

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

Guilherme Dietrich

**GRADIENTE VERTICAL DE DECOMPOSIÇÃO E DINÂMICA DA  
ÁGUA NO *MULCH* DE CANA-DE-AÇÚCAR AFETADOS PELA  
QUANTIDADE DE PALHA**

Santa Maria, RS  
2018

**Guilherme Dietrich**

**GRADIENTE VERTICAL DE DECOMPOSIÇÃO E DINÂMICA DA ÁGUA NO  
*MULCH* DE CANA-DE-AÇÚCAR AFETADOS PELA QUANTIDADE DE PALHA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Doutor em Ciência do Solo**.

Orientador: Sandro José Giacomini

Santa Maria, RS  
2018

Dietrich, Guilherme  
GRADIENTE VERTICAL DE DECOMPOSIÇÃO E DINÂMICA DA ÁGUA  
NO MULCH DE CANA-DE-AÇÚCAR AFETADOS PELA QUANTIDADE DE  
PALHA / Guilherme Dietrich.- 2018.  
79 p.; 30 cm

Orientador: Sandro José Giacomini  
Coorientadora: Sylvie Recous  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós  
Graduação em Ciência do Solo, RS, 2018

1. Carbono 2. Nitrogênio 3. Espessura do mulch 4.  
Colheita mecanizada I. Giacomini, Sandro José II.  
Recous, Sylvie III. Título.


**Guilherme Dietrich**

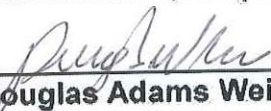
**GRADIENTE VERTICAL DE DECOMPOSIÇÃO E DINÂMICA DA ÁGUA NO  
MULCH DE CANA-DE-AÇÚCAR AFETADOS PELA QUANTIDADE DE PALHA**

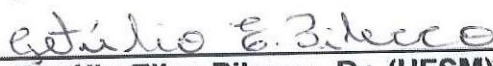
Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Doutor em Ciência do Solo**.

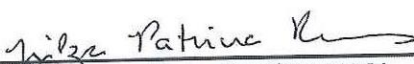
**Aprovado em 30 de julho de 2018:**

  
\_\_\_\_\_  
**Sandro José Giacomini, Dr. (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)

  
\_\_\_\_\_  
**Anderson Luiz Zwirtes, Dr. (IFSC) – Videoconferência**

  
\_\_\_\_\_  
**Douglas Adams Weiler, Dr. (UFSM)**

  
\_\_\_\_\_  
**Getúlio Elias Pilecco, Dr. (UFSM)**

  
\_\_\_\_\_  
**Nilza Patrícia Ramos, Dra. (EMBRAPA) – Videoconferência**

Santa Maria, RS  
2018

## DEDICATÓRIA

*A minha família*

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, por ter me guiado e me dado força e coragem para encarar os desafios da pós-graduação.

Aos meus pais Lauri e Marina, pelo apoio e confiança depositada.

À minha irmã Gabriela, pela amizade, incentivo e companheirismo.

À minha amada Estefani, pelo carinho, companheirismo e motivação nos momentos difíceis.

À Universidade Federal de Santa Maria e ao Departamento de Solos, pelo acolhimento.

Ao professor orientador Dr. Sandro José Giacomini, pela orientação, pelos ensinamentos e pela amizade.

Aos demais professores do PPGCS pelos ensinamentos durante a realização deste curso.

Ao funcionário do Departamento de Solos Heverton, pela amizade e eficiência na resolução dos problemas do dia-a-dia.

Aos amigos e colegas do LABCEN: Adriane, Bruno, Heitor, Janquiéli, Lethícia, Lineu, Mariana, Pâmela, Patrick, Raquel, Rosemar, Stefen e demais, pela amizade, momentos de descontração e ensinamentos compartilhados.

Aos bolsistas e ex-bolsistas de iniciação científica do LABCEN: Carolina Cledir, Daniela, Gustavo, Mathias, Rafael, Roberta e demais, pelo auxílio na realização deste trabalho e, sobretudo pela amizade, convívio e pelos momentos de alegria proporcionados por vocês.

À banca examinadora deste trabalho: Dr. Anderson Luiz Zwirtes, Dr. Douglas Adams Weiler, Dr. Getúlio Elias Pilecco, e Dra. Nilza Patricia Ramos, pelas considerações e contribuições.

À CAPES, pela bolsa de estudos concedida.

