	PD	PC	PD	PC
0	431,37 aA	430,57 aA	133,62 aA	140,5 aA
50	428,39 aA	429,2 aA	124,67 aAB	123,04 aA
100	404,84 bB	433,51 aA	108,23 bB	130,5 aA

Palhiço (%)	N (g kg^{-1})	
	Preparo[2]	
	PD	PC
0	6,81 aB	7,91 aA
50	6,78 aB	7,28 aA
100	9,01 aA	7,49 aA

Médias seguidas por letras minúsculas na linha e maiúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. [1] Inicio da safra: logo após o recolhimento e manutenção dos níveis de palhiço (agosto/2017). [2] Fim de safra: antes da colheita (junho/2018). PD: plantio direto, PC: preparo convencional, SE: sem escarificação, CE: com escarificação.

Autores relataram aumento de N na palha devido a fontes externas, como fertilizantes industriais usados anualmente no cultivo da cana-de-açúcar (SOONG et al., 2015), nitrogênio oriundo de fungos (WELLS et al., 2017) e também pelo desenvolvimento de micro raízes que se desenvolvem no ambiente propício que o alto aporte de palha disponibiliza, essas raízes absorvem N do solo e aderem a palha, provocando certo incremento do nutriente ao palhiço (FRANCO et al., 2011). Neste estudo não foi realizado nenhuma avaliação referente as micro raízes, contudo foi observado em grande parte dos sistemas com maior manutenção de palhiço o seu desenvolvimento abaixo dos *litter bags* que ficavam na superfície em contato com o solo.

Na quinta e última soca (2018/19) houve um acompanhamento durante todo o ciclo da cultura para observar o teor e liberação dos macronutrientes do palhiço para o solo. O teor de carbono teve uma tendência de queda conforme os dias de decomposição, com ajuste quadráticos e lineares que melhor explicaram cada sistema (Figura 9A e B).

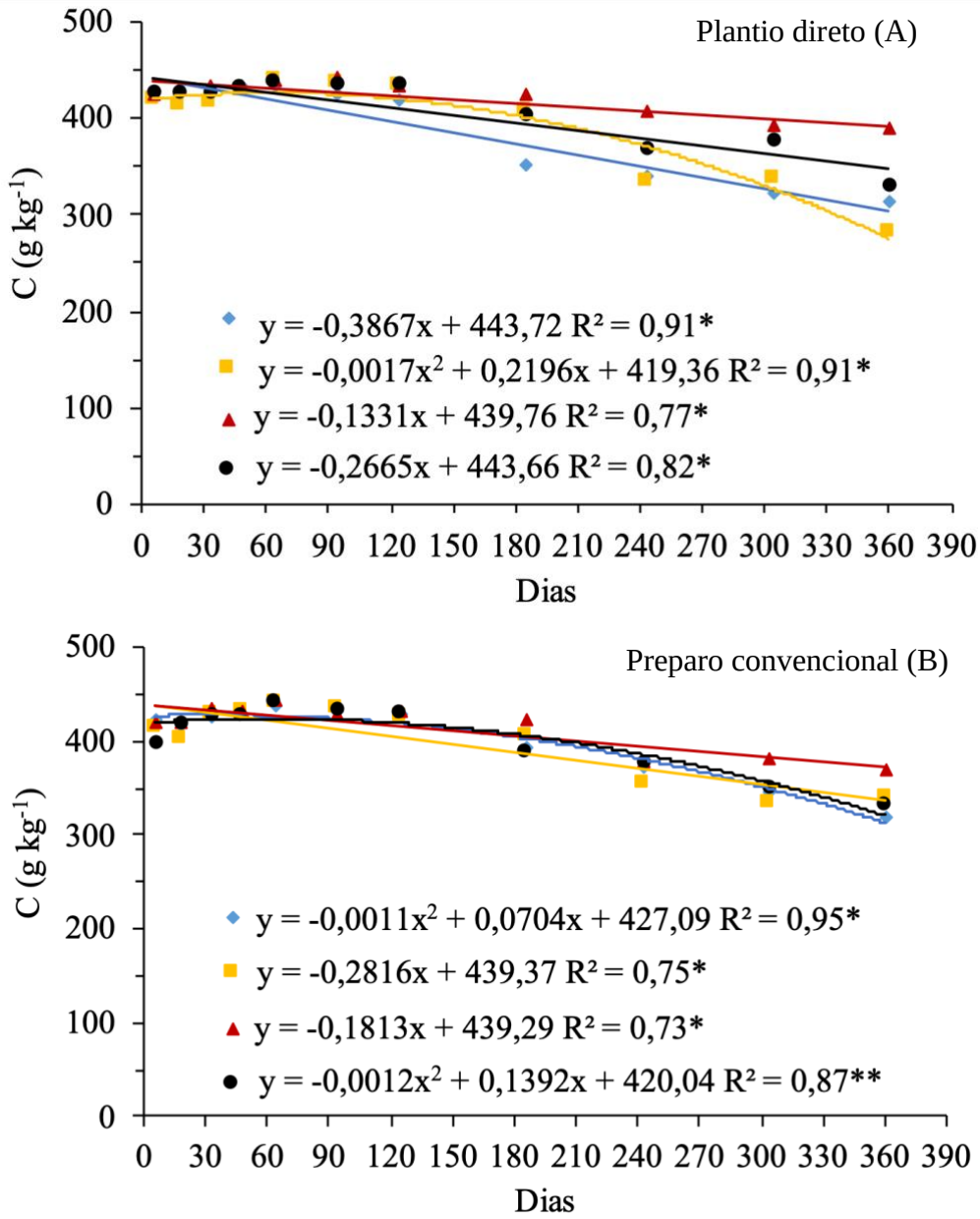


FIGURA 9. Teor de carbono (C) de palhiço de cana-de-açúcar em sistema de plantio direto (A) e convencional (B), em função do tempo de decomposição e níveis de palhiço remanescente e manejo com escarificação, na safra 2018/19.50% com escarificação (◆), 50% sem escarificação (■), 100% com escarificação (▲) e 100% sem escarificação (●). * e ** Significativo a 5% e 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

No PD o aporte de palhiço em campo influenciou nos teores de C, sendo que as áreas com 50% de palhiço tiveram uma queda mais acentuada (Figura 9A), fato que não foi observado no PC, independente dos níveis de palhiço remanescentes, os teores de C foram semelhantes durante todo o período avaliado (Figura 9B).

Em todos níveis de palhiço a queda no teor de C após os 120 dias (Figura 9A e B) responde a diminuição acentuada da relação C/N, devido ao aumento do teor de N esta relação tende a diminuir, influenciando no processo de decomposição do palhiço (Figura 9). Kan et al. (2020) em seus estudos com decomposição de palhiço, verificaram menores teores de C em sistemas de preparo convencional do solo, e justificaram a menor mineralização em sistemas de plantio direto devido a melhoria da qualidade de macroagregados e alto teor de matéria orgânica do solo. Contrariando os resultados obtidos neste estudo, entre os preparos de solo (PD e PC) no fim da safra houve uma pequena variação, com média de 327,43 a 339,92 g kg^{-1} no teor de C, respectivamente. Portanto o preparo de solo no plantio não foi determinante na mineralização deste elemento.

Para o teor de N os melhores ajustes de reta foram os lineares para todos sistemas de plantio e níveis de palhiço (Figura 10C e D). Nos primeiros 60 dias de decomposição independente do sistema, houve uma queda do teor de N no palhiço, indicando uma rápida liberação para o solo. O teor inicial de N no palhiço no nível de 50% de manutenção apresentou uma média de 3,52 e 4,32 g kg^{-1} para PD e PC, com aumento ao fim da safra de 166,15% e 124%, respectivamente. Para 100% de manutenção foi verificado 3,81 e 8,39 g kg^{-1} para PD e PC, com 229,6% e 29,5% de aumento, respectivamente (Figura 10C e D). As taxas de aumento observadas são superiores a outros autores que também trabalharam com níveis de remoção de palhiço, ao avaliar o teor inicial e o aumento de N no decorrer da safra, constataram taxas máximas de 146% de aumento para as áreas sem retirada (100% de manutenção) (SOUSA et al. 2017; VARANDA et al., 2018).

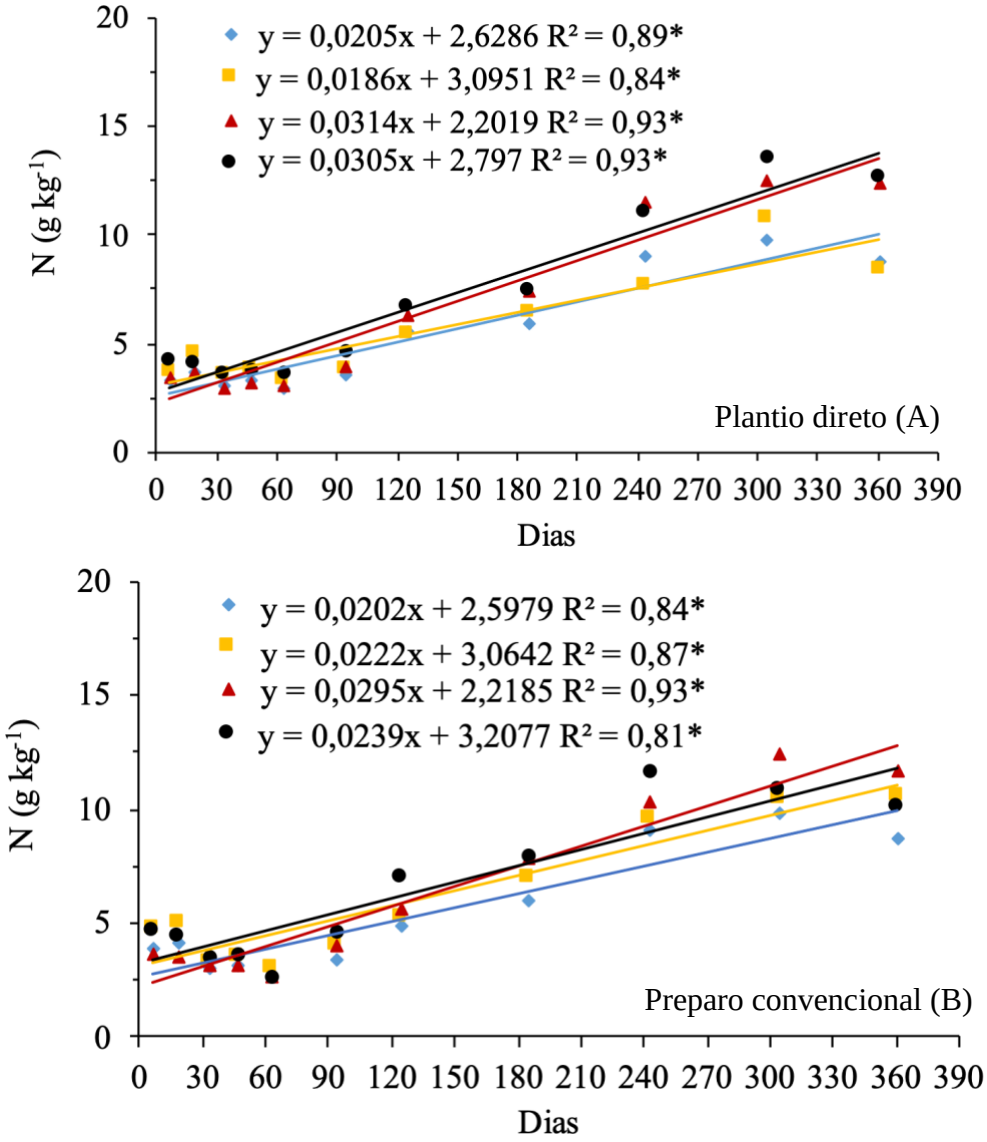


FIGURA 10. Teor de nitrogênio (N) de palhiço de cana-de-açúcar em sistema de plantio direto (A) e convencional (B), em função do tempo de decomposição e níveis de palhiço remanescente e manejo com escarificação, na safra 2018/19.50% com escarificação (◆), 50% sem escarificação (■), 100% com escarificação (▲) e 100% sem escarificação (●). * e ** Significativo a 5% e 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

O enriquecimento de N no palhiço é relatado na literatura, contudo as variáveis de cada local de experimentação são distintas, mas a constância de maior acúmulo em sistemas com maior aporte de palha é predominante (FORTES et al, 2012). Supõe-se que a menor mineralização de N em função do aumento da quantidade de palhiço que é mantido na superfície se deve pela imobilização deste elemento (RAMOS et al., 2016), e a melhoria na umidade do solo que favorece a atividade microbiana (AWE et al., 2015).

A alta liberação de N observada no sistema com 100% SE (Figura 11C e D), aos 90 dias após o início dos tratamentos reflete a maior liberação para o solo, atingindo valores de 9,89 e 17,57 kg ha^{-1} em PD e PC, respectivamente. Após este período a liberação foi mais lenta até o fim da safra. Neste parâmetro o PC beneficiou de forma significativa a liberação de N para o solo, não dependendo somente do alto aporte de palha, visto que as áreas com 50% SE também se sobressaíram, atingindo 14,72 kg ha^{-1} (Figura 11D). O preparo de solo altamente intensificado no PC, pode ter influência na maior mineralização de N nesses sistemas (KAN et al., 2020).

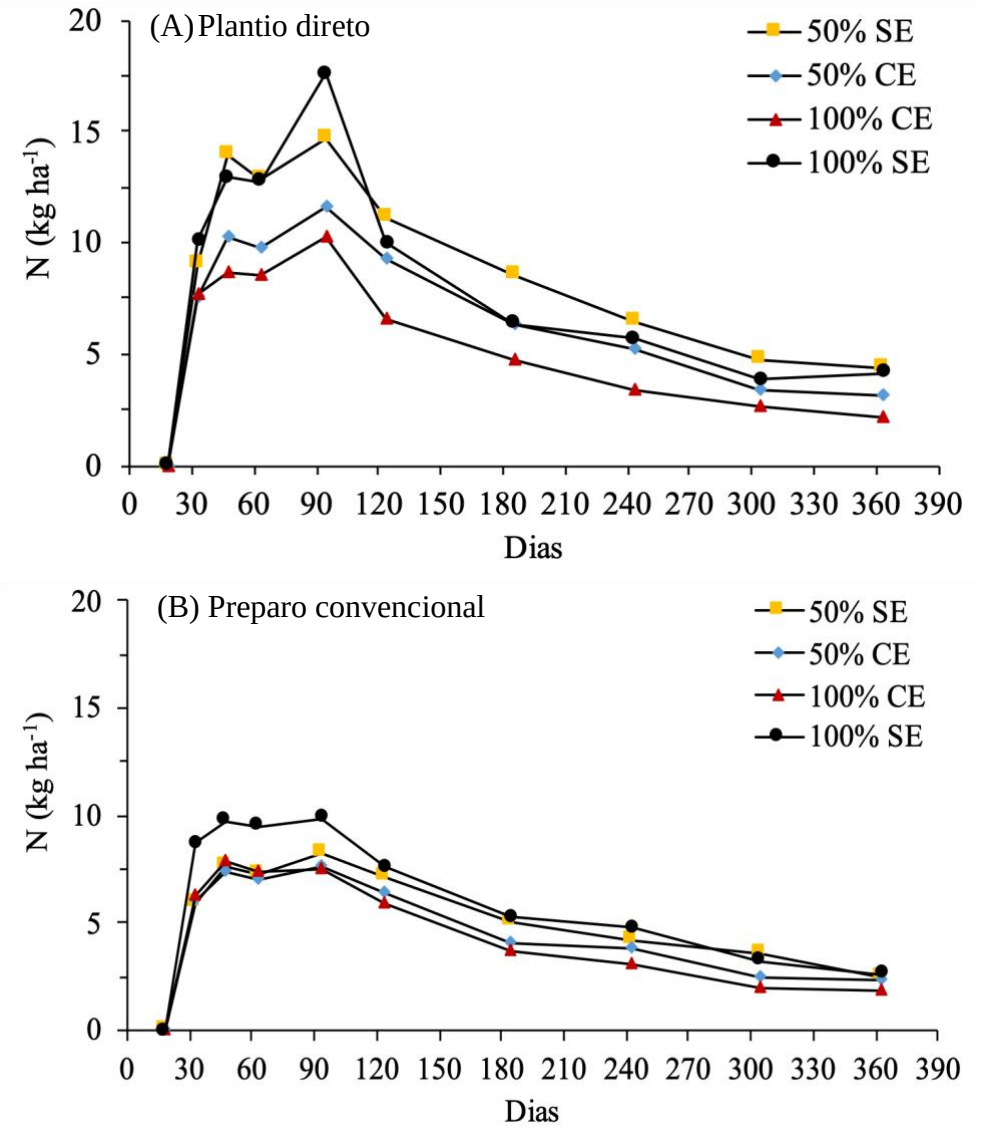
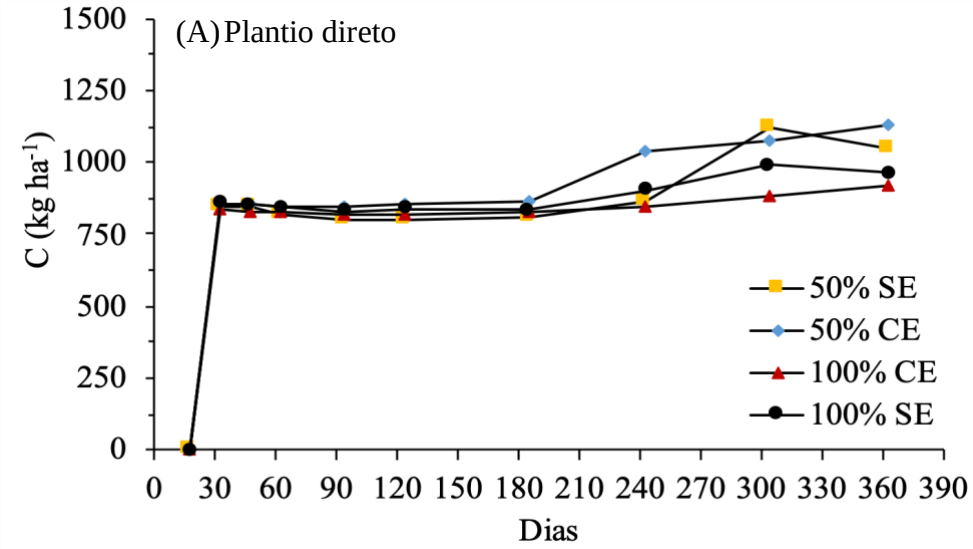


FIGURA 11. Liberação de nitrogênio (N) de palhiço de cana-de-açúcar em plantio direto (A) e preparo convencional (B), respectivamente, em função do tempo de decomposição, níveis de palhiço remanescente e manejo com (CE) e sem escarificação (SE), na safra 2018/19.

Alguns autores destacam que a liberação de N devido à manutenção de palhiço não ocorre a curto prazo (CARNEIRO et al., 2010; CHERUBIN et al., 2019), como constatado por Ferreira et al. (2017) que estudaram a contribuição de N por três socas consecutivas, e observaram a ciclagem de 7,6 kg ha^{-1} somente no último ano avaliado. Corroborando assim com a boa quantidade de N mineralizada neste estudo, pois o acompanhamento desta decomposição ocorreu após quatro safras de cana soca, seguindo os mesmos manejos de palhiço e tratos culturais.

A liberação de C teve média de 79,69% e 82,02% para os sistemas de PD e PC, respectivamente, até os 184 dias de decomposição, a liberação se manteve constante, e diferentemente do N este parâmetro se destacou devido ao nível de 50% de palhiço em PD, alcançando uma máxima de 1.247,36 kg ha^{-1} liberados (Figura 12A). Pimentel et al. (2019) também não verificaram influência dos níveis de palhiço remanescente em campo nas perdas de C e N, concluindo uma média de liberação de 72% para C e 46% de N, contudo seus teores foram superiores nas áreas com 100% de manutenção de palhiço.

Essa diferença de maiores perdas de C se deve ao fato da diminuição da relação C/N ao longo da safra, que variou de 119,88 g kg^{-1} aos 6 dias após o início do tratamento para a 30,36 g kg^{-}aos 360 dias. Entre a primeira e a última avaliação (6 e 360 dias), houve uma redução média de 74%. Souza et al. (2020) e Sousa Junior et al. (2018) relataram maiores reduções de C do palhiço de cana-de-açúcar, e ressaltam que há um incremento de C e N nas camadas superficiais do solo, caso seja evitada a remoção total da cobertura vegetal.



...continua...

“FIGURA12, cont.”

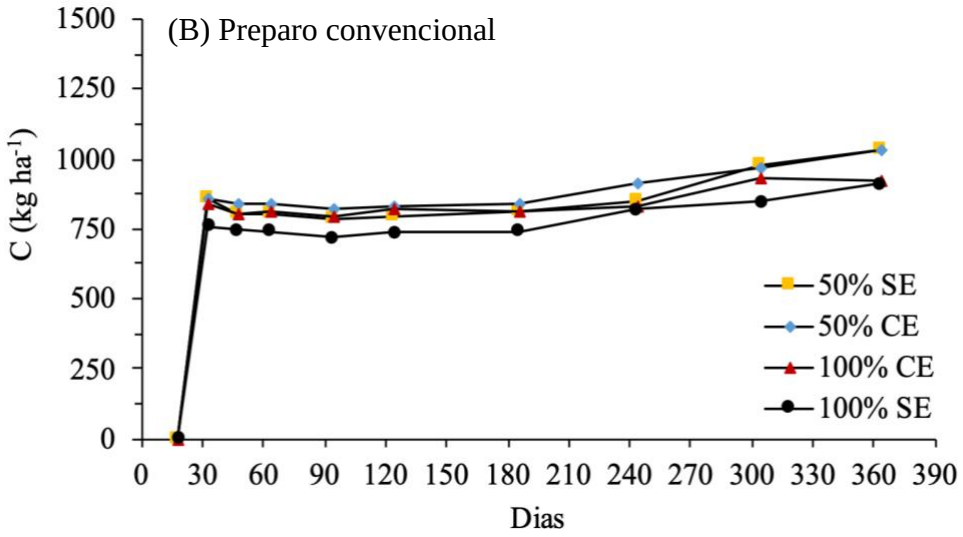


FIGURA 12. Liberação de carbono (C) de palhiço de cana-de-açúcar em plantio direto (A) e preparo convencional (B), respectivamente, em função do tempo de decomposição, níveis de palhiço remanescente e manejo com (CE) e sem escarificação (SE), na safra 2018/19.

Para a relação C/N não houve significância entre sistemas de plantio, níveis de palhiço e a escarificação ($p>0,05$) (Quadro 19).

Quanto aos níveis de palhiço e o uso da escarificação a coleta aos 63 dias apresentaram a máxima relação C/N de 167,03 g kg^{-1} no PC, indicando menor decomposição neste período (Quadro 19), em função do menor teor de N na mesma época (Figura 10C e D).

A relação entre a alta relação C/N e a decomposição do palhiço é indiscutível, pois observando a Figura 8 é clara a diferença entre o PD e PC aos 63 dias, a área com PC com a maior relação C/N mesmo em seu pico de liberação de massa, não ultrapassou 0,125 Mg ha^{-1}, enquanto que no PD quando a relação foi de 137,22 g kg^{-1} a maior liberação de massa foi de 0,361 Mg ha^{-1} (Figura 12A e B). Corroborando com outros autores que identificaram a relação C/N como melhor preditor da decomposição de palhiço em sistemas de manutenção no cultivo de cana-de-açúcar (RAMOS, et al., 2016; PIMENTEL et al., 2019; SOUZA et al., 2020).

QUADRO 19. Relação C/N da palha de cana-de-açúcar ao longo de um ano de decomposição sob taxas de remoção e escarificação em plantio direto e preparo convencional, safra 2018/19

	Relação C/N										
Preparo de solo	Dias de coletas										
	6	18	33	47	63	94	124	185	243	304	360
PD	118,26 a	108,64 a	130,25 a	128,97 a	137,23 b	112,75 a	73,53 a	59,30 a	37,54 a	30,90 a	31,33 a
PC	99,80 a	101,12 a	137,15 a	132,65 a	167,03 a	112,65 a	77,66 a	57,35 a	37,00 a	32,82 a	33,31 a
Palhiço (%)											
50	111,08 a	100,37 a	135,49 a	127,37 a	150,74 a	118,98 a	82,88 a	61,93 a	40,02 a	33,16 a	34,27 a
100	106,98 a	109,38 a	131,92 a	134,26 a	153,52 a	106,42 a	68,31 a	54,72 a	34,52 a	30,56 a	30,36 a
Escarificação											
CE	98,19 a	94,90 a	123,09 a	123,44 a	146,23 a	105,25 a	72,39 a	56,35 a	36,68 a	30,84 a	30,84 a
SE	119,88 a	114,85 a	144,31 a	138,18 a	158,03 a	120,14 a	78,80 a	60,30 a	37,96 a	32,89 a	33,80 a

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna, e maiúscula na linha não diferem no teste de Tukey a 5% de probabilidade. PD: plantio direto, PC: preparo convencional, CE: com escarificação, SE: sem escarificação

A partir dos 243 dias de decomposição a relação C/N se estabilizou até o fim da safra, com menores quedas (Quadro 19), seguindo a tendência da decomposição de massa (Figura 8), que apresentou liberação lenta após este período. Esse padrão de diminuição da relação C/N sem diferenças entre os sistemas de manutenção de palhiço também foi constatado por outros autores (FORTES et al., 2012; ZHENG et al., 2017). Diversos fatores podem explicar a queda nesta relação, como condições de solo, clima, adubação, atividade biológica, entre outros (ROBERTSON e THORBURN, 2007), mas a perda mais expressiva pode ser explicada pela perda de C como CO_2 pela atividade microbiana do solo, aliado ao enriquecimento de N no palhiço ao longo do tempo (SOUZA JUNIOR et al., 2017).

Quanto ao teor de macronutrientes na safra 2018/19 foi feito um acompanhamento ao longo do ano, nos mesmos períodos e material de coleta dos *litter bags* que avaliaram de decomposição do palhiço. Entre os macronutrientes para a cultura da cana-de-açúcar o fósforo (P) tem maior limitação e baixa disponibilidade, visto que grande parte dos solos brasileiros são fixadores e pobres em P (SOLTANGHEISI et al., 2019). Neste estudo o teor de fósforo (P) tiveram ajuste linear crescente para todos os tratamentos no plantio direto (PD) e preparo convencional (PC) (Figura 13A e B).

Para ambos os sistemas de plantio o alto aporte de palhiço (100%), independente do uso da escarificação refletiram em maiores teores de P no palhiço, com máximas de 0,67 e 0,60 g kg^{-1} para PD e PC, respectivamente. Portanto os sistemas de plantio não interferiram de forma significativa em sua imobilização na palha, por ser um componente estrutural das membranas vegetais e desempenha importante papel na transferência de energia (TAIZ et al., 2017), não é facilmente liberado para o solo.

Cherubin et al. (2019) defendem a manutenção de grandes quantidades de palha no solo, e afirmam que a retirada total do palhiço do campo irá esgotar o P disponível, e como consequência reduzir a qualidade e produtividade do canavial. Soltangheisi et al. (2021), ao avaliar a dinâmica de P no cultivo de cana-de-açúcar e níveis de palhiço do sistema, verificaram que manutenção de 5 Mg ha^{-1} foi suficiente para suprir as necessidades nutricionais. Considerando o experimento atual na safra de 2018/19 o nível de 50% de manutenção equivale a 7,6 Mg ha^{-1} (Quadro 1), que também poderia ser suficiente para a demanda da cultura.

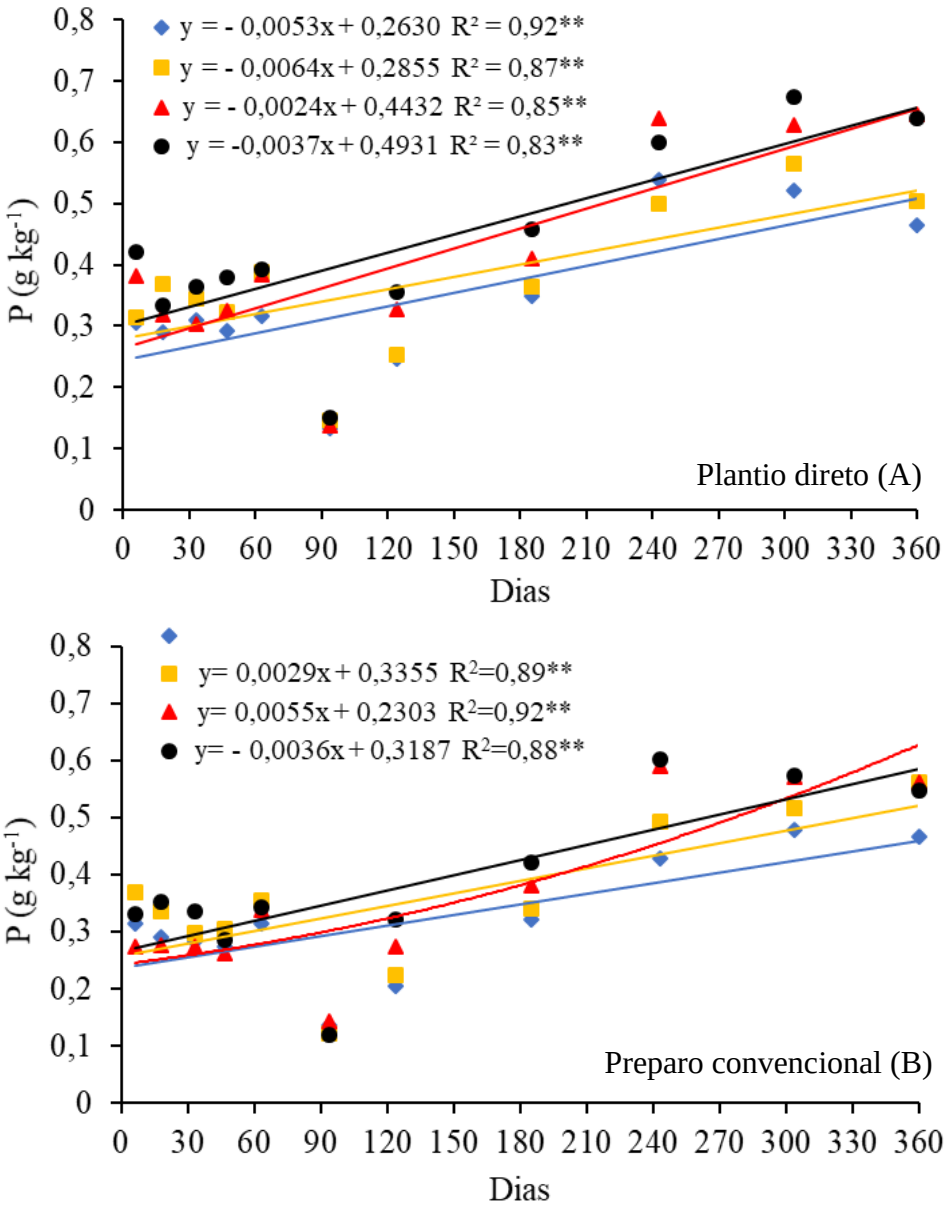


FIGURA 13. Teores de fósforo (P) de palhiço de cana-de-açúcar em plantio direto (A) e preparo convencional (B), em função do tempo de decomposição e níveis de palhiço remanescente e manejo com escarificação. 50% com escarificação (◆), 50% sem escarificação (■), 100% com escarificação (▲) e 100% sem escarificação (●). ** Significativo a 5% e 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

Os teores de potássio (K) foram melhores explicados por ajuste quadrático em todos tratamentos (Figura 14A e B). As áreas com 100% de manutenção tiveram média do teor de 3,74 g kg^{-1} de K na primeira avaliação (6 dias), seguido de rápida queda, onde 100% de palhiço liberaram 25,4% em apenas 12 dias, enquanto que nas áreas com 50% de manutenção perderam 55,14% do teor inicial de K no PD (Figura 14A).

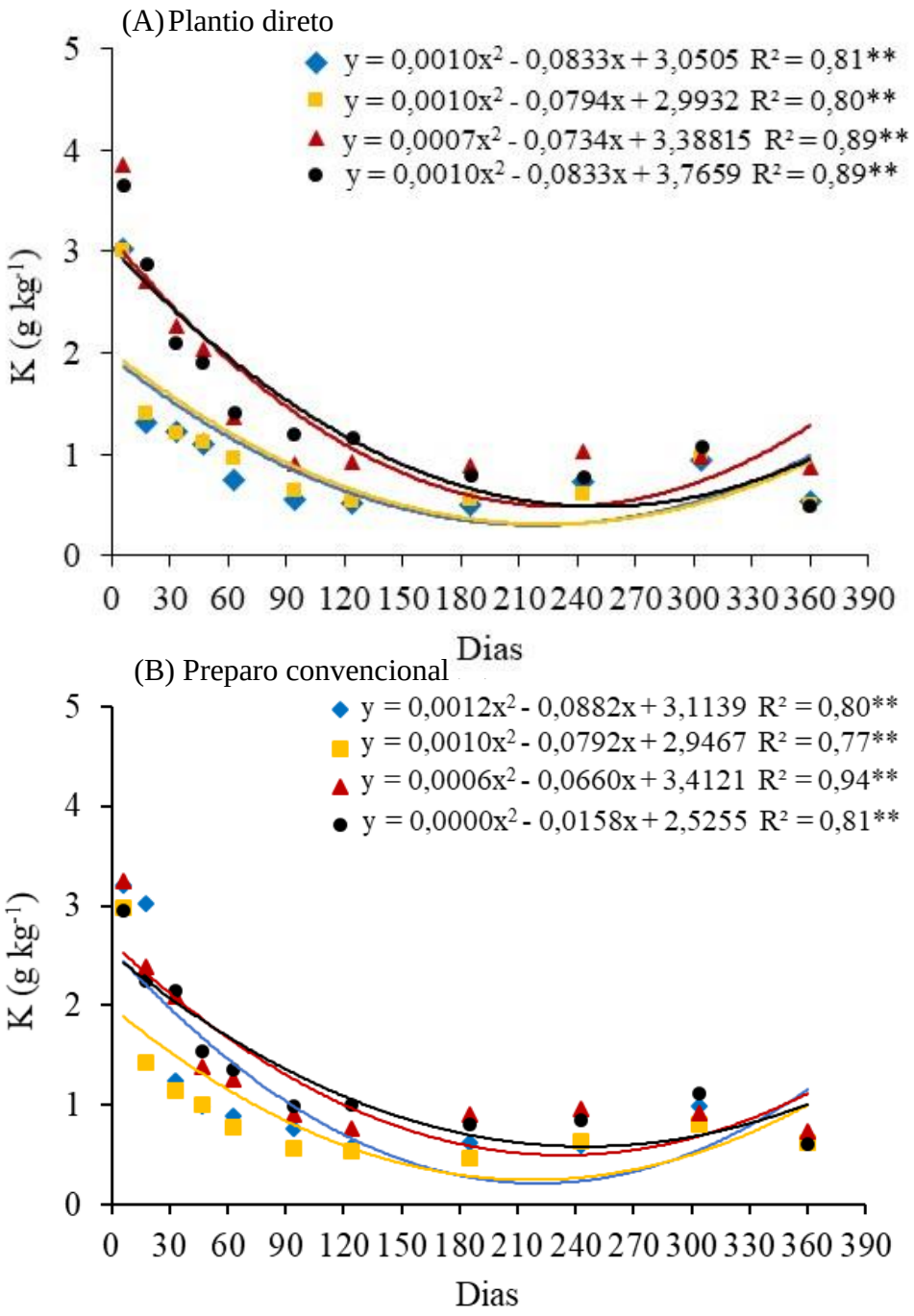


FIGURA 14. Teores de potássio (K) de palhiço de cana-de-açúcar em plantio direto (A) e preparo convencional (B), em função do tempo de decomposição e níveis de palhiço remanescente e manejo com escarificação. 50% com escarificação (◆), 50% sem escarificação (■), 100% com escarificação (▲) e 100% sem escarificação (●). ** Significativo a 5% e 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

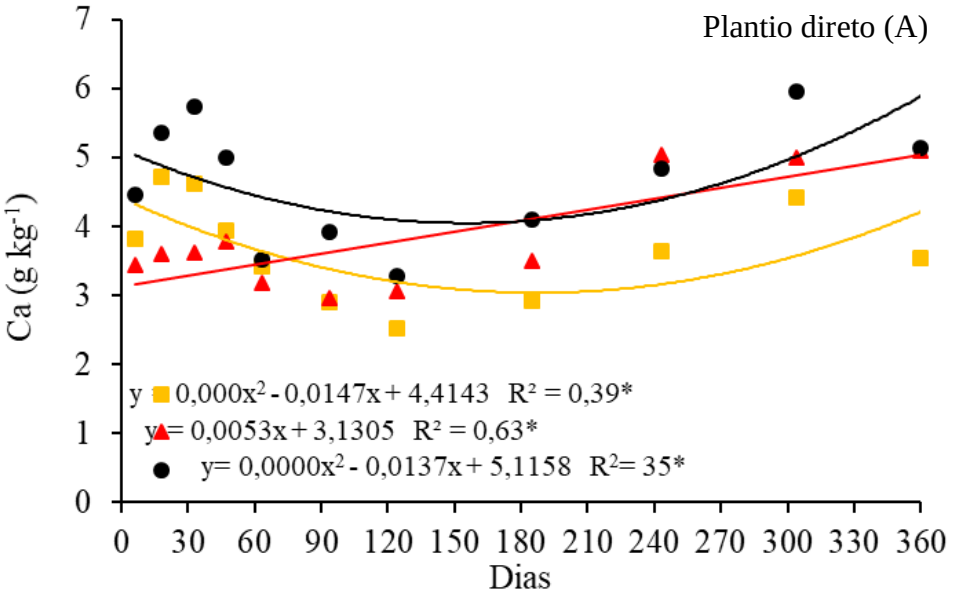
A dinâmica de liberação do K é completamente diferente da perda de massa do palhiço, pelo fato de estar presente principalmente na forma iônica na planta (K^+) se

move e é liberado de forma muito rápida, altamente influenciado pela chuva (LI et al., 2014). No mês de agosto de 2018, que compreende a coleta de 18 dias, foi verificada somente 66,6 mm de chuva (Figura 3), provavelmente essa liberação de K poderia ter sido muito maior, com maior pluviosidade no início da safra.

No PC os teores iniciais foram menores, com a máxima 3,25 g kg^{-1} na área com 100% de manutenção, e 3,20 g kg^{-1} de K no sistema de 50% com escarificação (CE) (Figura 14B). Esse comportamento pode estar ligado a maior liberação de massa seca aos 18 dias nas áreas com 50% de manutenção no PC (Figura 8B). O preparo mais intensivo de solo no PC também pode ter influenciado, concordando com Fortes et al. (2012), trabalhando com cana-de-açúcar, que observaram redução de 93% nos teores de K presentes no palhiço ao fim da safra em cultivo de preparo mínimo, e menores teores iniciais em preparo mais intensivo (convencional).

Para cálcio (Ca) e magnésio (Mg) os dados foram ajustados ao modelo quadrático, exceto para 100% CE de cálcio que explicou melhor seus teores (Figura 15).

Os tratamentos com 50% e 100% sem escarificação apresentaram os maiores teores de Ca e Mg ao longo da safra para PD e PC de ambos nutrientes (Figura 15). Essa diferença de teores entre o uso da escarificação pode ser explicada pela incorporação dos corretivos, pois a aplicação de calcário de 4 Mg ha^{-1} de calcário foi feita no ano de 2017 em superfície, assim na ausência deste revolvimento aumentou sua disponibilidade na superfície em contato com o palhiço. SILVEIRA et al. (2000) afirmam que encontraram resultados semelhantes, atribuindo o aumento de Ca e Mg no palhiço a aplicação de calcário sobre a soqueira da cana-de-açúcar.



...continua...

“FIGURA15, cont.”

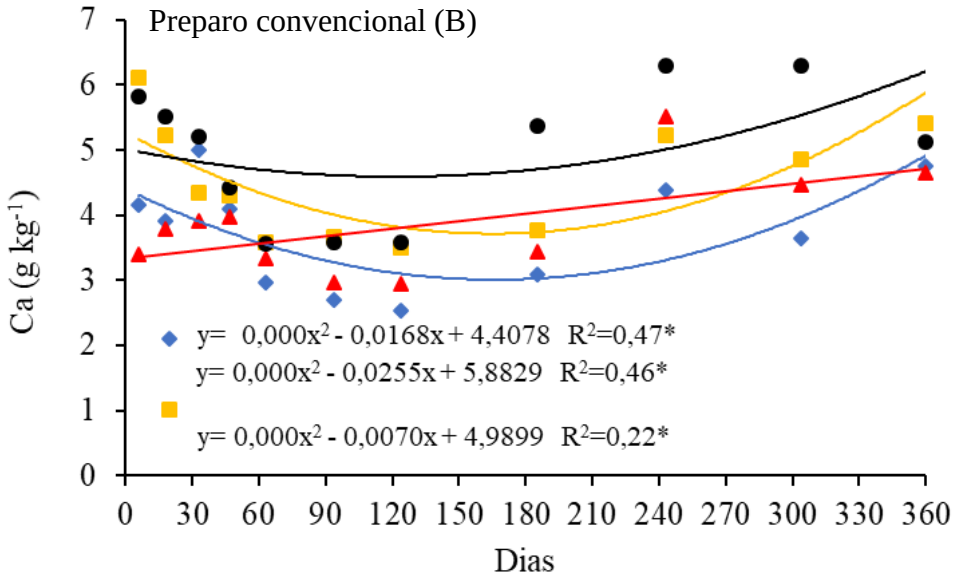


FIGURA 15. Teores de cálcio (Ca) de palhiço de cana-de-açúcar em plantio direto (A) e preparo convencional (B), em função do tempo de decomposição e níveis de palhiço remanescente e manejo com escarificação.50% com escarificação (◆), 50% sem escarificação (■), 100% com escarificação (▲) e 100% sem escarificação (●). * Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

Cá e Mg são elementos estruturais das plantas, por isso sua liberação é mais complexa, e desempenham funções importantes como o Ca, que é sinalizador e regulador de muitos processos celulares, e Mg desempenha funções na respiração e fotossíntese (TAIZ et al., 2017). Mas sobretudo são necessários para correção dos solos brasileiros naturalmente ácidos, ou que se acidificam com o uso contínuo de adubação nitrogenada (SRIVASTAVA e RAI, 2012), com o uso da calagem além de corrigir a toxidez por alumínio, eleva os teores de Ca e Mg, fornecendo a cultura um ambiente com melhor desenvolvimento radicular (MELLIS et al., 2018).

Neste estudo após a calagem realizada em 2017, os teores de Ca e Mg demonstraram os maiores teores no palhiço no fim da safra (2016/17), chegando a 18,24 e 3,92 g kg^{-1} em áreas com 100% de palhiço e na ausência de escarificação para o cálcio e magnésio, respectivamente (Apêndice 2). Essa tendência de menores teores em áreas escarificadas (CE) ficou evidente no PC, em que 50% e 100% CE tiveram os menores teores durante toda a safra (Figura 16).

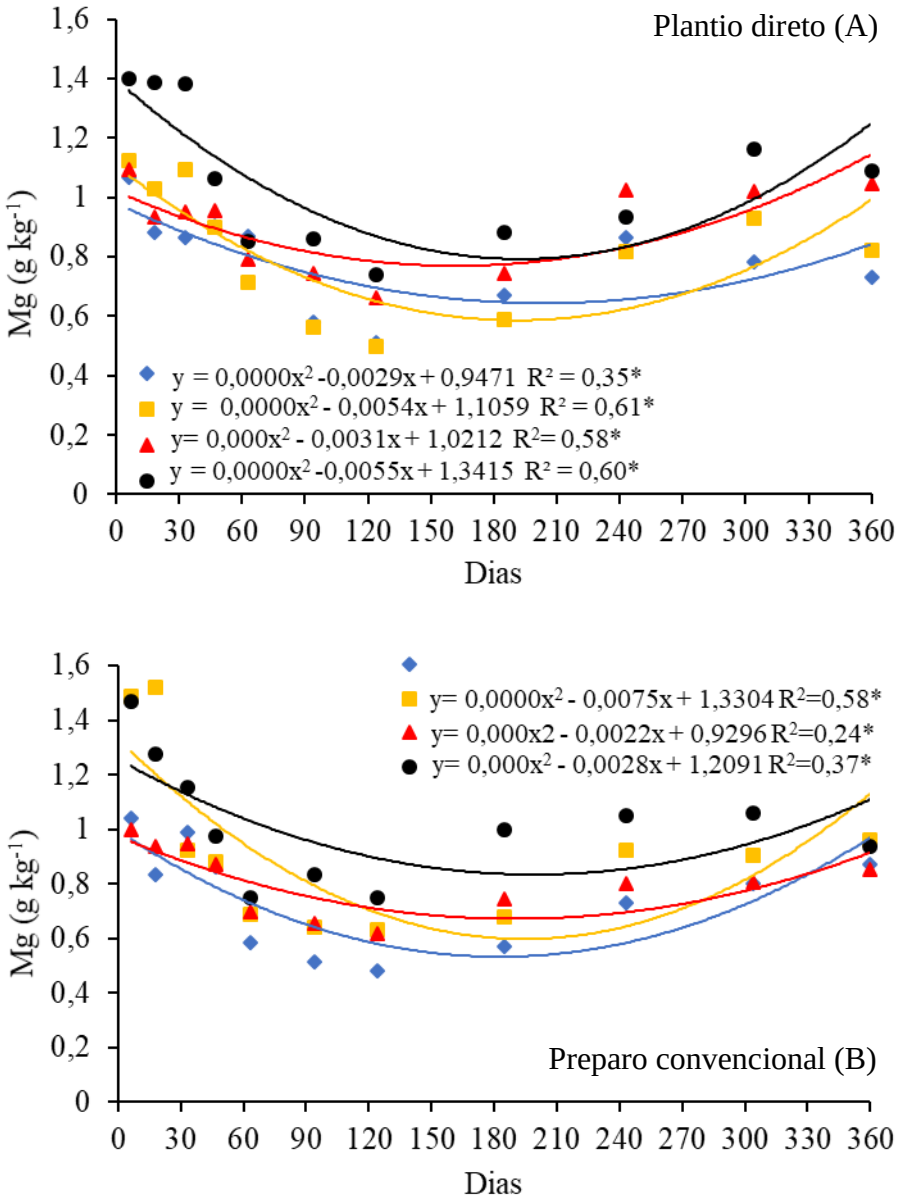


FIGURA 16. Teores de magnésio (Mg) de palhiço de cana-de-açúcar em plantio direto (A) e preparo convencional (B), em função do tempo de decomposição e níveis de palhiço remanescente e manejo com escarificação.50% com escarificação (◆), 50% sem escarificação (■), 100% com escarificação (▲) e 100% sem escarificação (●). * Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

Os teores de enxofre (S) tiveram melhor ajuste linear em todos tratamentos exceto para 50% CE e 100% SE no preparo convencional (PC), que tiveram ajuste quadrático (Figura 17A e B). Nota-se uma pequena queda nos teores até aos 94 dias de avaliação para todos tratamentos, e posterior incremento de 36,03% no PD e 71,55% para PC (Figura 17A e B).