**A todos vocês, muito obrigado!**

## RESUMO

### GRADIENTE VERTICAL DE DECOMPOSIÇÃO E DINÂMICA DA ÁGUA NO MULCH DE CANA-DE-AÇÚCAR AFETADOS PELA QUANTIDADE DE PALHA

AUTOR: Guilherme Dietrich

ORIENTADOR: Sandro José Giacomini

A remoção parcial da palha de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp. L.) da superfície do solo após a colheita mecanizada para a produção de etanol celulósico deixa diferentes espessuras de *mulch* na superfície do solo. Assim, surge a necessidade de conhecer a quantidade de palha a ser recolhida sem prejudicar a conservação do solo. O objetivo do presente estudo foi compreender como a espessura do *mulch*, que varia de acordo com a quantidade de palha, e a adubação nitrogenada (N) afetam a dinâmica da água e a decomposição do *mulch* e das camadas que o compõem, bem como, como a espessura do *mulch* afeta o conteúdo de água e a temperatura do solo durante um ano. O aporte de quantidades equivalentes a 0, 4, 8 e 12 Mg ha<sup>-1</sup> de palha (P), em base seca, com e sem N, foi realizado no interior de quadros telados e deixados na superfície do solo após a colheita, em Santa Maria, RS, sob clima subtropical. Ainda, os tratamentos 8P e 12P foram divididos em camada superior (S) e inferior (I) e camada S, central (C) e I de palha, respectivamente, e empilhados de modo a reconstituir as quantidades de palha. O tratamento 4P foi considerado S e I. As camadas foram separadas por uma malha sintética de 10 mm e amostradas separadamente. As principais análises realizadas nas camadas da palha e no *mulch* foram: umidade, carbono e nitrogênio remanescentes (CR e NR). Para o solo, a temperatura e o conteúdo de água foram avaliados através de sondas WCR (modelo CS 616) e sensores termopares cobre-constantan do tipo T, respectivamente. Os resultados mostraram que a espessura do *mulch* e o N não afetaram a decomposição e a liberação de N. A umidade do *mulch* aumentou conforme a quantidade inicial de palha, porém, não refletiu na degradação do *mulch* (67%, em média). As diferentes quantidades de palha não diferiram quanto às taxas de decomposição porque existe um efeito compensatório entre as camadas. A menor proporção de palha em contato com o solo foi compensada por maiores taxas de decomposição da camada inferior. Entre as camadas do *mulch*, o conteúdo de água e a taxa de decomposição diferiram de acordo com a posição (I > C > S). As camadas superiores apresentaram a mesma umidade e taxa de decomposição para os três tratamentos. Por outro lado, as camadas inferiores decompuseram mais rapidamente sob maiores quantidades de palha, o que também reflete na umidade (12P I > 8P I > 4P I). O N remanescente apresentou comportamento semelhante ao C. Os *mulches* 8P e 12P apresentaram maior conteúdo médio de água e menor temperatura média do solo em comparação aos *mulches* 0P e 4P. Por fim, este trabalho mostra que a dinâmica da decomposição do *mulch* é governada principalmente pela dinâmica da água, que por sua vez, é afetada pela espessura do *mulch*, pela cobertura do dossel vegetativo e pelas condições meteorológicas do local.

**Palavras-chave:** Carbono. Nitrogênio. Espessura do *mulch*. Colheita mecanizada.

## ABSTRACT

### VERTICAL GRADIENT OF DECOMPOSITION AND DYNAMICS OF WATER IN MULCH OF SUGARCANE AFFECTED BY THE QUANTITY OF STRAW

AUTHOR: Guilherme Dietrich  
ADVISOR: Sandro José Giacomini

The partial removal of sugarcane straw (*Saccharum* spp. L.) from the soil surface after mechanized harvesting for the production of cellulosic ethanol leaves different mulch thicknesses at the soil surface. Thus, the need arises to know the amount of straw to be harvested without harming the soil conservation. The objective of the present study was to understand how the thickness of the mulch, which varies according to the amount of straw, and the nitrogen fertilization (N) affect the water dynamics and the decomposition of the mulch and the layers that compose it, as the thickness of the mulch affects the water content and the soil temperature for one year. The contribution of equivalent amounts to 0, 4, 8 and 12 DM ha<sup>-1</sup> of straw (S), on a dry basis, with and without N, was carried out inside screened frames and left on the soil surface after harvest, in Santa Maria, RS, under subtropical climate. Furthermore, the 8S and 12S treatments were divided into top (T) and lower (L) layers and T, medium (M) and L layer of straw, respectively, and stacked in order to reconstitute the amounts of straw. The 4S treatment was considered T and L. The layers were separated by a synthetic mesh of 10 mm and sampled separately. The main analyzes carried out on straw and mulch were: moisture, carbon and nitrogen remaining (CR and NR). For the soil, the temperature and the water content were evaluated using WCR probes (CS 616 model) and T-type copper-constantan thermocouple sensors, respectively. The results showed that the mulch and N thickness did not affect the decomposition and the release of N. The moisture of the mulch increased according to the initial amount of straw, but did not reflect the degradation of the mulch (67%, on average). The different amounts of straw did not differ in the rates of decomposition because there is a compensatory effect between the layers. The lower proportion of straw in contact with the soil was compensated by higher rates of decomposition of the lower layer. Among the mulch layers, the water content and decomposition rate differed according to the position (L > M > T). The top layers presented the same humidity and decomposition rate for the three treatments. On the other hand, the lower layers decomposed more rapidly under larger quantities of straw, which also reflected in moisture (12S L > 8S M > 4S L). The remaining N showed similar behavior to C. The mulch 8S and 12S presented higher average water content and lower average soil temperature compared to the 0S and 4S mulches. Finally, this work shows that the dynamics of mulch decomposition is governed mainly by the dynamics of the water, which in turn is affected by mulch thickness, vegetative canopy cover and local weather conditions.