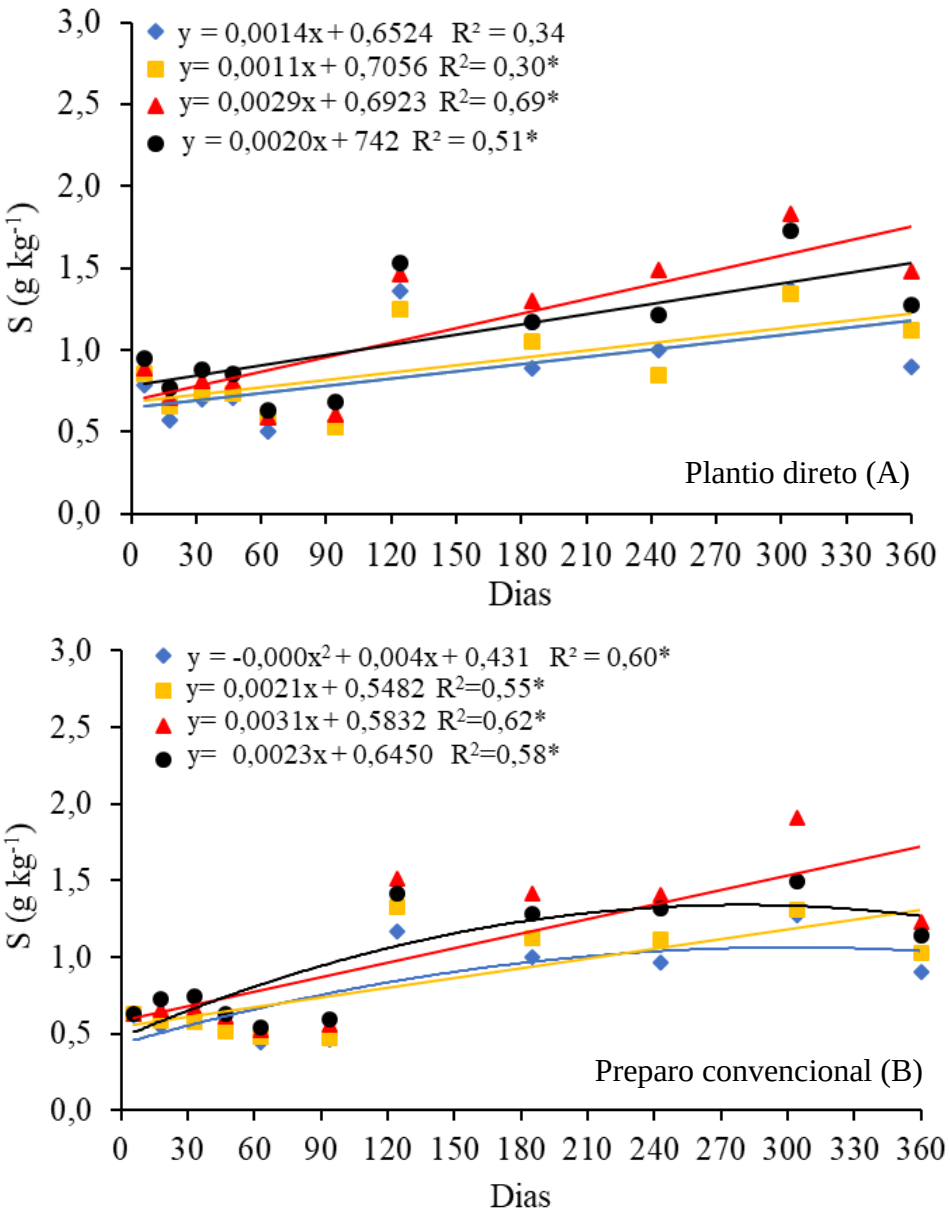


FIGURA 17. Teores de enxofre (S) de palhiço de cana-de-açúcar em plantio direto (A) e preparo convencional (B), em função do tempo de decomposição e níveis de palhiço remanescente e manejo com escarificação.50% com escarificação (◆), 50% sem escarificação (■), 100% com escarificação (▲) e 100% sem escarificação (●). * Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

Com a manutenção de 100% de palhiço, independente do sistema de plantio e uso da escarificação, promoveram maiores teores de S ao longo da safra (Figura 17A e B). Pompeo et al. (2013), ao avaliarem níveis de palhiço de cana-de-açúcar também verificaram maiores teores de S na área com 100% de manutenção, devido ao maior aporte de massa e acúmulo de nutrientes. Essa tendência de maiores teores na área com

maior aporte de palhiço ocorre desde a primeira soca na safra 2014/15, com pouca alteração até a safra atual (Apêndice 2).

Com relação a liberação de macronutrientes, no início deste acompanhamento de safra até os 47 dias de avaliação foi observada pequena queda nos teores de P, cerca de 11,9% e 15,1% no PD e PC, respectivamente (Figura 18A e B). Essa rápida e pequena liberação para o solo, segundo Buchanan e King (1993), ocorre pela perda de fósforo solúvel em água que fica concentrada nos tecidos vegetais. Supõe-se que essa liberação auxilie na redução de imobilização e fixação pelos óxidos de ferro, aumentando a eficiência deste nutriente (FROSSARD et. al., 1995).

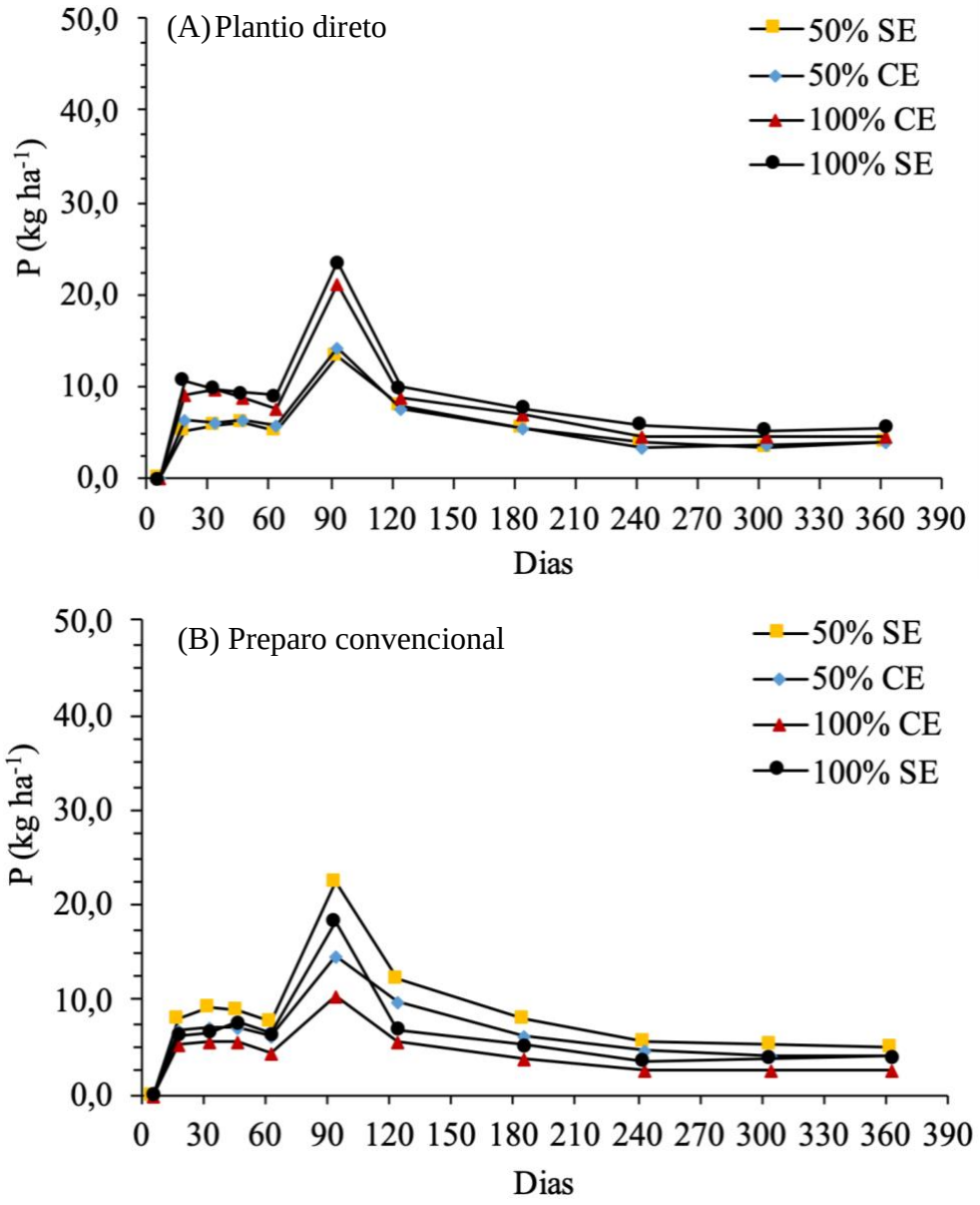


FIGURA 18. Liberação de fósforo (P) de palhiço de cana-de-açúcar em plantio direto (A) e preparo convencional (B), em função do tempo de decomposição, níveis de palhiço remanescente e manejo com (CE) e sem escarificação (SE).

Aos 94 dias de avaliação houve um pico de liberação de P para o solo em ambos sistemas de plantio, no PD com 100% de manutenção teve uma média de 22,33 kg ha^{-1}, enquanto que com 50% de palhiço liberaram 13,74 kg ha^{-1} de P (Figura 18A). Além do maior aporte de palhiço no solo, as condições de umidade e temperatura podem ter influenciado no pico de liberação de P aos 94 dias, este período compreendeu o mês de outubro de 2018, que obteve 215 mm de chuva (Figura 1), tendendo a diminuir nos meses subsequentes, assim como o decrescimento desta liberação. Portanto a umidade adequada no período desta avaliação influenciou na maior atividade microbiana, acelerando a disponibilização deste nutriente.

Este período de 94 dias no ciclo fenológico da cana-de-açúcar indica o estágio de perfilhamento, que pode durar até os 120 dias, época onde ocorrem um grande desenvolvimento radicular das touceiras e formação dos perfilhos (DIOLA e SANTOS, 2012). Supõe-se que além de fatores edafoclimáticos a maior liberação esteja ligada a esta fase da cultura, pois o P atua principalmente no desenvolvimento radicular e de colmos (BASTOS et al., 2008).

No sistema de preparo convencional é observada influência do uso da escarificação sobre os níveis de palhiço, sendo que os níveis de 50% e 100% de palhiço sem escarificação (SE) alcançaram as maiores liberações de P neste mesmo período (Figura 18B). Supõe-se que o revolvimento provocado pelo escarificador tenha perturbado a atividade microbiana nas áreas com escarificação (CE), que reduziu sua decomposição.

O potássio (K) teve a maior e mais rápida liberação para o solo, até os 124 dias de decomposição do palhiço já haviam sido liberados, em média, 82,5% do K total para as áreas de 50% de manutenção de palhiço, e 71,5% dos sistemas com 100% de palhiço. Na avaliação dos 180 dias houve certo incremento de K e posterior estabilização em ambos sistemas de plantio (Figura 19A e B). De acordo com Menandro et al. (2017) a liberação de K em cultivos de cana de açúcar pode chegar até 90% em um único ano, corroborando as taxas obtidas neste estudo.

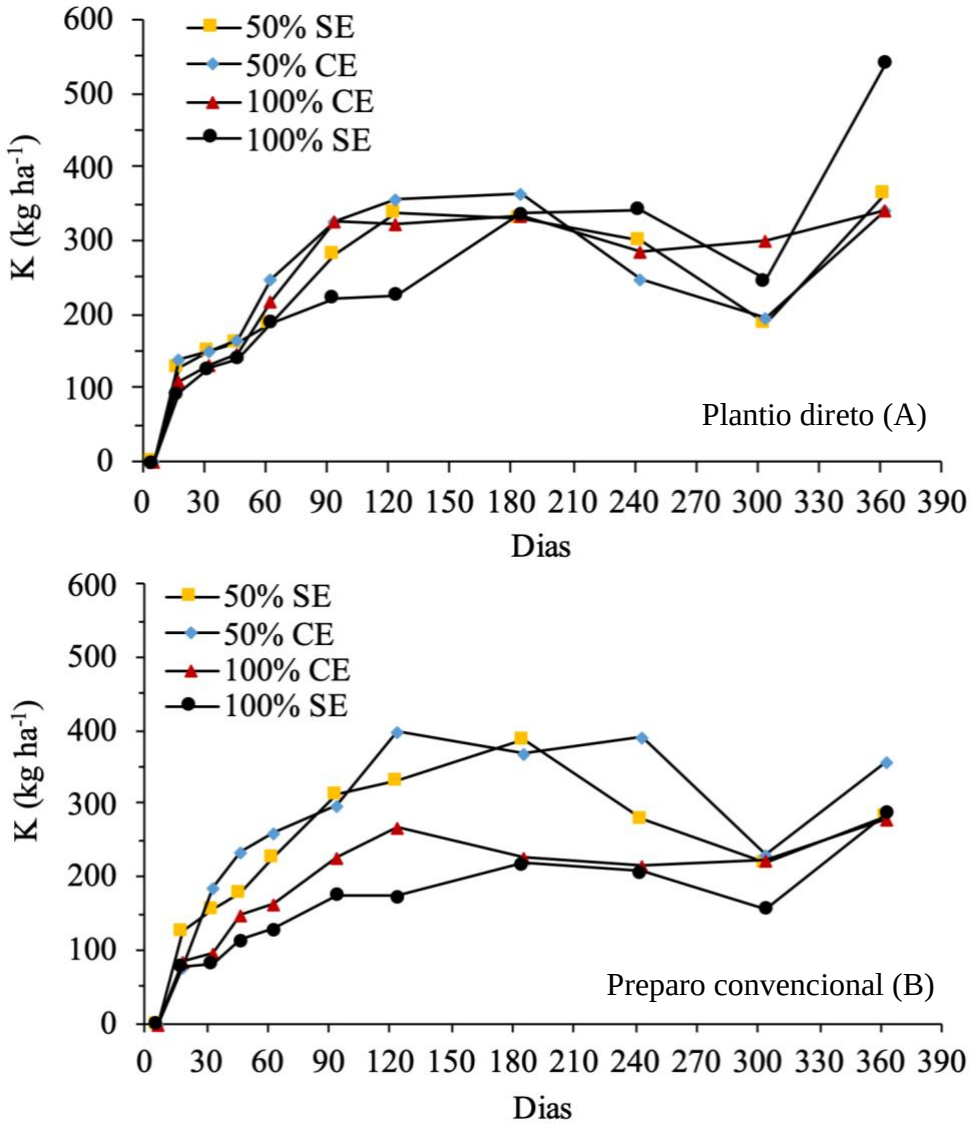


FIGURA 19. Liberação de potássio (K) de palhiço de cana-de-açúcar em plantio direto (A) e preparo convencional (B), em função do tempo de decomposição, níveis de palhiço remanescente e manejo com (CE) e sem escarificação (SE).

Em geral, no fim da safra (360 dias), com a manutenção de 100% sem escarificação resultou na maior liberação (541,07 kg ha^{-1}) e tempo de meia vida de 125,5 dias em PD. Já para o PC neste mesmo sistema liberou 288,41 kg ha^{-1} (Figura 19A e B)., com as altas taxas de liberação a velocidade de decomposição (k) tende a ser menor, refletindo no maior tempo de meia vida deste material vegetal, que foi de 158,6 dias.

O Ca apresentou uma liberação muito significativa e dependente dos níveis de palhiço e escarificação em preparo convencional (PC). As áreas que não receberam a escarificação e independente do nível de palhiço (50% e 100% SE) apresentaram em média o dobro de kg ha^{-1} liberados (Figura 20B), atingindo valores de 209,46 kg ha^{-1} liberados aos 63 dias de decomposição (Figura 20B), o que está relacionado a sua alta

velocidade de decomposição (0,0085 dia^{-1}), com tempo de meia vida de 81 dias. Em contrapartida no PD a liberação não ultrapassou 121,41 kg ha^{-1} aos 124 dias (Figura 20A), com baixa velocidade de decomposição (0,0024 dia^{-1}) e tempo de meia vida de 279,7 dias.

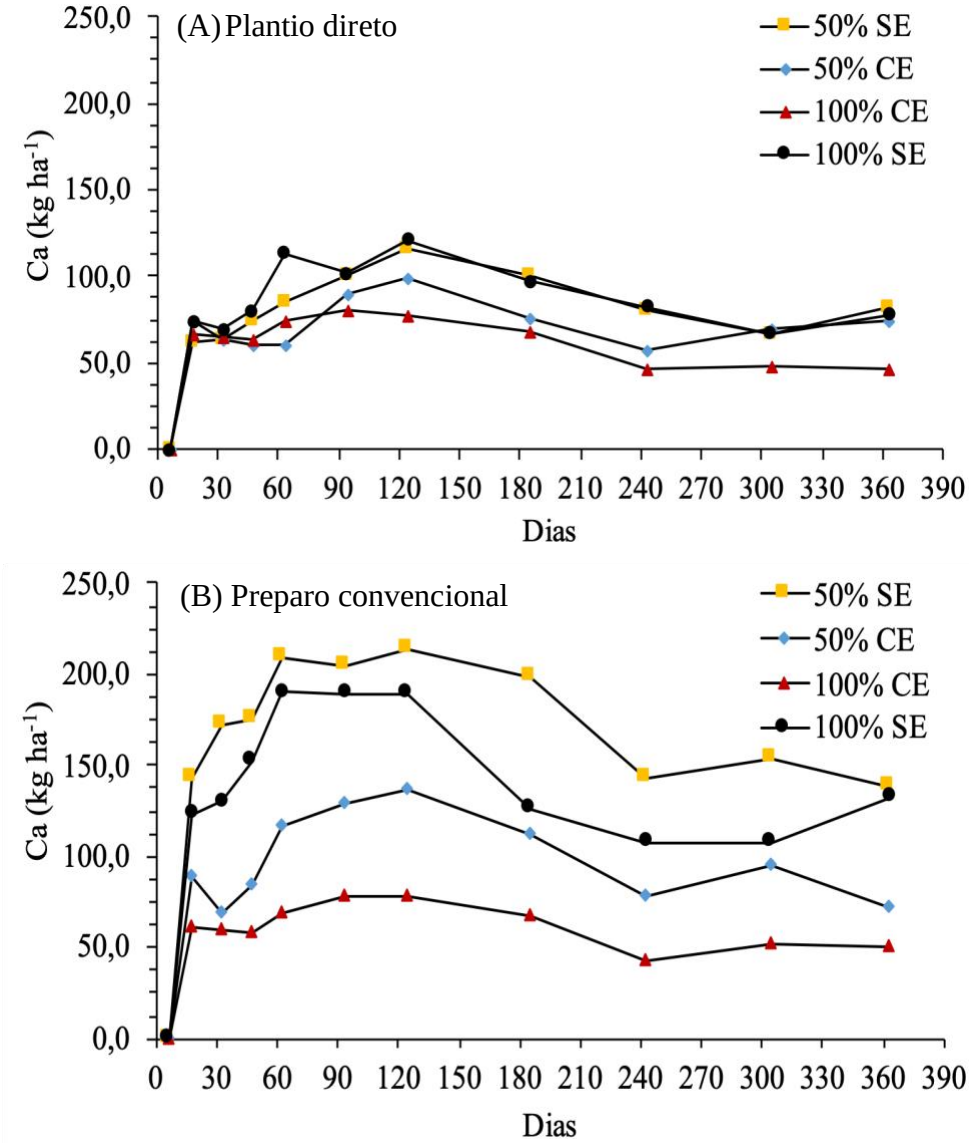


FIGURA 20. Liberação de cálcio (Ca) de palhiço de cana-de-açúcar em plantio direto (A) e preparo convencional (B), em função do tempo de decomposição, níveis de palhiço remanescente e manejo com (CE) e sem escarificação (SE).

A liberação do Mg se manteve semelhante entre os sistemas, não ultrapassando 67,90 kg ha^{-1}, com a máxima alcançada aos 185 dias no PC e nível de palhiço de 50% sem escarificação, que ao fim da safra apresentou 36,52% de liberação em relação ao teor inicial (Figura 21D). Em PD os tratamentos finalizaram a safra com

valores muito baixos e semelhantes, representando uma média de 21,2% de liberação (Figura 21C).

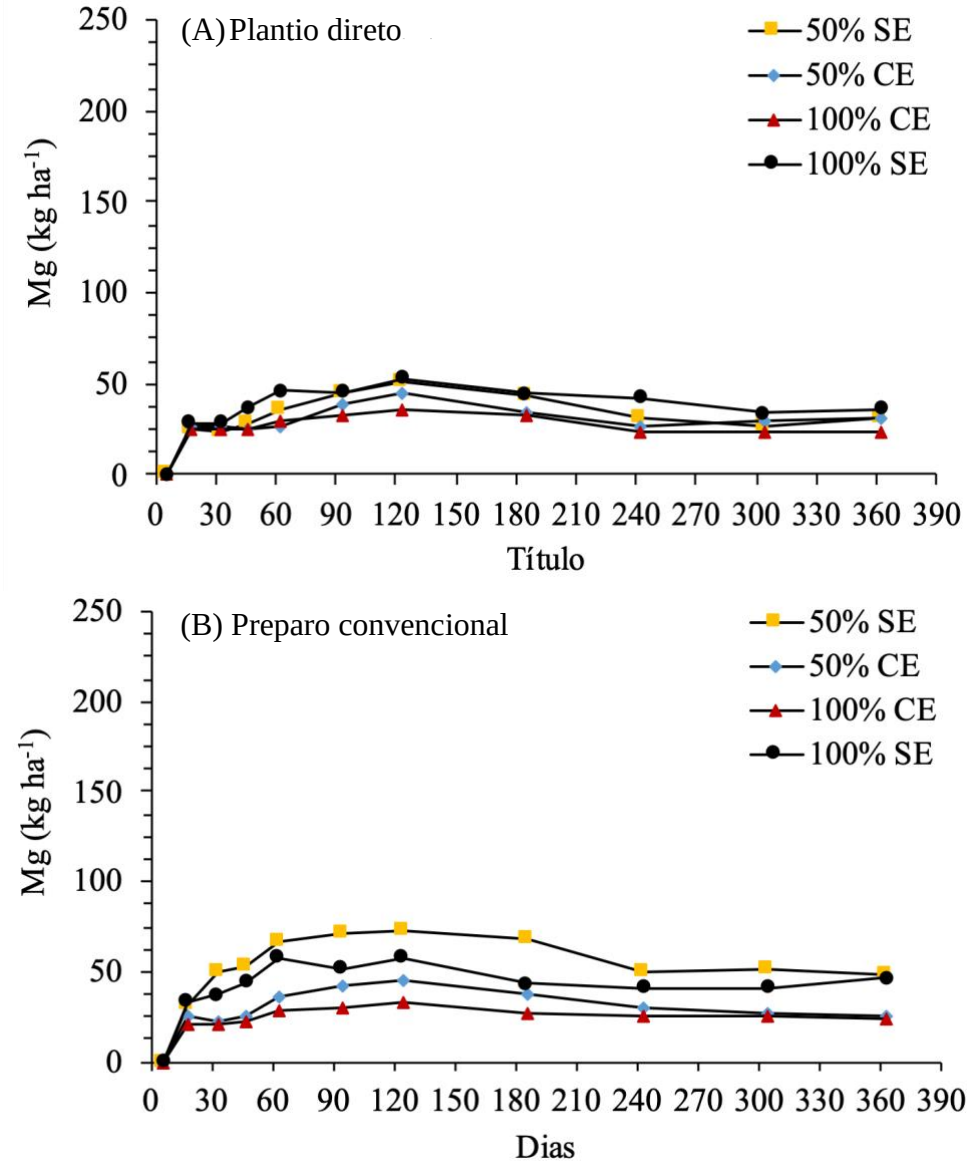


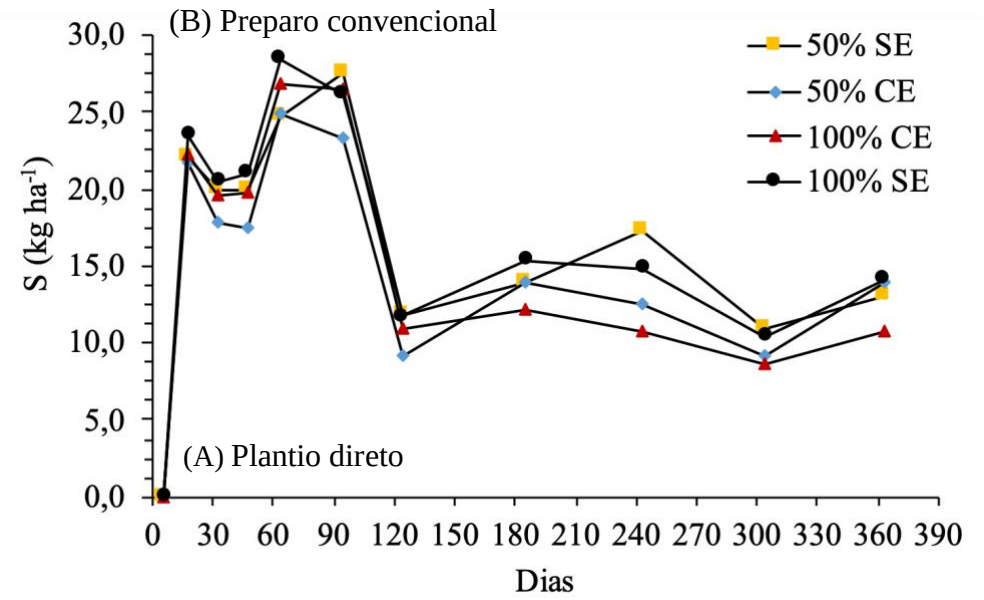
FIGURA 21. Liberação de magnésio (Mg) de palhiço de cana-de-açúcar em plantio direto (A) e preparo convencional (B), em função do tempo de decomposição, níveis de palhiço remanescente e manejo com (CE) e sem escarificação (SE).

O período com maiores liberações de Ca e Mg compreendeu dos 94 aos 185 dias de decomposição, em ambos sistemas de plantio (PD e PC) independentemente do nível de palhiço remanescente (Figura 20 e 21). A queda da relação C/N neste período foi significativa, que pode responder essa liberação, pois houve maior decomposição do palhiço (Quadro 19), contudo a influência desses nutrientes na melhoria do solo para o desenvolvimento radicular também pode ter influenciado (DIOLA e SANTOS, 2012).

A aplicação de calcário foi em superfície, fato que pode ter retardado seu efeito, e sua liberação da palha (Ca e Mg) ocorreu a partir dos 94 dias, fase no ciclo fenológico da cana-de-açúcar que compreende a fase de maior ramificação subterrânea, perfilhamento e início do crescimento de colmos (DIOLA e SANTOS, 2012), que pode ter acelerado a liberação desses nutrientes para o solo neste período.

Já o enxofre (S) respondeu de forma mais significativa ao sistema de plantio, comparado aos níveis de palhiço remanescente, com maior liberação aos 63 dias (PD e PC), possivelmente pela maior liberação de massa seca em todos tratamentos neste mesmo período (Figura 22A e B). Em contrapartida após os 124 dias há uma queda significativa da mineralização em ambos sistemas de plantio, refletindo na imobilização deste nutriente no material vegetal.

O S assim como parte do N e P permanecem no palhiço de uma safra para outra, desde que haja sua preservação, sua liberação para o solo é relativamente pequena comparado a outros macronutrientes (K, Ca e Mg) (BUNEDETTI, 2014). Contudo S e N estão diretamente associadas no metabolismo das plantas, por isso apresentam comportamentos semelhantes (VITTI et al., 2015), corroborando com este estudo, pois a liberação de N também teve uma queda contínua e linear após os 124 dias de avaliação.



...continua...

“FIGURA 22, cont.”

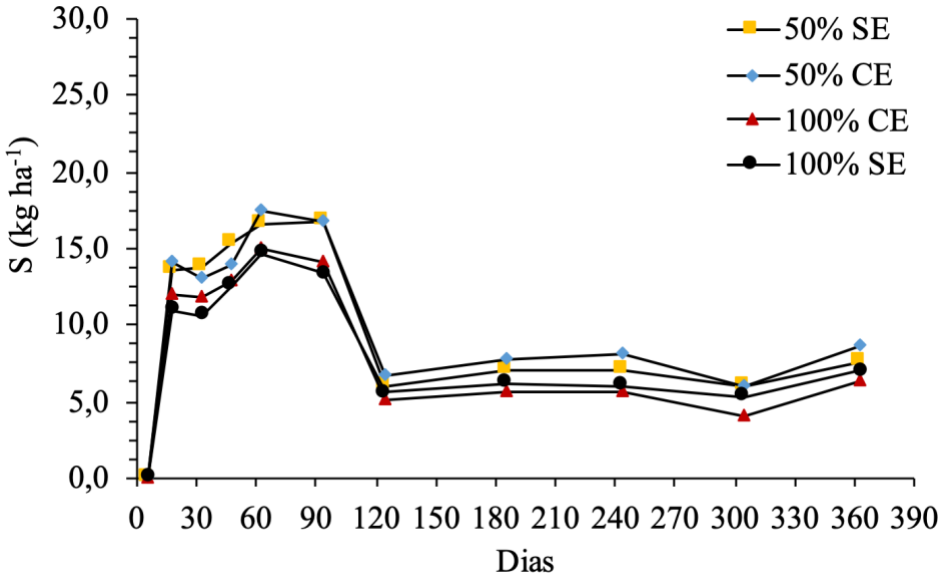


FIGURA 22. Liberação de enxofre (S) de palhiço de cana-de-açúcar em plantio direto (A) e preparo convencional (B), em função do tempo de decomposição, níveis de palhiço remanescente e manejo com (CE) e sem escarificação (SE).

Em geral as maiores perdas de massa seca e liberação de nutrientes ocorreu nos primeiros 63 dias, em maior proporção no sistema com 100% de manutenção de palhiço e ausência de escarificação no cultivo de cana-de-açúcar.

4.3.Decomposição de componentes bioquímicos do palhiço

Para os níveis de palhiço remanescente e com (CE) e sem escarificação (SE), todos modelos matemáticos se ajustaram à regressão linear, com exceção de 100% CE (Figura 23A) e 50% SE (Figura 23B), que tiveram melhor ajuste quadrático para a concentração de celulose. As médias de concentrações iniciais foram de 53,65% e 46,58% para o PD e PC, respectivamente (Figura 23A e B).

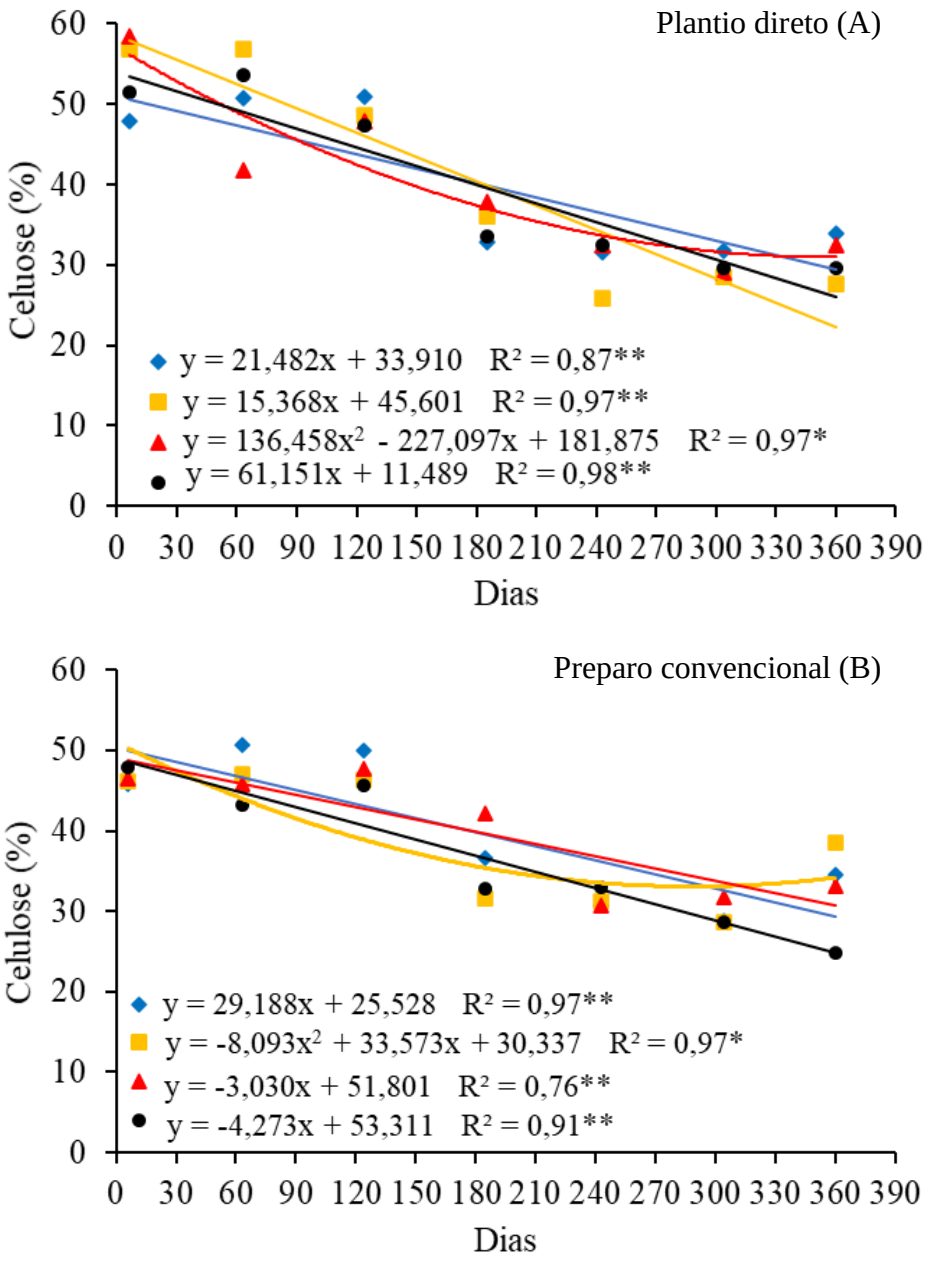


FIGURA 23. Concentração de celulose de palhiço de cana-de-açúcar em plantio direto (A) e preparo convencional (B) em função do tempo de decomposição, níveis de palhiço remanescente e manejo com escarificação. 50% com escarificação (◆), 50% sem escarificação (■), 100% com escarificação (▲) e 100% sem escarificação (●). * e ** Significativo a 5% e 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

A celulose foi o conteúdo que teve a maior decomposição entre os componentes bioquímicos do palhiço, e a partir dos 124 dias nos dois sistemas de preparo a queda foi mais acentuada (Figura 23). A maior evidência entre os níveis de palha no

PC, onde foi observado que a manutenção de 100% de palhiço e sem escarificação a decomposição foi maior (Figura 23B). Resultado que confirma o padrão da decomposição de massa seca do palhiço no preparo convencional, neste mesmo período e tratamento (100% SE) a liberação de massa reduziu de forma linear, e superior aos demais níveis de palhiço (Figura 8B).

No PD o sistema com 50% SE os menores teores de celulose (27,67%) aos 243 dias, e ao fim da safra este tratamento decompôs 54,59% de seu conteúdo total (Figura 23A). A partir dos 185 dias foi decomposto uma média de 34,5% e 23,60% em PD e PC, respectivamente (Figura 23). Com a redução dessas quantidades no palhiço e observando a liberação de massa na Figura 8A, fica evidente que a partir deste período há um novo crescimento na liberação devido à redução da celulose, em PD.

Resultados de pesquisa corroboram com a premissa de que a celulose e hemicelulose são grandes precursoras da decomposição de massa seca em sistemas produtivos de cana-de-açúcar. Wang et al. (2021), ao avaliarem diferentes proporções de palha e resíduos orgânicos na superfície, observaram que a maior porcentagem de decomposição de celulose e hemicelulose ocorreu ao final da safra (365 dias), com maior aporte de palha. Pimentel et al. (2019) também observaram tal efeito, em seu estudo os locais com 75 e 50% de remoção de palhiço foram verificadas menores taxas de decomposição de celulose e hemicelulose, pois o ambiente com menor cobertura do solo prejudicou a atividade microbiana, responsável pela degradação destes componentes.

A degradação da hemicelulose se manteve constante e com ajuste linear decrescente para todos os níveis de palha, exceto para 50% CE que foi melhor explicado por modelo quadrático (Figura 24B). O nível de 100% sem escarificação tiveram a maior perda de hemicelulose, variando de 28,48% a 15,19% no PD e PC, respectivamente. Em contrapartida a manutenção de 100% com escarificação tiveram as menores decomposições, apresentando 25,21% e 28,6%, respectivamente (Figura 24).

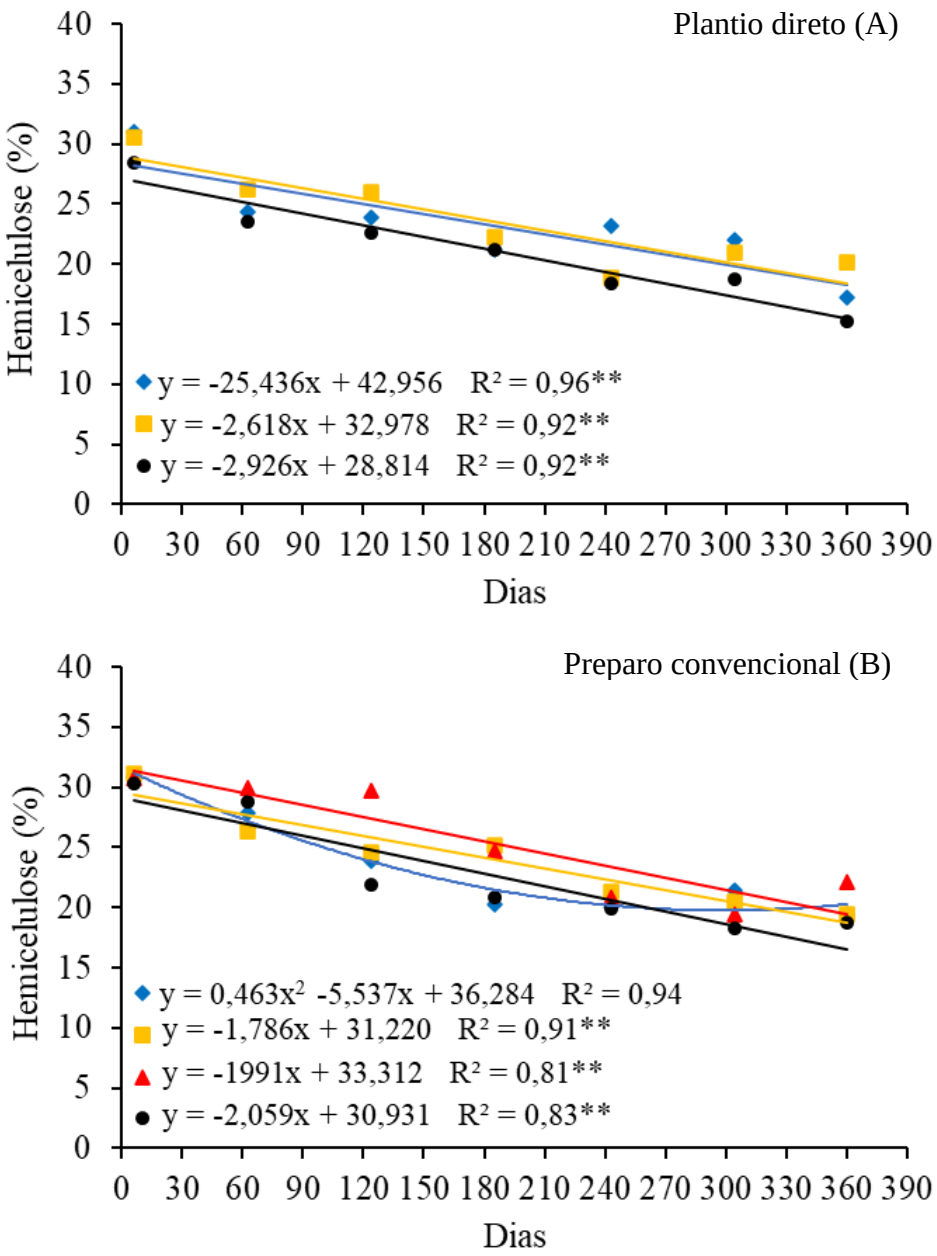


FIGURA 24. Concentração de hemicelulose de palhiço de cana-de-açúcar em plantio direto (A) preparo convencional (B) em função do tempo de decomposição, níveis de palhiço remanescente e manejo com escarificação. 50% com escarificação (◆), 50% sem escarificação (■), 100% com escarificação (▲) e 100% sem escarificação (●). ** Significativo 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

O fato da menor decomposição de hemicelulose nos sistemas com uso de escarificação e o preparo convencional, mesmo com manutenção de 100% de palhiço, pode ser atribuído ao uso do escarificador. O processo de decomposição é completamente dependente da ação dos microrganismos do solo, principalmente das enzimas

extracelulares (HAICHAR et al., 2007). O revolvimento causado pela escarificação pode resultar em desequilíbrio microbiano (BETTIO e ARAÚJO, 2016), em consequência afetar a atividade enzimática (BARBIERI et al., 2019).

Quanto à lignina, pode ser observado aumento linear para todos os níveis de palha (CE e SE) nos dois sistemas de preparo de solo (PD e PC) (Figura 25). Fica evidente a maior concentração de lignina nos sistemas com 100% de palhiço remanescente, independente do uso da escarificação para PD (Figura 25A).

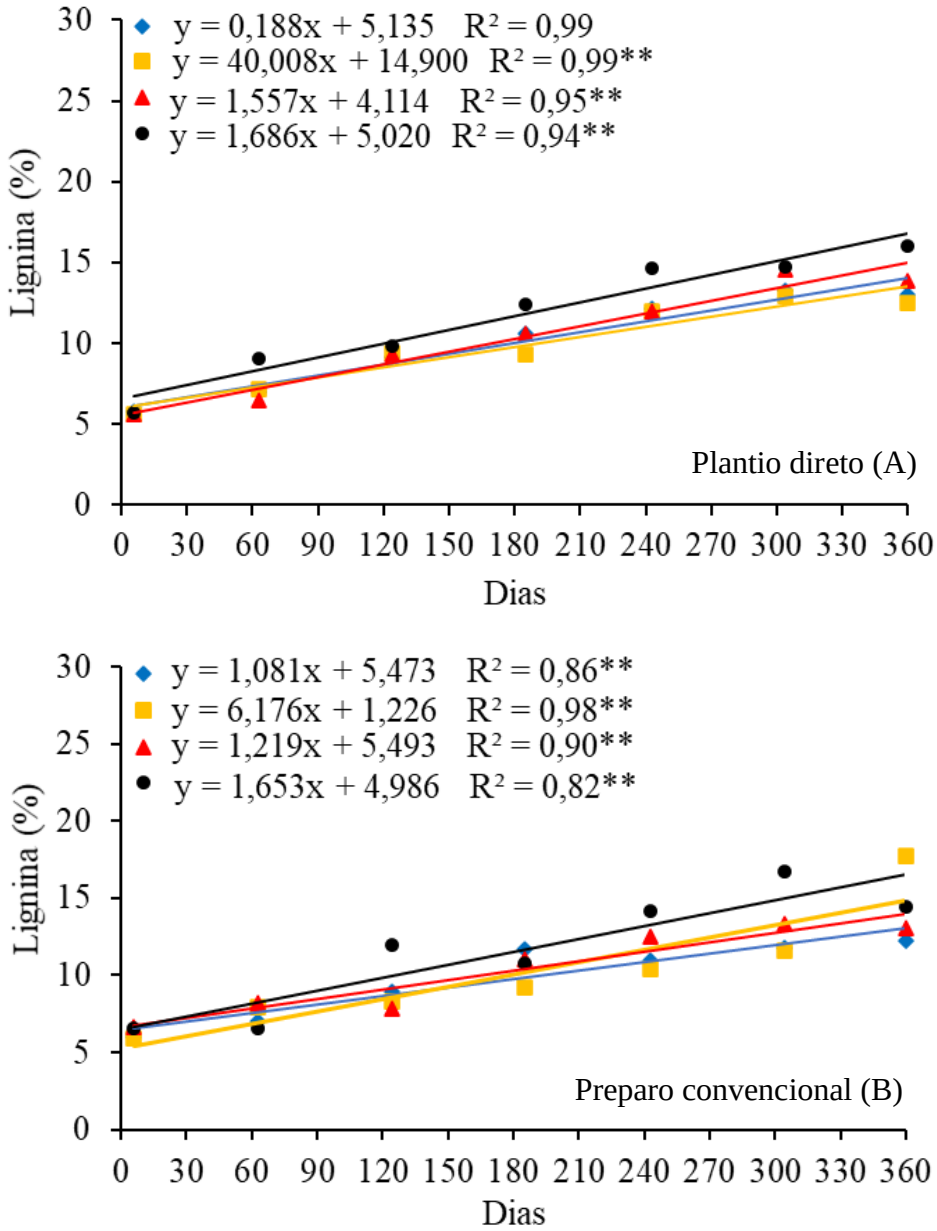


FIGURA 25. Concentração de lignina de palhiço de cana-de-açúcar em plantio direto (A) e preparo convencional (B) em função do tempo de decomposição, níveis de palhiço remanescente e manejo com escarificação. 50% com escarificação (◆), 50% sem

escarificação (■), 100% com escarificação (▲) e 100% sem escarificação (●). ** Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

A ausência de escarificação (SE) pode ter influenciado no PC, pois com 50% e 100% a concentração de lignina ao final do ciclo alcançou os maiores valores, 17,74% e 14,46%, respectivamente (Figura 25B). A lignina é relativamente mais resistente à decomposição (TAIZ et al., 2017), por isso pode haver certo aumento nos teores de acordo com a degradação dos demais componentes (celulose e hemicelulose), pois a perda real de massa do material vegetal, segue a tendência de celulose e hemicelulose (YAMAGUCHI, 2015). As áreas sem escarificação promoveram maior decomposição de hemicelulose, independente do sistema de plantio (PD e PC) (Figura 25), confirmando a dependência da degradação deste componente para o enriquecimento de lignina no palhiço nas condições deste estudo.

Alguns autores não indicam o acompanhamento da lignina como preditor de decomposição de massa, devido a sua lenta mineralização, sendo necessário o acompanhamento de diversas safras para comprovar sua influência (RAMOS et al., 2016; SOUZA JÚNIOR et al., 2017; PIMENTEL et al., 2019). Devido às composições estruturais a celulose e a hemicelulose são consideradas componentes lignocelulósicos mais lábeis (WAGNER e WOLF, 1999; TORRES et al., 2014), logo podem ser ótimos indicadores da decomposição de palhiço no cultivo de cana-de-açúcar.

Em geral o nível de 100% de palhiço sem escarificação foi mais eficiente na decomposição de celulose e hemicelulose, seguindo a tendência da massa seca. Enquanto que o enriquecimento de lignina que é decorrente da queda desses componentes, também foi verificado no nível de 100%. Portanto a não retirada de palhiço do campo no cultivo de cana-de-açúcar pode acelerar a decomposição desse resíduo, devido a maior decomposição dos componentes bioquímicos.

4.4 Nutrição e produtividade da cana-de-açúcar

Para a diagnose foliar da cultura da cana-de-açúcar na primeira soqueira houve interação significativa ($p<0,05$) entre a escarificação e os níveis de palhiço para N, P, K, Ca e Mg. O preparo de solo somente apresentou interação significativa ($p<0,05$) para o Ca (Quadro 20).

QUADRO 20. Teores de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) de cana-de-açúcar em plantio direto e preparo convencional, em função dos níveis de palhiço remanescente e manejo com e sem escarificação, na safra 2014/15

Preparo de solo	N	P	K	Ca	Mg	S
	g kg^{-1}					
PD	16,80 b	1,661 a	11,000 a	3,741 a	1,172 a	1,255 a
PC	17,19 a	1,717 a	11,395 a	4,414 b	1,222 a	0,979 b
CV (%)	2,11	11,28	3,85	12,44	9,40	11,29
Palhiço (%)						
0	17,18 a	1,629 a	11,031 a	4,362 a	1,216 a	1,183 a
50	16,87 a	1,687 a	11,218 a	4,032 b	1,198 a	1,088 a
100	16,93 a	1,751 a	11,343 a	3,838 b	1,176 a	1,081 a
CV (%)	3,53	13,12	3,24	8,30	7,76	12,43
Escarificação						
CE	16,59 b	1,657 a	11,270 a	3,697 b	1,146 a	1,115 a
SE	17,40 a	1,721 a	11,125a	4,458 a	1,247 b	1,120 a
CV (%)	3,09	12,95	4,23	7,71	5,42	5,92
Teste F						
Preparo x Palhiço	2,733^{ns}	1,691^{ns}	3,000^{ns}	5,633*	2,255^{ns}	2,079^{ns}
Escarificação x Preparo	0,117^{ns}	5,031^{ns}	0,023^{ns}	0,877^{ns}	3,093^{ns}	2,538^{ns}
Escarificação x Palhiço	22,184*	8,833^{ns}	6,233*	27,491*	10,573^{ns}	1,329^{ns}
Escarificação x Preparo x Palhiço	0,601^{ns}	1,034^{ns}	0,651^{ns}	0,577^{ns}	1,449^{ns}	2,404^{ns}

Médias seguidas por letras minúsculas iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. PD: plantio direto, PC: preparo convencional, CE: com escarificação, SE: sem escarificação

Neste estudo foi observado maior teor de N no palhiço remanescente em áreas sem escarificação (Quadro 20) na safra 2015/16, fato que corrobora com seus teores na folha, visto que grande parte do palhiço é composto por folhas.

O enxofre (S) na folha se manteve em teores abaixo da faixa adequada (1,5 a 3,0 g kg^{-1}) para a cultura (RAIJ et al., 1997), com média de 1,12 g kg^{-1}, e menor teor no preparo convencional (0,979 g kg^{-1}). Já para o teor de fósforo (P) não houve nenhuma interação ou significância entre os sistemas na safra 2014/15 (Quadro 20), seus teores na planta estavam dentro da faixa ideal para a cultura, 1,5 a 3,0 g Kg^{-1} (RAIJ et al., 1997). Por ser a primeira soqueira não houve tempo suficiente da cultura apresentar queda nos teores foliares de P, visto que não houve distinção de doses durante a adubação de plantio, como também foi observado por Soltangheisi et al. (2021),

O teor de nitrogênio (N) na cultura da cana-de-açúcar foi superior (17,19 g Kg^{-1}) no preparo convencional (PC) (Quadro 21), ainda a baixo do teor considerado adequado por Raij et al. (1997), que varia de 18 a 25 g Kg^{-1}. Houve interação entre os níveis de palhiço e uso da escarificação, onde os sistemas com 50 e 100% de palhiço foram superiores na ausência de escarificação (SE), quando escarificados (CE) o fator palhiço não foi significativo (Quadro 21). Apesar de não estar dentro da faixa ideal para a cultura, os teores se mantiveram próximos, possivelmente não prejudicou de forma significativa o desenvolvimento vegetal.

QUADRO 21. Teores de nitrogênio (N), potássio (K) e cálcio (Ca) de cana-de-açúcar com e sem escarificação, em plantio direto e preparo convencional em função dos níveis de palhiço remanescente, na safra 2014/15

Palhiço (%)	N		K		Ca	
	g kg^{-1}					
	Escarificação					
	SE	CE	SE	CE	SE	CE
0	16,88 aA	1,74 aA	11,18 aA	10,87 aB	4,26 aA	4,45 aA
50	17,58 aA	1,61 bB	11,18 aA	11,25 aAB	4,66 aA	3,40 bB
100	17,77 aA	1,61 bB	10,93 bA	11,75 aA	4,44 aA	3,22 bB

Ca (g kg^{-1})		
	Preparo de solo	
Palhiço (%)	PD	PC
0	4,92 aA	3,80 bB
50	4,31 aA	3,75 aAB
100	4,01 aA	3,66 aA

Médias seguidas por letras minúsculas iguais na linha e maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. PD: plantio direto, PC: preparo convencional, CE: com escarificação, SE: sem escarificação

O potássio (K) foi significativo ($p<0,05$) entre os níveis de palhiço, o maior teor (11,75 g kg^{-1}) foi na área com 100% de manutenção com uso da escarificação (CE) (Quadro 21). A relação entre a liberação e ciclagem de K proveniente do palhiço é amplamente discutida na literatura (PIMENTEL et al., 2019; SOUZA JÚNIOR et al., 2017), que corrobora com o alto teor na folha da cultura em áreas com maior aporte de palhiço, indicando uma ciclagem de nutrientes eficiente para esse elemento.

O preparo de solo e os níveis de palhiço apresentaram interação significativa ($p<0,05$) para os teores de Ca, com destaque para o PD com os maiores teores, mas sem diferenças entre os níveis de palhiço. No PC o maior teor (3,66 g kg^{-1}) foi na área com 100% de manutenção, que aumentou os teores foliares na cultura em PD, assim como os tratamentos sem escarificação (Quadro 21). A calagem que foi realizada antes do plantio, não foi revolvida na área de plantio direto, e ainda assim trouxe um incremento de Ca no solo, que foi absorvido pela cultura. A grande quantidade de resíduos na superfície do solo em PD pode mobilizar cátions e melhorar a mobilidade do calcário no perfil do solo, decorrente de ácidos orgânicos provenientes do palhiço (COSTA et al., 2016). Fato que explicaria os maiores teores foliares nas áreas com PD e 100% de manutenção de palhiço.

Na segunda soqueira do experimento, os teores de N, P e Ca tiveram um aumento ($p<0,05$) no PD (Quadro 22). O Mg não foi influenciado ($p>0,05$) por nenhum fator avaliado. A retirada total de palhiço (0%) resultou nos menores teores de P e K na cultura da cana-de-açúcar, efeito que não foi observado na safra 2014/15.

QUADRO 22. Teores de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) de cana-de-açúcar em plantio direto e preparo convencional, em função dos níveis de palhiço remanescente e manejo com e sem escarificação, na safra 2015/16

Preparo de solo	N	P	K	Ca	Mg	S
	g kg^{-1}					
PD	16,30 a	1,697 a	10,955 a	3,941 a	1,529 a	2,595 a
PC	15,55 b	1,568 b	10,759 a	3,763 b	1,440 a	2,368 b
CV (%)	1,75	3,59	3,95	4,08	9,14	2,68
Palhiço (%)						
0	16,09 a	1,523 b	10,134 b	3,642 a	1,453 a	2,181 b
50	15,67 a	1,680 a	11,351 a	3,986 a	1,504 a	2,616 a
100	16,01 a	1,695 a	11,085 a	3,928 a	1,496 a	2,648 a
CV (%)	3,72	7,58	5,87	10,0	9,04	10,58
Escarificação						
CE	15,88 a	1,638 a	10,848 a	3,904 a	1,487 a	2,517 a
SE	15,97 a	1,627 a	10,865 a	3,800 a	1,482 a	2,446 a
CV (%)	3,20	3,65	4,97	6,49	3,65	8,69
Teste F						
Preparo x Palhiço	$3,007^{*}$	$1,247^{ns}$	$2,454^{ns}$	$2,788^{ns}$	$3,645^{*}$	$7,599^{*}$
Escarificação x Preparo	$2,607^{ns}$	$0,005^{ns}$	$5,326^{ns}$	$0,001^{ns}$	$1,770^{ns}$	$2,560^{ns}$
Escarificação x Palhiço	$3,138^{ns}$	$2,182^{ns}$	$0,546^{ns}$	$1,623^{ns}$	$3,271^{*}$	$3,276^{ns}$
Escarificação x Preparo x Palhiço	$0,222^{ns}$	$5,991^{*}$	$4,448^{*}$	$4,751^{*}$	$10,135^{*}$	$3,460^{*}$

Médias seguidas por letras minúsculas iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. PD: plantio direto, PC: preparo convencional, CE: com escarificação, SE: sem escarificação

Pelo fato da forma solúvel que o K está presente nos tecidos vegetais, sua lixiviação, a pronta disponibilização para o solo e absorção pela cultura, torna os efeitos da remoção de palhiço mais significativas (CARVALHO et al., 2017). Já para o P, apesar de sua pequena proporção no palhiço, sua remoção pode ser significativa para disponibilização no solo e posterior reciclagem pela cultura (LISBOA et al., 2018), que pode responder a queda deste nutriente no tratamento com 0% de manutenção. Embora tenha ocorrido esta queda, os teores de P e K com a remoção do palhiço permaneceram dentro da faixa ideal para a cultura, com 1,523 g kg^{-1} e 10,134 g kg^{-1}, respectivamente.

Houve interação significativa do preparo de solo e os níveis de palhiço para N e S na safra 2015/16 (Quadro 23). Com a remoção total de palhiço (0%) os teores de N foram superiores no PD, com 16,76 g kg^{-1}, mas sem significância quando se avalia os níveis de palhiço de forma isolada. A boa atividade microbiana observada em 2015 através do C-BMS e C-CO_2 (Quadro 4) no PD pode responder o maior teor de N foliar neste sistema, pois com o melhor ambiente proporcionado aos microrganismos, a mineralização de nutrientes e disponibilização para a cultura pode ser beneficiada (WANG et al., 2020).

QUADRO 23. Teores de nitrogênio (N) e enxofre (S) de cana-de-açúcar em plantio direto e preparo convencional, em função dos níveis de palhiço remanescente, na safra 2015/16

Palhiço (%)	N		S	
	g kg^{-1}			
	Preparo de solo			
	PD	PC	PD	PC
0	16,76 aA	15,42 bA	2,15 aB	2,20 aA
50	15,91 aA	15,43 aA	2,93 aA	2,29 bA
100	16,23 aA	15,80 aA	2,69 aA	2,60 aA

Médias seguidas por letras minúsculas iguais na linha e maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de tukey a 5% de probabilidade. PD: plantio direto, PC: preparo convencional.

Todavia para o S a manutenção de palhiço (50 e 100%) elevou os teores no PD (Quadro 23), mantendo dentro da faixa adequada para a cultura. Os teores foliares corroboram com os altos teores encontrados no palhiço na maior manutenção (100%) (Figura 13E e F). Apesar da não significância de N para os níveis de palhiço remanescente, Vitti et al. (2005) afirmam que S e N apresentam comportamentos semelhantes na planta, e nesta safra ambos tiveram maiores teores no PD.

Na terceira soqueira os teores de P e K foram inferiores ($p<0,05$) com a retirada total de palhiço, ficando abaixo do teor adequado para a cultura da cana-de-açúcar (Quadro 24). Soltangheisi et al. (2021) também verificaram deficiência nutricional em estudo da dinâmica de P no cultivo de cana-de-açúcar e níveis de palhiço remanescente em um solo argiloso, verificaram que a remoção total de P provocou deficiência nutricional na cultura, e quantidades abaixo de 5 Mg ha^{-1} podem prejudicar a disponibilidade de P. Esse resultado corrobora com este estudo pois o nível de 0% de palhiço correspondeu a 1,50 Mg ha^{-1} na safra 2015/16 (Quadro 3), portanto limitou a disponibilidade de P para solo e sua absorção pela cultura.

QUADRO 24. Teores de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) de cana-de-açúcar em plantio direto e preparo convencional, em função dos níveis de palhiço remanescente e manejo com e sem escarificação, na safra 2016/17

Preparo de solo	N	P	K	Ca	Mg	S
	g kg^{-1}					
PD	14,12 a	1,546 a	10,126 a	4,791 a	1,879 a	1,911 a
PC	13,99 a	1,537 a	10,234 a	4,471 b	1,788 b	1,946 a
CV (%)	8,49	7,00	3,63	7,20	4,76	13,71
Palhiço (%)						
0	14,11 a	1,491 b	9,533 c	4,806 a	1,909 a	1,993 a
50	14,00 a	1,529 b	10,160 b	4,378 b	1,790 a	1,790 b
100	14,06 a	1,604 a	10,845 a	4,708 a	1,801 a	2,003 a
CV (%)	4,49	3,77	6,53	5,59	8,46	8,29
Escarificação						
CE	13,99 a	1,518 b	10,057 a	4,568 a	1,806 a	1,917 a
SE	14,12 a	1,565 a	10,302 a	4,694 a	1,861 a	1,940 a
CV (%)	3,67	3,59	6,17	9,56	6,96	5,64
Teste F						
Preparo x Palhiço	$1,991^{ns}$	$0,234^{ns}$	$0,656^{ns}$	$4,099^{*}$	$1,401^{ns}$	$4,239^{ns}$
Escarificação x Preparo	$3,524^{ns}$	$0,133^{ns}$	$1,686^{ns}$	$0,348^{ns}$	$3,104^{ns}$	$0,021^{ns}$
Escarificação x Palhiço	$1,365^{ns}$	$3,579^{ns}$	$0,218^{ns}$	$2,636^{ns}$	$2,666^{ns}$	$0,134^{ns}$
Escarificação x Preparo x Palhiço	$2,515^{ns}$	$0,274^{ns}$	$4,438^{ns}$	$1,395^{ns}$	$3,600^{*}$	$13,350^{*}$

Médias seguidas por letras minúsculas iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de tukey a 5% de probabilidade. PD: plantio direto, PC: preparo convencional, CE: com escarificação, SE: sem escarificação.

Os teores de Ca e Mg no tecido foliar tiveram um pequeno aumento na safra 2016/17 (Quadro 24) comparado a safra anterior. Não houve influência dos níveis de palhiço e escarificação para Mg, apenas o preparo convencional (PC) aumentou seu teor (1,879 g kg^{-1}), comparado ao PD (1,788 g kg^{-1}) (Quadro 24). Para o Ca houve interação

entre o preparo de solo e os níveis de palhiço, onde o maior aporte (100%) garantiu maior teor foliar (4,70 g kg^{-1}) no PC (Quadro 25). Apesar do preparo de solo ter sido feito em 2013, o maior revolvimento de solo após a calagem pode ter aumentado o efeito residual de disponibilização de Ca e Mg no solo, aumentando sua absorção pela cultura.

QUADRO 25. Teores de cálcio (Ca) de cana-de-açúcar em plantio direto e preparo convencional em função dos níveis de palhiço remanescente, na safra 2016/17

Palhiço (%)	Ca (g kg^{-1})	
	Preparo de solo	
	PD	PC
0	5,03 aA	4,57 aAB
50	4,62 aA	4,13 aB
100	4,71 aA	4,70 aA

Médias seguidas por letras minúsculas iguais na linha e maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. PD: plantio direto, PC: preparo convencional.

O teor foliar de N na safra 2016/17 não apresentou diferenças significativas ($p>0,05$) para nenhum fator (Quadro 25), mas apresentou uma queda acentuada comparada a safra passada 2015/16 (Quadro 22), indicando deficiência nutricional na cultura da cana-de-açúcar mesmo com as adubações anuais de N com 120 kg ha^{-1} na forma de uréia. Este resultado pode estar associado a alta relação C/N do palhiço na fase vegetativa da cana-de-açúcar, que variava de 54,72/1 a 61,93/1 (Quadro 19), considerada muito alta ao fim de uma safra, que indica a imobilização de N no palhiço, em consequência de sua baixa liberação para solo causou deficiência na folha.

Entretanto na safra 2017/18 houve um expressivo aumento de N foliar, que variou de 18,31 a 18,49 g Kg^{-1}, dentro da faixa adequada para a cultura (Quadro 26). Resultante da baixa relação C/N neste período, que variou de 36/1 a 41/1 (Quadro 19), houve maior liberação de N do palhiço para o solo, aumentando os teores foliares, independente dos tratamentos ($p>0,05$). Com a manutenção de palhiço no campo a entrada de carbono e liberação de nutrientes no solo é constante, e para o N essa liberação não ocorre de forma tão rápida (PIMENTEL et al., 2019), que pode explicar esse aumento de N foliar somente na quarta soqueira. Isso indica maior quantidade de N disponível para absorção neste período proveniente do palhiço pois não houve distinção entre doses de N mineral entre os sistemas.

QUADRO 26. Teores de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) de palhiço de cana-de-açúcar em plantio direto e preparo convencional, em função dos níveis de palhiço remanescente e manejo com e sem escarificação, na safra 2017/18

Preparo de solo	N	P	K	Ca	Mg	S
	g Kg^{-1}					
PD	18,42 a	1,752 a	10,885 a	5,202 a	1,780 a	1,605 a
PC	18,46 a	1,711 a	10,420 b	5,169 a	1,637 a	1,352 a
CV (%)	2,83	10,88	2,54	5,16	14,02	20,80
Palhiço (%)						
0	18,39 a	1,637 b	9,993 c	5,188 a	1,707 a	1,531 a
50	18,44 a	1,762 a	10,555 b	5,217 a	1,726 a	1,426 b
100	18,49 a	1,796 a	11,409 a	5,151 a	1,693 a	1,478 ab
CV (%)	2,92	6,34	3,76	11,43	10,42	4,18
Escarificação						
CE	18,56 a	1,738 a	10,580 b	5,244 a	1,697 a	1,482 a
SE	18,31 a	1,725 a	10,724 a	5,127 a	1,720 a	1,475 a
CV (%)	3,33	3,04	1,99	5,26	5,64	3,84
Teste F						
Preparo x Palhiço	4,857ns	$2,310^{ns}$	$0,226^{ns}$	$1,879^{ns}$	$3,924^{ns}$	$7,239^{sn}$
Escarificação x Preparo	$0,315^{ns}$	$1,082^{ns}$	$1,562^{ns}$	$0,525^{ns}$	$2,615^{ns}$	$0,884^{ns}$
Escarificação x Palhiço	$1,410^{ns}$	$5,184^{ns}$	$3,520^{*}$	$2,012^{ns}$	$0,609^{ns}$	$4,965^{ns}$
Escarificação x Preparo x Palhiço	$0,455^{ns}$	$0,327^{ns}$	$2,864^{ns}$	$0,402^{ns}$	$1,195^{ns}$	$9,526^{*}$

Médias seguidas por letras minúsculas iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de tukey a 5% de probabilidade. PD: plantio direto, PC: preparo convencional, CE: com escarificação, SE: sem escarificação.

Para o Ca e Mg também não houve diferenças significativas entre os sistemas (p>0,05) na safra 2017/18, mas foi observado um grande aumento em seus teores na folha, comparado as safras anteriores (Quadro 26). A calagem realizada após a colheita da terceira soca em 2017, resultou na maior disponibilização de Ca e Mg no solo, e sua absorção pela cultura, resultado que corroboram com os obtidos por Salviano et al. (2017).

A escarificação apenas teve interação com os níveis de palhiço para o K na safra 2017/18, em que os maiores teores foram observados na área com 100% de manutenção, e o menor teor ocorreu na retirada total de palhiço (0%) com uso de escarificação (Quadro 27). Com a rápida e grande liberação de K do palhiço, boa parte é reaproveitado pela cultura na mesma safra (MENANDRO et al., 2017), assim a área com

a retirada do palhiço, que é a principal fonte de disponibilização de K durante a safra, foi observada esta deficiência nutricional.

QUADRO 27. Teores de potássio (K) de cana-de-açúcar com (CE) e sem (SE) escarificação em função dos níveis de palhiço remanescente, na safra 2017/18

Palhiço (%)	K (g kg^{-1})	
	Escarificação	
	CE	SE
0	9,87 aB	10,11 aB
50	10,41 aAB	10,69 aB
100	11,45 aA	11,36 aA

Médias seguidas por letras minúsculas iguais na linha e maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de tukey a 5% de probabilidade. CE: com escarificação, SE: sem escarificação

Na quinta soqueira o preparo de solo influenciou apenas no teor foliar de K, com destaque ($p<0,05$) para o PD. Os maiores teores de P e S foram observados nos níveis de 50 e 100%, contudo ainda estão dentro da faixa adequada para a cultura da cana-de-açúcar (Quadro 28).

QUADRO 28. Teores de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) de palhiço de cana-de-açúcar em plantio direto e preparo convencional, em função dos níveis de palhiço remanescente e manejo com escarificação, na safra 2018/19

Preparo de solo	N	P	K	Ca	Mg	S
	g Kg^{-1}					
PC	17,96 a	1,574 a	9,013 a	5,036 a	1,572 a	2,239 a
PC	17,60 a	1,517 a	8,791 b	4,697 a	1,445 a	1,962 a
CV (%)	6,54	11,79	2,10	11,28	18,76	28,97
Palhiço (%)						
0	17,90 a	1,507 b	8,440 b	4,746 a	1,501 a	1,966 b
50	17,90 a	1,593 a	8,995 a	5,049 a	1,566 a	2,193 a
100	17,54 a	1,536 ab	9,271 a	4,806 a	1,459 a	2,141 a
CV (%)	3,46	5,10	6,55	7,28	7,91	8,27
Escarificação						
CE	17,75 a	1,545 a	8,804 a	4,760 a	1,485 a	1,952 b
SE	17,81 a	1,546 a	9,000 a	4,974 a	1,532 a	2,248 a
CV (%)	2,57	4,26	4,02	10,55	6,38	5,67
Teste F						

...continua...

“QUADRO 28, cont.”

Preparo x Palhiço	1,009^{ns}	1,138^{ns}	2,198^{ns}	4,035*	4,317^{ns}	1,811^{ns}
Escarificação x Preparo	0,044^{ns}	2,421^{ns}	3,091^{ns}	0,259^{ns}	1,739^{ns}	6,048^{ns}
Escarificação x Palhiço	0,006^{ns}	5,502^{ns}	7,862*	24,330*	17,067^{ns}	4,399^{ns}
Escarificação x Preparo x Palhiço	0,812^{ns}	1,637^{ns}	3,819*	0,181^{ns}	0,607^{ns}	0,445^{ns}

Médias seguidas por letras minúsculas iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de tukey a 5% de probabilidade. PD: plantio direto, PC: preparo convencional, CE: com escarificação, SE: sem escarificação.

Os teores de nitrogênio e magnésio na folha diagnóstica da cana-de-açúcar coleta aos 4 meses após a colheita não foram influenciados por nenhum fator avaliado neste estudo na quinta-soca (2018/19). Cabe ressaltar que o N apresentou deficiência nesta safra, mas se manteve próximo ao nível ideal para a cultura (18 g kg^{-1}), com média de 17,78 g kg^{-1} (Quadro 28). O K também se apresentou abaixo do nível de suficiência de acordo com interpretação dos teores críticos (RAIJ, 1997), independentemente do nível de palhiço, e houve uma interação significativa com a escarificação. As áreas CE e a 0% de palhiço tiveram o menor teor (8,07 g kg^{-1}) (Quadro 29). Portando a manutenção de palhiço no campo tem grande relevância para a liberação e reciclagem de K para a cana-de-açúcar.

QUADRO 29. Teores de potássio (K) e cálcio (Ca) de cana-de-açúcar com escarificação em função dos níveis de palhiço remanescente, na safra 2018/19

Palhiço (%)	K		Ca	
	g kg^{-1}			
	Escarificação			
	SE	CE	SE	CE
0	8,81 aA	8,07 aB	4,12 bB	5,36 aA
50	9,04 aA	8,94 aAB	5,44 aA	4,65 aAB
100	9,14 aA	9,39 aA	5,35 aA	4,25 bB

Médias seguidas por letras minúsculas iguais na linha e maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de tukey a 5% de probabilidade. CE: com escarificação, SE: sem escarificação.

A queda nos teores de K nesta última safra pode ser relacionada a alta concentração de Ca e Mg adicionados ao solo com a calagem, tornando a absorção desses elementos competitiva, pois K^{+}, Ca^{2+} e Mg^{2+} utilizam os mesmos sítios de absorção na raiz, induzindo a absorção primeiramente do elemento com maior concentração (SALVIANO et al., 2017).

Entre os macronutrientes, K e Ca foram os mais influenciados pelos níveis de manutenção de palhiço para quase todas safras, corroborando com os resultados de Lisboa et al. (2017), ao trabalharem com níveis de remoção de palhiço no cultivo de cana-de-açúcar. Estes autores atribuem essa variação de teores na folha devido às funções que esses elementos desempenham na planta, como a influência em processos fisiológicos de transporte de açúcares (ENDRES et al., 2016).

O S teve comportamento semelhante na cultura da cana, os maiores teores foram observados sempre no nível de 100% de manutenção de palhiço (Quadro 29). O bom teor foliar nessas áreas pode explicar os altos teores de S no palhiço nos mesmos tratamentos (Apêndice 2), e com a constante manutenção deste palhiço em campo a ciclagem feita pela cultura, mantém boas concentrações deste nutriente na planta.

A produtividade da cana-de-açúcar foi quantificada pela tonelada de colmo por hectare (TCH), e de açúcar por hectare produzida (TAH) acumuladas das 5 soqueiras de condução do experimento. Para ambas houve interação significativa ($p<0,05$) para o preparo de solo e níveis de palhiço remanescente (Quadro 30).

QUADRO 30. Tonelada de colmos por hectare (TCH) e tonelada de açúcar por hectare (TAH) acumulados de 2014-19, em cultivo de cana-de-açúcar em plantio direto e preparo convencional, em função dos níveis de palhiço remanescente e manejo com e sem escarificação

	TCH	TAH
	Mg ha^{-1}	
Preparo de solo		
PD	446,56 a	70,50 a
PC	413,65 b	66,06 b
CV (%)	5,6	5,33
Palhiço (%)		
0	413,08 b	66,11 b
50	421,07 b	66,73 b
100	456,17 a	72,00 a
CV (%)	5,37	5,34
Escarificação		
SE	437,93 a	69,84 a
CE	422,29 b	66,71 b
CV (%)	4,94	5,59
Teste F		
Preparo x Palhiço	10,528*	12,038*
Escarificação x Preparo	0,057ns	0,316ns
Escarificação x Palhiço	0,481ns	0,078ns
Escarificação x Preparo x Palhiço	0,950ns	2,100ns

Médias seguidas por letras minúsculas iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de tukey a 5% de probabilidade. PD: plantio direto, PC: preparo convencional, CE: com escarificação, SE: sem escarificação.

O TCH foi superior no plantio direto (PD), com 446,56 Mg ha^{-1}, totalizando 32,9 Mg ha^{-1} superior ao preparo convencional (PC) (Quadro 30). Quando avaliado entre os níveis de palhiço remanescentes essa diferença é ainda maior, o tratamento com 100% de manutenção teve a maior produtividade de colmos acumulado, totalizando 456,17 Mg ha^{-1}, ou seja, produziu 43,09 Mg ha^{-1} acima da área com retirada total de palhiço que produziu 413,08 Mg ha^{-1} (Quadro 30).

A maior produtividade no sistema com manutenção de 100% de palhiço totalizou em média de 91,23 Mg ha^{-1} por safra (Quadro 30), cerca de 14, 76 Mg ha^{-1} acima da média do estado do Mato Grosso do Sul, que na safra 2018/9 teve uma produtividade de 76,47 Mg ha^{-1}, e também acima da média nacional que foi de 72,23 Mg ha^{-1} na mesma safra (CONAB, 2018). Evidenciando assim a eficiência do sistema de manutenção total do palhiço e do plantio direto na obtenção de alta produtividade da cultura.

A influência da remoção de palhiço do solo no cultivo de cana-de-açúcar é muito discutida, principalmente quanto sua resposta na produtividade da cultura, que tende a ser negativa e mais proeminentes em áreas com déficit hídrico (Marin et al., 2014). Bordonal et al. (2018) trabalharam com níveis de remoção de palhiço (0, 50 e 100%) em 3 áreas diferentes, e observaram redução significativa da produtividade (TCH) com a retirada total de palhiço do solo; nos dois estudos com solo argiloso as perdas acumuladas variaram de 28 a 62 Mg ha^{-1}, enquanto que na área com solo arenoso de baixa fertilidade não encontraram diferenças significativas no TCH.

Bordonal et al. (2018) atribuíram a baixa produtividade em seus estudos com a retirada total de palhiço pela baixa precipitação pluvial nas épocas de colheita, que resultaram em baixa umidade nos solos no período inicial de desenvolvimento da cultura, podem ter comprometido a produtividade nestas áreas. Fato que ocorreu neste estudo a partir da safra 2015/16, onde a precipitação entre os meses que se procedeu as colheitas variou de 0 a 36,6 mm (Figura 1).

Quanto à interação entre o preparo de solo e os níveis de palhiço remanescente, a TAH acumulado em todos sistemas seguiu a mesma tendência que o TCH ($p<0,05$) (Quadro 31), visto que é calculado com base na tonelada de colmo por hectare e o açúcar total redutor (ATR)da cultura. O tratamento com 100% de manutenção no PD propiciou um TAH de 74,43 Mg ha^{-1}, cerca de 4,39 Mg ha^{-1} acima da área com

retirada total de palhiço (0%). E o menor valor de TAH foi observado no preparo convencional com a retirada total de palhiço (62,18 Mg ha^{-1}).

Houve efeito do uso da escarificação no TCH e TAH acumulado, áreas escarificadas tiveram perda de 15,64 e 3,13 Mg ha^{-1}, respectivamente, comparado ao sistema sem escarificação (Quadro 31). Provavelmente pelo fato na menor decomposição palhiço na ausência de escarificação em todas safras, e com significância na safra 2018/19 (Figura 8 e 9), mantendo-o por mais tempo no solo nas áreas com 100% de manutenção de palhiço no solo, o que refletiu nas melhorias do ambiente de produção (umidade, atividade microbiana, reciclagem de macronutrientes, macrofauna) e em resposta na produtividade da cana-de-açúcar.

QUADRO 31. Tonelada de colmos por hectare (TCH) e tonelada de açúcar por hectare (TAH) acumulados de 2014-19, em cultivo de cana-de-açúcar em plantio direto e preparo convencional, em função dos níveis de palhiço remanescente e manejo com escarificação

Tonelada de colmos por hectare (TCH)		
Palhiço	Preparo de solo	
	PD	PC
0%	439,48 aB	386,68 bB
50%	425,76 aB	416,38 aA
100%	474,44 aA	437,90 bA
Tonelada de açúcar por hectare (TAH)		
Palhiço	Preparo de solo	
	PD	PC
0%	70,04 aB	62,18 bB
50%	67,03 aB	66,43 aA
100%	74,43 aA	69,56 bA

Médias seguidas por letras minúsculas iguais na linha e maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de tukey a 5% de probabilidade. PD: plantio direto, PC: preparo convencional

Ressaltando mais uma vez a melhoria do microclima proporcionado pela cobertura com palhiço no solo (Awe et al., 2015), a entrada constante de C no solo a longo prazo aumenta a matéria orgânica do solo (CHERUBIN et al., 2021), com reflexo direto na melhoria da biota do solo e no funcionamento físico (LAVELLE et al., 2020) e ciclagem de nutrientes (CHERUBIN et al., 2019). Fatores esses cruciais para bom desenvolvimento e produtividade das culturas, principalmente da cana-de-açúcar pelo

tempo que permanece em campo, a manutenção de altas produtividades depende destes fatores sempre alinhados.

Diferindo de outros autores que ao avaliar o uso da escarificação na soqueira de cana-de-açúcar no Mato Grosso do Sul, não verificaram efeitos do preparo nos parâmetros de produtividade da cultura, apenas melhorias na qualidade física do solo (PRADO et al., 2014; GARBIATE et al., 2016). Contudo não há estudo realizados nesta região que conciliaram o uso de escarificação, preparos de solo e manutenção de palhiço para uma comparação mais eficiente. Pois provavelmente neste estudo a manutenção de palhiço foi o diferencial na melhoria da produtividade de colmos e açúcar.

Assim com a quantificação adequada da quantidade de palhiço necessária em campo pode otimizar o sistema produtivo da indústria, que poderá usar o excedente na produção de bioenergia ou etanol de segunda geração (2G) (AQUINO et al., 2018). Nas condições edafoclimáticas deste experimento a manutenção de 100% de palhiço em campo aumentou de forma significativa a produtividade da cana-de-açúcar, aliado ao PD e SE, que com certeza também seriam os manejos mais viáveis economicamente, e mantendo-se bons níveis produtivos.

5. CONCLUSÕES

A manutenção de 100% de palhiço em campo promoveu melhores valores de C-BMS, abundância de organismos, degradação de celulose e hemicelulose, maior decomposição de palhiço e liberação de nutrientes.

A produtividade de colmos (TCH) e de açúcar (TAH) também foram superiores na área com 100% de manutenção do palhiço, sem escarificação em plantio direto, indicando que o preparo convencional e escarificação não foram necessários.

Aliar a manutenção de 100% de palhiço remanescente em plantio direto, sem escarificação nas entrelinhas da soqueira da cana-de-açúcar ao longo do ciclo é o indicado para locais com condições edafoclimáticas semelhantes a este estudo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIVEN, S.; RECOUS, S.; REYES, V.; OLIVER, R. Mineralisation of C and N from root, stem and leaf residues in soil and role of their biochemical quality. **Biology and Fertility of Soils,** v. 42, p. 119–128, 2005.

ALMEIDA, H. J.; CRUZ, F. J. R.; PANCELLI, M. A.; FLORES, R. A.; VASCONCELOS, R. L.; PRADO, R. M. Decreased potassium fertilization in sugarcane ratoons grown under straw in different soils. **Australian Journal of Crop Science**, v. 9, p. 596– 604, 2015.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. S.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

AMAZONAS, N. T.; VIANI, R. A. G.; REGO, M. A. G.; CAMARGO, F. F.; FUJIHARAB, R. T.; VALSECHI, A. O. Soil macrofauna density and diversity across a chronosequence of tropical forest restoration in Southeastern Brazil. **Brazilian Journal of Biology**, v. 78, p. 449-456, 2018.

ANALYTICAL METHODS COMMITTEE. Evaluation of analytical instrumentation. Part XIX CHNS elemental analysers. Accreditation and quality assurance, v. 11, n. 11, p. 569-576, 2006.

ANDERSON, J.M.; INGRAM, J.S.I. (Ed.). **Tropical soil biology and fertility**: a handbook of methods. 2nd ed. Wallingford: CAB International, 1993. 221p.

ANDERSON, T. H.; DOMSCH, K. H. The metabolic quocient for CO2 (qCO2) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of Forest soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 25, p. 393-395, 1993.

ANDREWS, S. S.; KARLEN, D. L.; MITCHELL, J. P. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 90, p. 25–45, 2002.

AQUINO, G. S. DE; DE CONTI MEDINA, C.; SHAHAB, M.; SANTIAGO, A. D.; CUNHA, A. C. B.; KUSSABA, D. A. O.; CARVALHO, J. B.; MOREIRA, A. Does straw mulch partial-removal from soil interfere in yield and industrial quality sugarcane? A long term study. **Industrial Crops and Products**, v. 111, p. 573–578, 2018.

ARRUDA, R. V.; ARAÚJO, V. P. D.; CAMPOS, S. B.; REMPTO, K. K.; SANTOS, G. O. Contribuição da matéria orgânica na fertilidade do solo. **Multidisciplinary Reviews**, v. 2, p. e2019020, 2019.

AUSTIN, A.; 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, **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 107, p. 4618–4622, 2010.

AWE, G. O., REICHERT, J. M. AND WENDROTH, O. O. Temporal variability and covariance structures of soil temperature in a sugarcane field under different management practices in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 150, p. 93-106, 2015.

BARBIERI, J. L.; ALLEONI, L. R. F.; DONZELLI, J. L. Avaliação agronômica e econômica de sistemas de preparo do solo para cana-de-açúcar. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 21, p. 89–98, 1997.

BASTOS, A. L.; COSTA, J. P. V.; SILVA, I. F.; RAPOSO, R. W. C.; SOUTO, J. S. Influência de doses de fósforo no fluxo difusivo em solos de Alagoas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, p.136-142, 2008.

BEDANO, J. C.; DOMÍNGUEZ, A.; AROLFO, R.; WALL, L. G. Effect of Good Agricultural Practices under no-till on litter and soil invertebrates in areas with different soil types. **Soil and Tillage Research**, v. 158, p. 100–109, 2016.

BERTOLLO, A. M.; LEVIEN, R. Compactação do solo em Sistema de Plantio Direto na palha. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v. 25, p. 208-218, 2019.

BETTIO, D.; ARAUJO, F. Alterações microbiológicas do solo após três anos de sistema integração lavoura – pecuária sob diferentes adubações e escarificação do solo. **Colloquium Agrariae**, v. 12, p. 1-7, 2016.

BIOSUL – Associação dos Produtores de Bioenergia do Mato Grosso do Sul. Acesso em 20 de agosto de 2021. Disponível em: < https://biosulms.com.br>.

BOCOCK, K. L.; GILBERT, O. The disappearance of leaf litter under different woodland conditions. **Plant and Soil**, v. 9, p. 179-85, 1975.

BOLAT, I. Microbial biomass, basal respiration and microbial indices of soil in diverse croplands in a region of northwestern Turkey (Bartın**). Environmental Monitoring and Assessment**, v. 191, p. 695. 2019.

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

BOUCHÉ, M. B. Strategies lombriciennes. In: LOHM, U.; T. PERSSON (eds.). **Soil Organisms as Components of Ecosystems.** Ecology Bullettin, v. 25, p. 122-132, 1977.

BRITO, M. F.; TSUJIGUSHI, B. P.; OTSUBO, A. A.; SILVA, R. F.; MERANTE, F. M. Diversidade da fauna edáfica e epigeica de invertebrados em consórcio de mandioca com adubos verdes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, p. 253-260, 2016.

BUCHANAN, M.; KING, L. Carbon and phosphorus losses from decomposing crop residues in no till and conventional till agroecosystems. **Agronomy Journal**, v.85, n.3, p.631-638, 1993.

BÜNEMANN, E. K.; BONGIORNO, G.; BAI, Z.; CREAMER, R. E., DE DEYN, G., DE GOEDE, R., … BRUSSAARD, L. Soil quality – A critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, 120, 105–125, 2018.

CAMARA, R. K.; KLEIN, V.A. Escarificação em plantio direto como técnica de conservação do solo e da água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 789-796, 2005.

CAMARGO, A.; SIMÕES, A.; PACCA, S. O potencial de mitigação da mudança climática dos vetores energéticos da cana-de-açúcar na frota paulistana de veículos leves. **Revista Tecnologia e Sociedade**. v. 15, n. 37, p. 516-528, 2019.

CARMO, J. B. DO; FILOSO, S.; ZOTELLI, L. C.; NETO, E. R. D.; PITOMBO, L. M.; DUARTE-NETO, P. J.; VARGAS, V. P.; C. A. ANDRADE, GAVA, G. J. C.; ROSSETTO, R.; CANTARELLA, H.; NETO, A. E.; MARTINELLI, L. A. Infield greenhouse gas emissions from sugarcane soils in Brazil: effects from synthetic and organic fertilizer application and crop trash accumulation, Glob. **Change Biology Bioenergy**, v. 5, n. 3, p. 267–280, 2013.

CARVALHO, J. L. N.; NOGUEIROL, R. C.; MENANDRO, L. M. S.; BORDONAL, R. D. 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, 2017.

CARVALHO, J. L. N.; NOGUEIROL, R. C.; MENANDRO, L. M. S.; BORDONAL, R. DE O.; BORGES, C. D.; CANTARELLA, H.; FRANCO, H. C. J. Agronomic and environmental implications of sugarcane straw removal: a major review. **GCB Bioenergy**, v. 9, p. 1181-1195, 2016.

CASTIONI, G. A. F.; CHERUBIN, M. R.; BORDONAL, R. O.; BARBOSA, L.; MENANDRO, L. M. S.; CARVALHO, J. L. N. Straw Removal Affects Soil Physical Quality and Sugarcane Yield in Brazil. **Bioenergy Research**, v. 12, p. 789–800, 2019.

CEPEA – USP. CEPEA/ Perspectivas de 2022. Disponível em < https://www.cepea.esalq.usp.br/br/releases/cepea-perspectivas-de-2022.aspx> . Acesso em: 05 de janeiro de 2022.

CHAPMAN, L. S.; HAYSOM, M. B. C.; SAFFIGNA, P. G. The recovery of ^{15}N from labelled urea fertilizer in crop components of sugarcane. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 45, p. 1577–1585, 1994.

CHAVES, H. M. L., LOZADA, C. M. C., GASPAR, R. O. Soil quality index of on Oxisol under different land in the Brazilian savannah. **Geoderma**, v. 10, n. 1, p. 183–190, 2017.

CHERUBIN, M. R., KARLEN, D. L., FRANCO, A. L. C., CERRI, C. E. P., TORMENA, C. A.; CERRI, C. C. A Soil Management Assessment Framework (SMAF) Evaluation of Brazilian Sugarcane Expansion on Soil Quality. **Soil Science Society of America Journal**, v. 80, n. 1, 215–226, 2016.

CHERUBIN, M. R.; OLIVEIRA, D. M. S.; FEIGL, B. J.; PIMENTEL, L. G.; LISBOA, I. O.; GMACH, M. R.; VARANDA, L. L.; MORAES, M. C.; SATIRO, L. S.; POPIN, G. V.; PAIVA, S. R.; SANTOS, A. K. B.; VASCONCELOS, A. L. S.; MELO, P. L. A. Soil health response to sugarcane straw removal in Brazil. **Industrial Crops and Products**, v. 163, p. 113315, 2021.

CHERUBIN, M.; LISBOA, I.; SILVA, A.; VARANDA, L.; BORDONAL, R.; CARVALHO, J.; OTTO, R.; PAVINATO, P.; SOLTANGHEISI, A.; CERRI, C. E. Sugarcane Straw Removal: Implications to Soil Fertility and Fertilizer Demand in Brazil. **BioEnergy Research**, v. 12, p. 888-900, 2019.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Safra Brasileira de Cana-de-Açúcar**, v. 7- Safra 2020/21, n. 4 - Quarto levantamento, Brasília, p. 1-57, 2021.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Safra Brasileira de Cana-de-Açúcar**, Brasília, v. 8 – Safra 2021-22, n. 3- Terceiro levantamento, p. 1-63, 2022.

CORTEZ, J. W.; ALVES, A. D. S.; MOURA, R. D.; OLSZEVSKI, N.; NAGAHAMA, H. J. Atributos físicos do Argissolo amarelo do semiárido nordestino sob sistemas de preparo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 1207-1216, 2011.

COSTA, C. H. M. D.; CRUSCIOL, C. A. C.; FERRARI NETO, J.; CASTRO, G. S. A. Efeitos residuais da calagem superficial em solo tropical com plantio direto. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 51, p. 1633-1642, 2016.

CREPALDI, R. A.; PORTILHO, I. I. R.; SILVESTRE, R.; MERCANTE, F. M. Formigas como bioindicadores da qualidade do solo em sistema integrado lavoura-pecuária. **Ciência Rural**, v.44, p.781-787, 2014.

CUNHA, E. Q.; STONE, L. F.; FERREIRA, E. P. B.; DIDONET, A. D.; MOREIRA, J. A. A.; LEANDRO, W. M. Sistemas de preparo do solo e culturas de cobertura na

produção orgânica de feijão e milho. II – Atributos biológicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol. 35, n. 2, p. 603-611, 2011.

DAMON, P. M.; BOWDEN, B.; ROSE, T.; RENGEL, Z. Crop residue contributions to phosphorus pools in agricultural soils: a review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 74, p. 127–137, 2014.

DENG, S. P.; TABATABAI, M. A. Cellulase activity of soils. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 26, p. 1347-1354, 1994.

DILLEWIJN, C. Botany of sugar cane. Walthen: **Chronica Botanica,** 1952, 359p.

DILLY, O.; MUNCH, J. C. Ratios between estimates of microbial biomass con- tent and microbial activity in soils. **Biology and Fertility of Soils**, v. 27, p. 374–379, 1998.

DING, J.; JIANG, X.; MINGCHAO, M.; ZHOU, B.; GUAN, D.; ZHAO, B.; ZHOU, J.; CAO, F.; LI, L.; LI, J. 2016. Effect of 35 years inorganic fertilizer and manure amendment on structure of bacterial and archaeal communities in black soil of northeast China. **Applied Soil Ecology**, v. 105, p. 187-195.

DIOLA, V.; SANTOS, F. Fisiologia. In: SANTOS, F.; BORÉM, A.; CALDAS, C. (Eds.). **Cana- de-açúcar:** bioenergia, açúcar e álcool - tecnologia e perspectivas. Viçosa: UFV, 2010. p. 24-49.

DIONÍSIO, J.A.; PIMENTEL, I.C.; SIGNOR, D.; PAULA, A.M.; MACEDA, A.; MATTANA, A. L. **Guia prático de biologia do solo**. Paraná: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/Núcleo Estadual Paraná, 2016. p. 152.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. In: DORAN, J. W., JONES, A. J. (Eds.) **Methods for Assessing Soil Quality**. Soil Science Society of America, p. 25–37, 1996.

DOURADO-NETO, D.; POWLSON, D.; ABU BAKAR, R.; BACCHI, O. O.S.; BASATA, M.; CONG, P.; KEERTHISINGHE, G.; ISMAILI, M.; RAHMAN, S. M.; REICHARDT, K.; SAFWAT, M. S. A.; SANGAKKARA, R. Multiseason recoveries of organic and inorganic nitrogen-15 in tropical cropping systems. **Soil Science Society of America Journal**, v. 74, p. 139–152, 2010.

DRESCHER, M.; REINERT, D.; DENARDIN, J.; GUBIANI, P.; FAGANELLO, A.; DRESCHER, G. Duração das alterações em propriedades físico-hídricas de latossolo argiloso decorrentes da escarificação mecânica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, p. 159-168, 2016.

ELBL, J.; MAKOVÁ, J.; JAVOREKOVÁ, S.; MEDO, J.; KINTL, A.; LOŠÁK, T.; LUKAS, V. Response of microbial activities in soil to various organic and mineral amendments as an indicator of soil quality. **Agronomy**, v. 9, p. 485, 2019.

ENDRES, L.; CRUZ, S. J. S.; VILELA, R.D.; SANTOS, J.M.; BARBOSA, G.V.S.; SILVA, J.A.C. Foliar applications of calcium reduce and delay sugarcane flowering. ***BioEnergy Research***, v. 9, p. 98–108, 2016.

ENDRES, L.; CRUZ, S.J.S.; VILELA, R.D.; SANTOS, J.M.; BARBOSA, G.V.S.; SILVA, J.A.C. Foliar applications of calcium reduce and delay sugarcane flowering. **BioEnergy Research**, v. 9, p. 98-108, 2016.

FERREIRA, D. A.; FRANCO, H. C. J.; OTTO, R.; VITTI, A. C.; FORTES, C.; FARONI, C. E.; GARSIDE, A. L.; TRIVELIN, P. C. O. Contribution of N from green harvest residues for sugarcane nutrition in Brazil. **Global Change Biology Bioenergy**, v. 8, p. 859– 866, 2015.

FERREIRA, D. F. SISVAR 4.6: **sistema de analises estatísticas.** Lavras: UFLA, 2003. 32 p

FIORETTO, R. A. PALHADA DA CANA-DE-AÇÚCAR – **Possibilidades e Limitações Agronômicas em Solo Tropical**. Rio de Janeiro: Interciência, 136p., 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, p. 189–198, 2012.

FRANCO, A. L. C.; BARTZ, M. L. C.; CHERUBIN, M. R.; BARETTA, D.; CERRI, C. E. P.; FEIGL, B. J.; WALL, D. H.; DAVIES, C. A.; CERRI, C. C. Loss of soil (macro)fauna due to the expansion of Brazilian sugarcane acreage. **Science of the Total Environment**, 563–564, 160–168. 2016.

FRANCO, H. C. J.; OTTO, R.; FARONI, C. D.; VITTI, A. C.; OLIVEIRA, E. C. A.; TRIVELIN, P. C. O. Nitrogen in sugarcane derived from fertilizer under Brazilian field conditions. **Field Crops Research**, v. 121, p. 29–41, 2011.

FREITAS, S. P.; OLIVEIRA, A. R.; FREITAS, S. J.; SOARES, L. M. S. Controle químico de Rottboelia exaltada em cana-de-açúcar. **Planta Daninha**, v. 22, n. 3, p. 461-466, 2004.

FROSSARD, E.; FROSSARD, M.; HEDLEY, M. J.; MATHERELL, A. Reactions controlling the cycling of P in soil. In: TIESSNM, H. (Org.). **Phosphorus in the global environment: transfers, cycles and management**. Chichester: J. Wiley, 1995. p. 107-146.

FU, Y.; TIAN, Z.; AMOOZEGAR, A.; HEITMAN, J. Measuring dynamic changes of soil porosity during compaction. **Soil and Tillage Research**, v. 193, p. 114-121, 2019.

GARBIATE, M. V.; A. C. T. VITORINO.; E. A. F. PRADO.; M. MAUAD.; D. M. P. PELLIN. Hydrophysical quality of a latossolo and sugarcane yield in chisel plow-based sugarcane ratoon management. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, n. 1, p. 1–10, 2016.

GONZAGA, L. C.; CARVALHO, J. L. N.; OLIVEIRA, B. G.; SOARES, J. R.; CANTARELLA, H. Crop residue removal and nitrification inhibitor application as strategies to mitigate N2O emissions in sugarcane fields. **Biomass Bioenergy**, v. 119, p. 206–216, 2018.

GRANDY, A. S.; WIEDER, W. R.; WICKINGS, K.; KYKER-SNOWMAN, E. Beyond microbes: Are fauna the next frontier in soil biogeochemical models? **Soil Biology and Biochemistry**, v. 102, p. 40–44, 2016.

GULLAN, P. J.; CRANSTON, P. S. **Insetos: fundamentos da entomologia**. 5. ed. Rio de Janeiro: Gen/Editora Roca; 2017, 460p.

GUO, L.-J.; ZHISHENG, Z.; WANG, D.-D.; LI, C.-F.; CAO, C.-G. Effects of short-term conservation management practices on soil organic carbon fractions and microbial community composition under a rice-wheat rotation system. **Biology and Fertility of Soils,** v. 51, 2014.

GUTIÉRREZ, J. A. M.; ROUSSEAU, G. X.; ANDRADE-SILVA, J.; DELABIE, J. H. C. Taxones superiores de hormigas como sustitutos de la riqueza de especies, en una cronosecuencia de bosques secundarios, bosque primário y sistemas agroforestales en la Amazonía Oriental, Brasil. **Revista de Biologia Tropical**, v. 65, p. 279-291, 2017.

HAICHAR, F. E. Z.; ACHOUAK, W.; Christen, R.; Heulin, T.; Marol, C.; Marais, M-F.; Mougel, C.; Ranjard, L.; Balesdent, J.; Berge, O. Identification of cellulolytic bacteria in soil by stable isotope probing. **Environ Microbiology,** v. 9, p. 625–634, 2007.

JIN, V. L.; SCHMER, M. R.; STEWART, C. E.; SINDELAR, A. J.; VARVEL, G. E.; WIENHOLD, B. J. Long-term no-till and stover retention each decrease the global warming potential of irrigated continuous corn. **Global Change Biology,** v. 23, p. 2848, 2017.

KALEMBASA, S. J.; JENKINSON, D. S. A comparative study of titrimetric and gravimetric methods for the determination of organic carbon in soil. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 24, p. 1085-1090, 1973.

KAN, Z-R.; VIRK, A. L.; HE, C.; LIU, Q-Y.; QI, J.Y.; DANG, Y. P.; ZHAO, X.; ZHANG, H-L. Characteristics of carbon mineralization and accumulation under long-term conservation tillage. **Catena**, v. 193, p. 104636, 2020.

KASCHUK, G.; ALBERTON, O.; HUNGRIA, M. Three decades of soil microbial biomass studies in Brazilian ecosystems: lessons learned about soil quality and indications for improving sustainability. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, p. 1–13, 2010.

KAUR, N.; BENIPAL, D. S. Effect of crop residue and farmyard manure on K forms on soils of long-term fertility experiment. **Indian Journal Crop Science**, v. 1, p. 161–164, 2006.

KEESSTRA, S. D.; BOUMA, J.; WALLINGA, J.; TITTONELL, P.; SMITH, P.; CERDA, A.; MONTANARELLA, L.; QUINTON, J. N.; PACHEPSKY, Y.; VAN DER PUTTEN, W. H.; BARDGETT, R. D.; MOOLENAAR, S.; MOL, G.; JANSEN, B.; FRESCO, L.O. The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations Sustainable Development Goals. **Soil**, v. 2, p. 111–128, 2016.

KOGEL-KNABER, I. Analytical approaches for characterizing soil organic matter. **Organic Geochemistry**, v.31, p.609-625, 2000.

KUHWALD, M.; BLASCHEK, M.; BRUNOTTE, J.; DUTTMANN, R. Comparing soil physical properties from continuous conventional tillage with long-term reduced tillage affected by one-time inversion. **Soil Use and Management, v.** 33, p. 611–619, 2017.

LAVELLE, P. Diversity of soil fauna and ecosystem function. **Biology International**, v.33, p.3-16, 1996.

LAVELLE, P., SPAIN, A., FONTE, S., BEDANO, J.C., BLANCHART, E., GALINDO, V., GRIMALDI, M., JIMENEZ, J.J., VELASQUEZ, E., ZANGERLE, A. Soil aggregation, ecosystem engineers and the C cycle. **Acta Oecologica**, v. 105, p. 103561, 2020.

LAVELLE, P.; BIGNELL, D.; LEPAGE, M.; WOLTERS, V.; ROGER, P.; INESON, P.; HEAL, O.W.; DHILLION, S. Soil function in a changing world: the role of invertebrate ecosystem engineers. **European Journal of Soil Biology**. v. 33, p.159-193, 1997.

LAVELLE, P.; DANGERFIELD, M.; FRAGOSO, C.; ESCHENBRENNER, V.; LOPEZ-HERNANDEZ, D.; PASHANASI, B.; BRUSAARD, L. The relationship of between soil macrofauna and tropical soil fertility. p. 137-169. In: WOOMER, P. L.; SWIFT, M. J. (Eds.). **The biological management of tropical soil fertility.** New York: J. Wiley & Sons, 1994.

LAVELLE, P.; SPAIN, A.V. **Soil ecology.** Dordrecht: Kluwer Academic, 2001. 654p.

LI, J.; LU, J.; LI, X.; REN, T.; CONG, R.; ZHOU, L. Dynamics of Potassium Release and Adsorption on Rice Straw Residue. **PLoS ONE**, v. 9, p. e90440, 2014.

LISBOA, I. P.; DAMIAN, J. M.; CHERUBIN, M. R.; BARROS, P. P. S.; FIORIO, P. R.; CERRI, C. C.; CERRI, C. E. P. Prediction of Sugarcane Yield Based on NDVI and Concentration of Leaf-Tissue Nutrients in Fields Managed with Straw Removal. ***Agronomy***, v. *8*, n. 9, 2018.

MAGURRAN, A. E. **Diversidad ecológica y su medición**. Barcelona: Vedrà, 1988. 200p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas**: princípios e aplicações. 2. ed. Piracicaba: Associação Brasileira de Potassa e do Fósforo, 1997. 319 p.

MALHI, S.; NYBORG, M.; GODDARD, T.; PUURVEEN, D. **Communications in Soil Science and Plant Analysis,** v. 43, 2679p., 2012.

MARIN, F. R.; THORBURN, P. J.; DA COSTA, L. G.; OTTO, R. Simulating long-term effects of trash management on sugarcane yield for Brazilian cropping systems. **Sugar Technologies**, v. 16, p. 164–173, 2014.

MARTINS, M. F. L. **Velocidade de decomposição da fitomassa do crambe em latossolo argiloso sob sistemas de manejo**. Cascavel, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 52p, 2016 (Dissertação de mestrado).

MATEUS, G.; ARAÚJO, H.; MÜLLER, R.; CRUSCIOL, C.; BORGES, W. Straw decomposition and macronutrients content in function of soil management and rotation of cultures in areas of sugarcane plantation reform. **Nucleus**, p. 93-102, 2017.

MEIER, E. A.; THORBURN, P. J.; WEGENER, M. K.; BASFORD, K. E. The availability of nitrogen from sugarcane trash on contrasting soils in the wet tropics of North Queensland. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 75, p. 101–114, 2006.

MELLIS, E. V.; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H.; TEIXEIRA, L. A. J.; CAVALLI, E. Nutrição e adubação da cultura da cana-de-açúcar: Micronutriente. In. PRADO, R. M.; Campos, C. N. S. **Nutrição e adubação de grandes culturas.** Jaboticabal: FCAV, p. 301-326, 2018.

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, 2017.

MENANDRO, L. M. S.; DE MORAES, L. O.; BORGES, C. D.; CHERUBIN, M. R.; CASTIONI, G. A.; CARVALHO, J. L. N. Soil Macrofauna Responses to Sugarcane Straw Removal for Bioenergy Production. **Bioenergy Research**, v. *12*, n. 4, p. 944–957, 2019.

MOGHIMIAN, N.; HOSSEINI, S. M.; KOOCH, Y.; DARKI, B. Z. Evaluating soil biochemical/microbial indices as ecological indicators of different land use/cover in northern Iran. **Acta Ecological Sinica**, v. 39, n. 4, p. 328-333, 2019.

MOUTTA, R. D. O.; FERREIRA-LEITÃO, V. S.; BOM, E. P. D. S. Enzymatic hydrolysis of sugar- cane bagasse and straw mixtures pretreated with diluted acid. **Biocatalysis and Biotransformation**, v. 32, p. 93–100, 2014.

NOGUEIRA, M.A.; ALBINO, U.B.; BRANDÃO-JÚNIOR, O.; BRAUN, G.; CRUZ, M. F.; DIAS, B.A.; DUARTE, R.T.D.; GIOPPO, N.M.R.; MENNA, P.; ORLANDI, J.M.; RAIMAM, M.P.; RAMPAZO, L.G.L.; SANTOS, M.A.; SILVA, M.E.Z.; VIEIRA, F.P.; TOREZAN, J.M.D.; HUNGRIA, M.; ANDRADE, M. 2006. Promising indicators for assessment of agroecosystems alteration among natural, reforested and agricultural land use in southern Brazil. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 115, p. 237-247.

NUNES, L. A. P. L.; ARAÚJO FILHO, J. A.; & MENEZES, R. I. Q. Recolonização da fauna edáfica em áreas de caatinga submetidas a queimadas. **Caatinga**, v. 21, p. 214-220, 2008.

OGEDA, T. L.; PETRI, D. F. S. Hidrólise enzimática de biomassa. **Química Nova**, v. 33, n. 7, p.154’9-1558, 2010.

OLIVEIRA, A. R.; SIMÕES, W. L. Manejo e produção de palhada da cana-de-açúcar em um sistema irrigado por gotejamento subsuperficial para geração de bioetanol. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 35, p. 516-530, 2020.

OTTO, R.; CASTRO, S. A.; MARIANO, E.; CASTRO, S. G.; FRANCO, H. C.; TRIVELIN, P. C. Nitrogen use efficiency for sugarcane-biofuel production: what is next? **BioEnergy Research**, v. 9, p.1272–1289, 2016.

PANT, M.; NEGI, G. C. S.; KUMAR, P. Macrofauna contributes to organic matter decomposition and soil quality in Himalayan agroecosystems, India. **Applied Soil Ecology**, 120, 20–29, 2017.

PARAJULI, R.; DALGAARD, T.; JØRGENSEN, U.; ADAMSEN, A. P. S.; KNUDSEN, M. T.; BIRKVED, M.; GYLLING, M.; SCHJØRRING, J. Biorefining in the prevailing energy and materials crisis: a review of sustainable pathways for biorefinery value chains

and sustainability assessment methodologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 43, p. 244-263, 2015.

PAREDES JUNIOR, F. P.; PORTILHO, I. I. R.; MERCANTE, F. M. Atributos microbiológicos de um latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar com e sem queima da palhada. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 36, n. 1, p. 151-164, 2015.

PARRON, L. M.; RACHWAL, M. F. G.; MAIA, C. M. B. F. 2015. Estoques de carbono no solo como indicador de serviços ambientais. In: PARRON, L. M.; GARCIA, J. R.; OLIVEIRA, E. B.; BROWN, G. G.; PRADO, R. B. **Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do bioma Mata Atlântica**. Brasília, DF: Embrapa, cap. 7. Disponível em: < https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1024472/estoques-de-carbono-no-solo-como-indicador-de-servicos-ambientais>. Acesso em: 10 de junho de 2021.

PASQUALIN, L. A.; DIONÍSIO, J. A.; ZAWADNEAK, M. A. C.; MARCAL, C. T. Macrofauna edáfica em lavouras de cana-de-açúcar e mata no noroeste do Paraná - Brasil. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 33, p. 7-18, 2012.

PIEROSSI, M. A.; FAGUNDES, S. A. Enfardamento da palha. In: SANTOS, F.; BORÉM, A. (ed.). **Cana-de-açúcar: do plantio à colheita**. Viçosa: UFV, 2013. p. 245-257.

PIMENTEL, LAISA G.; CHERUBIN, MAURÍCIO R.; OLIVEIRA, DENER M.S.; CERRI, CARLOS E.P.; CERRI, CARLOS C. Decomposition of sugarcane straw: Basis for management decisions for bioenergy production. **Biomass and Bioenergy**, v. 122, p., 133–144, 2019.

PINHEIROS, D. P**. Indicadores de qualidade de argissolo submetido à escarificação em área mecanizada de cana-de-açúcar.** Universidade Estadual Paulista – UNESP, Jaboticabal, São Paulo, 2018. 47p.

POMPEO, L. F. L.; YAMAGUCHI, C. S.; HIRANO, R. T.; GONÇALVES, J. R. P.; RAMOS, N. P. **Ciclagem de nutrientes em cultivo de terceira soca de cana-de-açúcar.** In: VII Congresso Interinstitucional de Iniciação Científica – CIIC 2013. Campinas, São Paulo, 2013, p. 1-9.

PORTILHO, I. I. R.; BORGES, C. D.; COSTA, A. R.; SALTON, J. C.; MERCANTE, F. M. Resíduos da cultura da cana-de-açúcar e seus efeitos sobre a fauna invertebrada epigeica. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 32, n. 3, p. 959–970, 2011.

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. 35, n. 4, p. 1751-1759, 2014.

PRADO, E. A. F.; A. C. T. VITORINO.; W. H. OLIVEIRA.; D. L. P. ESPINDULA.; H. P. ARANTES. Índice de dispersão de agregados de um Latossolo Vermelho distroférrico cultivado com cana sob aplicação de vinhaça. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 35, n. 4, p. 2347–2356, 2014.

RAIJ, B. van; CANTARRELA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo, 2ed. revisada e ampliada. Campinas, Instituto Agronômico e Fundação IAC, 1997. 285p. (Boletim Técnicos, 100).

RAMOS, N. P.; YAMAGUCHI, C. S.; PIRES, A. M. M.; ROSSETTO, R.; POSSENTI, R. A.; PACKER, A. P.C.; CABRAL, O. M. R.; ANDRADE, C. A. de. 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.

REZENDE, C.P.; CANTARUTTI, R.B.; BRAGA, J.M.; GOMIDE, J.A.; PEREIRA, J.M.; FERREIRA, E.; TARRE, R.; MACEDO, R.; ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S.; CADISCH, G.; GILLER, K.E.; BODDEY, R.M. Litter deposition and disappearance in Brachiaria pastures in the Atlantic forest region of the South of Bahia, Brazil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 54, p. 99-112, 1999.

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

RODRIGUEZ-LIZANA, A.; CARBONELL, R.; GONZÁLEZ, P.; ORDÓÑEZ-FERNÁNDEZ, R. N, P and K released by the field decomposition of residues of a pea-wheat-sunflower rotation. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 87, p. 199–208, 2010.

ROSSETTO, R.; VITTI, A. C.; GAVA, G. J. C.; MELLIS, E. V.; VARGAS, V. P.; CANTARELLA, H.; PRADO, R. D.; DIAS, F. L. F.; LANDELL, M. G. A.; BRANCALIÃO, S. R.; GARCIA, J. C. Cana-de-açúcar – Cultivo com sustentabilidade. Informações Agronômicas. **Internacional Plant Nutrition Institute – IPNI,** n. 142, p. 1-13, 2013.

SÁ, M. A. C.; SANTOS JÚNIOR, 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.

SALVIANO, A. M.; MOURA, M. S. B.; SILVA, T. G. F. da.; CARMO, J. F. A. do.; BRANDÃO, E. O. Acúmulo e Exportação de Macronutrientes pela Cana-de-açúcar Irrigada no Semiárido Brasileiro. **Revista Científica INTELLETTO**, v. 2, n. 2, 2017.

SANTORO, E.; SOLER, E. M.; CHERRI, A. C. Route optimization in mechanized sugarcane harvesting. In **Computers and Electronics in Agriculture**, *v.* 141, p. 140–146. Elsevier B.V. 2017.

SANTOS, E.; SANTOS, R. C.; MARQUES, R. Macrofauna edáfica na interface solo-serrapilheira e a relação com atributos químicos de um Espodossolo sob dois diferentes sistemas de conservação e uso do solo no município de Paranaguá-PR. **Enciclopédia Biosfera: Centro Científico Conhecer**, v. 11, n. 21, p. 2294-2307, 2015.

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

SANTOS, F. A.; QUEIROZ, J. H.; COLODETTE, J. L.; MANFREDI, M.; QUEIROZ, M. E. L. R.; CALDAS, C. S.; SPARES, F. E. F. Optimization of hydrothermal pretreatment of cane sugar straw for cellulosic ethanol production. **Quimica Nova**, v. 37, n. 1, p. 56-62, 2014.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAUJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** Brasília, DF: Embrapa, 2018. 5. ed. rev. e ampl. 356p.

SARDO, L. O.; LIMA, J. S. Edaphic Macrofauna as a recovery indicator of abandoned areas of Corymbia citriodora in the Southeastern Brazil. **Flor@m,** v. 26, p. e20190031, 2019.

SARKER, J. R.; SINGH, B. P.; FANG, Y.; COWIE, A. L.; DOUGHERTY, W. J.; COLLINS, D.; DALAL, R. C.; SINGH, B. K. Tillage history and crop residue input enhanced native carbon mineralisation and nutrient supply in contrasting soils under long-term farming systems. **Soil Tillage Research**, v. 193, p. 71–84, 2019.

SILVA, A. O.; DIAS, M.; MARTINS, N. M.; SILVA, W. M.; MERCANTE, F. M. Métodos comparativos de quantificação dos teores de carbono da biomassa microbiana e carbono orgânico do solo**.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 34., 2013, Florianópolis. Ciência do solo: para quê e para quem: **anais**... Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013.

SILVA, A. P.; MEERT, D.; FINAMORE, W. L. M. A. Aproveitamento da palha da cana-de-açúcar pós colheita mecanizada. **Revista Eletrônica da Faculdade de Ciências Exatas e da Terra Produção/Construção e Tecnologia**, v. 5, p. 65-74, 2016.

SILVA, R. A.; AGUIAR, A. D. C. F.; REBÊLO, J. M. M.; SILVA, Ê. F. D. F.; DA SILVA, G. F.; SIQUEIRA, G. M. Diversity of edaphic fauna in different soil occupation systems. **Revista Caatinga**. v. 32, p. 647–657, 2019.

SILVA, R. M.; SILVA, R. M.; SOUZA, J. R. M.; GEDGESKI, T. P.; LIMA, S. S.; LIMA, E. Fauna do solo como bioindicadora da qualidade do solo em cultivos de cana-de-açúcar: um referencial teórico. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 10, e239101018741, 2021.

SILVA, W. R. N.; NUNES, M. C. M.; CALDEIRA, D. S. A.; ARANTES, E. M.; SOUZA, L. H. C. Resistência a penetração de um latossolo vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar em diferentes manejos. **Revista Agrotecnologia**, v. 3, p. 49–61, 2012.

SILVEIRA, P. M.; SILVEIRA P. M.; ZIMMERMANN, F. J. P.; SILVA, S. C.; CUNHA, A. A. Amostragem e variabilidade espacial de características químicas de um latossolo submetido a diferentes sistemas de preparo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 25, p.2057-2064, 2000.

SIQUEIRA, G. M.; DE FRANÇA SILVA, E. F.; MOREIRA, M. M.; DE ARAÚJO SANTOS, G. A.; SILVA, R. A. Diversity of soil macrofauna under sugarcane monoculture and two different natural vegetation types. **African Journal of Agricultural Research,** v. 11, n. 30, p. 2669–2677, 2016.

SKARABOTO, F. F.; LOPES, R. A. P.; PEREIRA, G. S.; SILVA, R. V. Influência do tipo de preparo nas propriedades físicas do solo e da cultura da mandioca (euphorbiaceae). **Revista Terra & Cultura**, v. 34, 2018.

SOLTANGHEISI, A.; HAYGARTH.; P. M.; PAVINATO, P. P.; CHERUBIN.; M. R.; TELES.; A. P. B.; BORDONAL, R. O.; CARVALHO. J. L. N.; WITHERS, P. J. A.; MARTINELLI, L. A. Long term sugarcane straw removal affects soil phosphorus dynamics, **Soil and Tillage Research**, v. 208, 2021.

SOLTANGHEISI, A.; WITHERS, P. J.; PAVINATO, P. S.; CHERUBIN, M. R.; ROSSETTO, R.; DO CARMO, J. B.; ROCHA, G. C.; MARTINELLI, L. A. Improving phosphorus sustainability of sugarcane production in Brazil. **Gcb Bioenergy,** v. 11, p. 1444–1455, 2019.

SOONG, J. L.; PARTON, W. J.; CALDERON, F.; CAMPBELL, E. E.; COTRUFO, M. F. A new conceptual model on the fate and controls of fresh and pyrolized plant litter decomposition. **Biogeochemistry**, v. 124, p. 27–44, 2015.

SOUSA JUNIOR., J.G.; CHERUBIN, M.R.; CERRI, C.E.P.; CERRI, C.C.; FEIGL, B.J. Sugarcane straw left in field during harvest: decomposition dynamics and composition changes. **Soil Research**, v. 55, p. 758–768, 2017.

SOUTO, P. C.; BAKKER, I. A.; SOUTO, J. S.; OLIVEIRA, V. M. CINÉTICA DA respiração edáfica em dois ambientes distintos no semi-árido da paraíba, brasil. **Caatinga**, v. 22, p. 52-58, 2009.

SOUTO, P. C.; SOUTO, J. S.; MIRANDA, J. R. P.; SANTOS, R. V.; ALVES, A. R. Comunidade microbiana e mesofauna edáfica em solo sob Caatinga no semiárido da Paraíba. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 151- 160, 2008.

SOUTO, T.; COELHO, A.; HOLANDA, R.; MORAES, A. S.; PAZ, Y.; SILVA, R. Viabilidade da bioeletricidade a partir da cana-de-açúcar. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 11, p. 409-429, 2018.

SOUZA, E. D.; CARNEIRO, M. A. C.; PAULINO, H. B.; SILVA, C. A. Frações do carbono orgânico, biomassa e atividade microbiana em um Latossolo Vermelho sob cerrado submetido a diferentes sistemas de manejos e usos do solo. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.28, p.323-329, 2006.

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

SRIVASTAVA, A. K.; RAI, M. K. Sugarcane production: Impact of climate change and its mitigation. **Biodiversitas**, v. 13, p. 214-227, 2012.

SWIFT, M. J.; BIGNELL, D.; MOREIRA, F. M. de S.; HUISING, J. O inventário da biodiversidade biológica do solo: conceitos e orientações gerais. In: MOREIRA, F. M.S.; HUISING, E. J.; BIGNELL, D. E. (Eds.). Manual de biologia dos solos tropicais: amostragem e caracterização da biodiversidade. Lavras: Editora da UFLA, p. 23-41.2010.

SWIFT, M. J.; HEAL, O. W.; ANDERSON, J. M. **Decomposition in Terrestrial Ecosystems.** Oxford, Blackwell, p. 372, 1979.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal.** 6th. edn. Porto Alegre, Artmed, 2017.

TIM CHAMEN, W. C.; MOXEY, A. P.; TOWERS, W.; BALANA, B.; HALLETT, P. D. Mitigating arable soil compaction: a review and analysis of available cost and benefit data. **Soil and Tillage Research**, v.146, p.10-25, 2015.

TOMAZI, M.; JUNQUEIRA, P. H.; COÊLHO, R. da S.; SALTON, J. C.; MONTEIRO, L. C.; SILVA, I. M. de O. da; SOUZA, M. H. da S. Biomassa microbiana e estrutura do solo em sistemas de produção agrícola. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS ARENOSOS, 3., 2019, Campo Grande, MS. Intensificação agropecuária sustentável em solos arenosos: **anais...** Brasília, DF: Embrapa, 2019.

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

TORRES, I. F.; BASTIDA, F.; HERNÁNDEZ, T.; BOMBACH, P.; RICHNOW, H.; GARCIA, C. The role of lignin and cellulose in the carbon-cycling of degraded soils under semiarid climate and their relation to microbial biomass. **Soil Biology and Biochemistry,** v. 75, p.152–160, 2014.

TOYOTA, A.; KANEKO, N.; ITO, M. T. Soil ecosystem engineering by the train millipede Parafontaria laminata in a Japanese larch forest. **Soil Biology and Biochemistry**. v. 38, p. 1840-1850, 2006.

TRIVELIN, P. C. O.; FRANCO, H. C. J.; OTTO, R.; FERREIRA, D. A.; VITTI, A. C.; FORTES, C.; FARONI, C. E.; OLIVEIRA, E. C. A.; CANTARELLA, H. Impact of sugarcane trash on fertilizer requirements for São Paulo, Brazil. **Scientia Agricola**, 70, 345–352, 2013.

VAILLANCOURT, K.; BAHN, O.; LEVASSEUR, A. The Role of Bioenergy in Low-Carbon Energy Transition Scenarios: A Case Study for Quebec (Canada). **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 102, p. 24–34, 2019.

VAN SOEST, P. J.; ROBERTSON, J. B. **Analysis of forages and fibrous foods. AS 613 Manual**, Dep. Animal Science, Cornell Univ., Ithaca, NY, 1985.

VANCE, E. D.; BROOKES, P. C.; JENKINSON, D. S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Biology Biochemistry**, v. 19, p. 703-707, 1987.

VANOLLI, B. S.; CANISARES, L. P.; FRANCO, A. L. C.; DELABIE, J. H. C.; CERRI, C. E. P.; CHERUBIN, M. R. Epigeic fauna (with emphasis on ant community) response to land-use change for sugarcane expansion in Brazil. **Acta Oecologica**, v. 110, p. 103702, 2021.

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, p. 41-52, 2018.

VASCONCELOS, W. L. F.; RODRIGUES, D. M.; SILVA, R. O. C.; ALFAIA, S. S. Diversity and abundance of soil macrofauna in three land use systems in eastern Amazonia. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 44, 2020.

VIANA, L. f. **Potencial energético do bagaço e palhiço da cana-de-açúcar. SP80-184, em área de alambique artesanal.** Lavras: UFLA, 2011

VITTI, G. C.; OTTO, R.; SAVIETO, J. **Manejo do enxofre na agricultura. Informações agronômicas**, n. 152, dezembro, 2015.

WAGNER, G. H.; WOLF, D. C. Carbon transformations and soil organic matter formation. In: SYLVIA, D. M.; FUHRMANN, J. J.; HARTEL, P. G.; ZUBERER, D. A. **Principles and applications of soil microbiology**. New Jersey, Prentice Hall, p. 218-256, 1999.

WALKER, D. Diversity and stability. In: Cherrett, J.M. (Ed). **Ecological concepts**. Blackwell Scientific Public, 1989.

WANG, Q.; CAO, X.; JIANG, H.; GUO, Z. Straw Application and Soil Microbial Biomass Carbon Change: A Meta-Analysis. **Soil, Air, Water**, v. 49, p. 2000386, 2020.

WANG, X.; WNAG, X.; GENG P.; YANG, Q.; CHEN, K.; LIU, N.; FAN, Y.; ZHAN, X.; HAN, X. Effects of different returning method combined with decomposer on decomposition of organic components of straw and soil fertility. **Scientific Reports**, v. 11, p. 15495, 2021.

WELLS, M. S.; REBERG-HORTON, S. C.; MIRSKY, S. B.; MAUL, J. E.; HU, S. In situ validation of fungal N translocation to cereal rye mulches under no-till soybean production. **Plant and Soil**, v. 410, p. 153–165, 2017.

WU, M.; YAN, Z. Y.; ZHANG, X. M.; XU, F.; SUN, R. C. Integration of mild acid hydrolysis in γ-valerolactone/water system for enhancement of enzymatic saccharification from cotton stalk. **Bioresource Technology**, v. 200, p. 23-28, 2016.

YAMAGUCHI, C. S. **Decomposição da palha de cana-de-açúcar em função da quantidade aportada e da aplicação de vinhaça.** Campinas, Instituto Agronômico. 56p. 2015. (Dissertação de mestrado).

YANG, F. K.; HE, B.; ZHANG, L.; ZHANG, G.; GAO, Y. An approach to improve soil quality: a case study of straw incorporation with a decomposer under full film-mulched

ridge-furrow tillage on the semiarid Loess Plateau, China. Journal of Plant Nutrition and, **Soil Science**, v. 20, p. 125-138, 2020.

YANNI, S. F.; WHALEN, J. K.; SIMPSON, M. J.; JANZEN, H. H. Plant lignin and nitrogen contents control carbon dioxide production and nitrogen mineralization in soils incubated with Bt and non-Bt corn residues. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 43, 63e69, 2011.

ZHENG, B.; MARSCHNER, P. Previous residue addition rate and C/N ratio influence nutrient availability and respiration rate after the second residue addition, **Geoderma**, v. 285, p. 217–224, 2017.

ZHU, J.; LI, M.; WHELAN, M. Phosphorus activators contribute to legacy phosphorus availability in agricultural soils: a review. **Science of the Total Environment**, v. 612, p. 522–537, 2018.

APÊNDICE I

Constante de decomposição (k dia^{-1}) e tempo de meia vida (T1/2) do palhiço de cana-de-açúcar em função dos níveis de manutenção e preparos de solo ao longo da safra 2018/19.

	PD				PC			
Dias	50 CE	50SE	100 CE	100 SE	50 CE	50SE	100 CE	100 SE
				k (dia^{-1})				
18	0,0110	0,0040	0,0000	0,0019	0,0043	0,0080	0,0023	0,0014
33	0,0070	0,0022	0,0043	0,0033	0,0076	0,0062	0,0033	0,0033
47	0,0055	0,0059	0,0041	0,0052	0,0065	0,0063	0,0054	0,0070
63	0,0095	0,0056	0,0069	0,0061	0,0072	0,0078	0,0059	0,0082
94	0,0077	0,0047	0,0067	0,0043	0,0052	0,0057	0,0044	0,0063
124	0,0061	0,0040	0,0055	0,0050	0,0044	0,0046	0,0044	0,0057
185	0,0049	0,0033	0,0046	0,0038	0,0038	0,0036	0,0036	0,0043
243	0,0044	0,0033	0,0043	0,0036	0,0038	0,0035	0,0036	0,0039
304	0,0039	0,0033	0,0040	0,0038	0,0034	0,0028	0,0034	0,0035
363	0,0035	0,0030	0,0036	0,0034	0,0032	0,0029	0,0031	0,0031
Dias				Tempo ½ (dias)				
18	62,76	173,21	200,00	358,41	160,79	86,68	304,27	478,25
33	99,53	312,64	162,26	212,17	91,54	112,53	210,44	207,30
47	125,59	118,34	167,09	132,91	106,21	109,14	129,47	98,73
63	72,77	124,54	100,22	113,04	96,81	88,90	118,00	84,15
94	90,24	146,34	103,87	160,44	133,05	121,20	157,29	109,90
124	112,75	174,63	125,13	137,91	158,79	150,89	156,40	121,42
185	141,52	207,11	151,07	183,20	180,07	190,19	192,79	159,93
243	156,75	212,55	161,37	191,29	184,65	198,80	190,32	178,46
304	179,80	212,74	173,98	181,90	201,70	244,81	202,82	195,85
363	196,19	233,83	193,37	204,69	216,76	241,00	223,58	224,61

APÊNDICE 2

Teores de fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) de palhiço de cana-de-açúcar em plantio direto (PD) e preparo convencional (PC), em função do tempo de decomposição e níveis de palhiço remanescente e manejo com escarificação

	2014/15									
	Início de safra					Fim de safra				
	P	K	Ca	Mg	S	P	K	Ca	Mg	S
	g kg^{-1}									
Preparo										
PD	0,26 a	1,96 a	3,62 a	0,65 a	1,11 a	0,49 a	1,06 a	5,57 a	0,77 a	0,94 a
PC	0,21 a	1,91 a	3,33 a	0,63 a	0,98 a	0,47 a	1,02 a	4,49 a	0,72 a	0,89 a
CV (%)	96,06	7,88	10,59	5,61	24,84	10,84	26,53	28,87	14,26	12,53
Palha										
0%	0,19 b	1,81 a	3,63 a	0,63 a	1,02 b	0,49 b	1,15 a	6,00 a	0,76 a	0,82 b
50%	0,18 b	1,81 a	3,56 a	0,64 a	0,84 b	0,39 c	1,00 a	4,55 b	0,70 a	0,92 ab
100%	0,34 a	2,19 a	3,24 b	0,66 a	1,28 a	0,57 a	0,96 a	4,53 b	0,77 a	1,02 a
CV (%)	59,43	23,72	6,48	9,62	19,16	17,06	20,40	20,06	12,36	12,35
Escarificação										
SE	0,25 a	2,04 a	3,45 a	0,65 a	1,06 a	0,52 a	1,02 a	4,90 a	0,75 a	0,99 a
CE	0,22 a	1,83 a	3,50 a	0,64 a	1,03 a	0,44 b	1,06 a	5,16 a	0,73 a	0,85 b
CV (%)	62,64	18,55	9,26	6,43	15,03	18,45	12,65	23,25	10,11	12,98
Teste F										
Preparo x Palha	1,182ns	6,205**	5,480*	1,018ns	0,388ns	1,180ns	1,500ns	3,036ns	2,739ns	0,120ns
Escarificação x Preparo	1,782ns	0,116ns	0,201ns	3,000ns	2,821ns	0,136ns	4,800*	0,354ns	2,170ns	9,141**
Escarificação x Palha	1,009ns	4,311*	0,665ns	0,840ns	4,255ns	3,107ns	0,300ns	2,989ns	1,454ns	1,977ns
Escarificação x Preparo x Palha	1,591ns	2,864ns	1,122ns	7,320ns	1,241ns	7,669**	2,100ns	0,093ns	0,985ns	3,862ns

...continua...

“APÊNDICE 2. Cont.”

	2015/16									
	Início de safra					Fim de safra				
	P	K	Ca	Mg	S	P	K	Ca	Mg	S
	g kg^{-1}									
Preparo										
PD	0,90 a	2,16 a	2,78 a	0,63 a	1,11 a	0,48 a	0,62 a	4,57 a	0,84 a	0,94 a
PC	0,83 b	1,76 a	2,37 a	0,57 a	0,98 a	0,44 a	0,64 a	3,09 b	0,73 a	0,89 a
CV (%)	4,18	35,36	31,82	30,37	24,84	32,85	26,78	11,08	21,89	12,53
Palha										
0%	0,43 b	1,27 b	2,36 b	0,51 b	1,02 b	0,40 b	0,75 a	4,89 a	0,83 a	0,82 b
50%	0,40 b	1,84 b	2,50 ab	0,57 b	0,84 b	0,47 a	0,56 a	3,29 b	0,79 a	0,92 ab
100%	1,76 a	2,78 a	2,86 a	0,73 a	1,28 a	0,51 a	0,58 a	3,31 b	0,74 a	1,02 a
CV (%)	6,97	33,13	19,51	20,41	19,16	16,56	33,71	30,03	27,80	12,35
Escarificação										
SE	0,90 a	1,97 a	2,57 a	0,62 a	1,06 a	0,52 a	0,63 a	4,11 a	0,84 a	0,99 a
CE	0,83 b	1,95 a	2,39 b	0,59 a	1,03 a	0,40 b	0,63 a	3,55 b	0,73 b	0,85 b
CV (%)	7,79	32,66	16,18	18,34	15,03	18,27	31,73	17,44	18,54	12,98
Teste F										
Preparo x Palha	17,932**	5,540**	1,379ns	3,769*	0,388ns	0,004ns	0,123ns	1,208ns	0,129ns	0,120ns
Escarificação x Preparo	8,182**	0,275ns	1,499ns	0,732ns	2,821ns	10,756**	0,706ns	0,230ns	0,002ns	9,141**
Escarificação x Palha	10,944**	1,864ns	4,489*	4,234*	4,255*	0,907ns	1,375ns	1,777ns	0,911ns	1,977ns
Escarificação x Preparo x Palha	10,146**	0,390ns	0,314ns	0,115ns	1,241ns	5,318**	1,552ns	3,402*	2,098ns	3,862*

	2016/17									
	Início de safra					Fim de safra				
	P	K	Ca	Mg	S	P	K	Ca	Mg	S
	g kg^{-1}									
Preparo										

...continua...

“APÊNDICE 2. Cont.”

PD	0,32 a	2,54 a	3,38 a	1,01 a	1,00 a	0,55 a	0,86 a	5,46 a	0,95 a	0,94 a
PC	0,33 a	2,56 a	2,84 b	0,90 a	0,92 b	0,61 a	0,79 a	4,41 b	0,82 b	0,90 a
CV (%)	15,13	12,34	9,09	15,47	6,44	38,57	36,30	14,94	10,71	5,40
Palha										
0%	0,27 b	1,90 b	3,18 a	0,97 a	0,86 b	0,48 c	0,89 a	6,36 a	0,96 a	0,85 b
50%	0,37 a	2,40 b	3,15 a	0,92 a	0,96 ab	0,60 b	0,74 a	4,38 b	0,83 a	0,88 b
100%	0,34 a	3,36 a	3,00 a	0,98 a	1,06 a	0,66 a	0,83 a	4,07 b	0,87 a	1,03 a
CV (%)	21,01	25,25	11,14	11,20	11,67	8,04	27,39	24,68	16,06	13,88
Escarificação										
SE	0,32 a	2,64 a	3,12 a	0,98 a	0,97 a	0,63 a	0,78 a	5,03 a	0,90 a	0,94 a
CE	0,33 a	2,46 a	3,10 a	0,94 a	0,95 a	0,53 b	0,86 a	4,85 a	0,87 a	0,90 a
CV (%)	18,46	26,12	12,72	13,80	10,13	10,05	22,41	26,55	20,34	9,42
Teste F										
Preparo x Palha	0,331ns	0,259ns	0,788ns	3,278ns	1,329ns	1,329ns	0,011ns	1,734ns	0,410ns	1,210ns
Escarificação x Preparo	3,507ns	0,699ns	3,456ns	2,089ns	0,011ns	0,039ns	0,858ns	0,155ns	0,073ns	5,694*
Escarificação x Palha	1,195ns	0,591ns	3,152ns	0,423ns	0,602ns	4,533*	0,599ns	0,154ns	0,359ns	5,844**
Escarificação x Preparo x Palha	0,712ns	0,090ns	7,488**	3,686*	0,576ns	0,037ns	0,566ns	0,073ns	0,008ns	3,502*

	2017/18									
	Início de safra					Fim de safra				
	P	K	Ca	Mg	S	P	K	Ca	Mg	S
	g kg^{-1}									
Preparo										
PD	0,41 a	3,96 a	3,57 a	1,18 a	1,15 a	0,59 a	0,68 a	12,18 b	2,62 a	0,84 a
PC	0,42 a	3,88 a	3,17 b	1,06 a	0,93 b	0,55 a	0,62 a	17,20 a	3,81 a	0,81 a
CV (%)	41,05	12,12	5,56	14,68	9,47	13,51	14,67	36,42	44,26	8,79
Palha										

...continua...

“APÊNDICE 2. Cont.”										
0%	0,40 a	3,72 a	3,11 b	1,15 a	1,07 a	0,47 b	0,58 b	8,27 b	1,79 b	0,64 c
50%	0,44 a	3,94 a	3,40 a	1,14 a	0,99 a	0,59 a	0,64 b	17,56 a	3,91 a	0,82 b
100%	0,41 a	4,10 a	3,60 a	1,07 a	1,05 a	0,65 a	0,74 a	18,24 a	3,93 a	1,02 a
CV (%)	25,14	12,77	7,79	8,80	19,35	11,91	13,59	29,08	36,82	16,96
Escarificação										
SE	0,44 a	3,83 a	3,35 a	1,11 a	1,05 a	0,61 a	0,69 a	16,53 a	3,67 a	0,90 a
CE	0,39 b	4,01 a	3,39 a	1,13 a	1,02 a	0,52 b	0,62 a	12,86 b	2,75 b	0,75 b
CV (%)	8,61	12,98	10,83	5,48	7,88	9,94	23,28	29,08	35,46	14,19
Teste F										
Preparo x Palha	1,188ns	1,332ns	3,214ns	0,359ns	0,635ns	0,710ns	1,458ns	0,105ns	0,070ns	0,348ns
Escarificação x Preparo	0,014ns	0,002ns	0,105ns	0,712ns	4,750*	2,873ns	0,029ns	0,005ns	0,061ns	0,774ns
Escarificação x Palha	0,561ns	1,296ns	2,262ns	3,863*	2,705ns	0,766ns	0,823ns	6,837ns	6,479**	0,076ns
Escarificação x Preparo x Palha	0,149ns	0,083ns	0,455ns	0,278ns	1,125ns	0,461ns	2,106ns	4,353ns	4,044*	0,602ns