**Keywords:** Carbon. Nitrogen. Mulch thickness. Mechanized harvest.



## LISTA DE FIGURAS

### ARTIGO I

Figura 1. Disposição dos quadros de decomposição na superfície do solo, com destaque para as camadas de palha do <i>mulch</i> em cada espessura e a localização dos sensores de temperatura (superfície, 2,5 e 7,5 cm de profundidade) e conteúdo de água do solo (2,5 e 7,5 cm de profundidade). .....	22
Figura 2. Umidade média do <i>mulch</i> e de suas camadas nas quatro dinâmicas avaliadas. As barras verticais representam a diferença mínima significativa entre os tratamentos. ....	28
Figura 3. Conteúdo volumétrico de água do solo (a), temperatura da superfície do solo (b), umidade da palha nas camadas do <i>mulch</i> (c), umidade da palha (d) e insolação e umidade relativa do ar (e) na 1ª dinâmica. As barras verticais indicam diferença mínima significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey 5%. ....	29
Figura 4. Emissão diária (a) e acumulada (b) de C-CO <sub>2</sub> na 1ª dinâmica. As barras verticais indicam diferença mínima significativa entre os tratamentos pelo teste LSD (P < 0.05). ....	31
Figura 5. Conteúdo volumétrico de água do solo (a), temperatura da superfície do solo (b), umidade da palha nas camadas do <i>mulch</i> (c), umidade da palha (d) e insolação e umidade relativa do ar (e) na 2ª dinâmica. As barras verticais indicam diferença mínima significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey 5%. ....	32
Figura 6. Emissão diária (a) e acumulada (b) de C-CO <sub>2</sub> na 2ª dinâmica. As barras verticais indicam diferença mínima significativa entre os tratamentos pelo teste LSD (P < 0.05). ....	33
Figura 7. Conteúdo volumétrico de água do solo (a), temperatura da superfície do solo (b), umidade da palha nas camadas do <i>mulch</i> (c), umidade da palha (d) e insolação e umidade relativa do ar (e) na 3ª dinâmica. As barras verticais indicam diferença mínima significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey 5%. ....	35
Figura 8. Emissão diária (a) e acumulada (b) de C-CO <sub>2</sub> na 3ª dinâmica. As barras verticais indicam diferença mínima significativa entre os tratamentos pelo teste LSD (P < 0.05). ....	36
Figura 9. Conteúdo volumétrico de água do solo (a), temperatura da superfície do solo (b), umidade das camadas do <i>mulch</i> (c), umidade da palha (d) e insolação e umidade relativa do ar (e) na 4ª dinâmica. As barras verticais indicam diferença mínima significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey 5%. ....	37
Figura 10. Emissão diária (a) e acumulada (b) de C-CO <sub>2</sub> na 4ª dinâmica. As barras verticais indicam diferença mínima significativa entre os tratamentos pelo teste LSD (P < 0.05). ....	39

## LISTA DE TABELAS

### ARTIGO I

Tabela 1. Resultados da análise de variância (ANOVA) para as variáveis medidas no mulch e no solo. ....	27
---	----

### ARTIGO II

Table 1. Decomposition parameters of the degradation model (Jenny et al., 1949) for the mulch with different straw quantity (4S: 4Mg, 8S: 8Mg and 12S: 12 Mg ha <sup>-1</sup> ) and N rate (0 and 100 Mg ha <sup>-1</sup> ) and mulch straw layers (L: low, M: medium, T: top). ....	62
Table S1. Results of analysis of variance (ANOVA) for the measured variables in mulch and soil. ....	75
Table S2. Results of analysis of variance (ANOVA) for the measured variables in mulch straw layers.....	76

## SUMÁRIO

<b>1 – INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	14
1.1 – HIPÓTESES .....	16
1.2 - OBJETIVOS .....	16
1.2.1 - Objetivo geral .....	16
1.2.2 - Objetivos específicos .....	16
<b>2 - ARTIGO I – INFLUÊNCIA DA ESPESSURA NA UMIDADE DO <i>MULCH</i>, UMIDADE E TEMPERATURA DO SOLO E NA EMISSÃO DE CO<sub>2</sub></b> .....	18
2.1 – RESUMO .....	18
2.2 – INTRODUÇÃO.....	19
2.3 - MATERIAL E MÉTODOS .....	20
2.3.1 - Local do estudo e design experimental .....	20
2.3.2 – Dinâmica da umidade no <i>mulch</i> .....	22
2.3.3 – Conteúdo de água e temperatura do solo.....	23
2.3.4 – Emissão de CO <sub>2</sub> .....	23
2.3.5 – Análise estatística .....	24
2.4 - RESULTADOS .....	25
2.4.1 - Contexto geral .....	25
2.4.2 – 1ª dinâmica .....	28
2.4.3 – 2ª dinâmica .....	31
2.4.4 – 3ª dinâmica .....	34
2.4.5 – 4ª dinâmica .....	36
2.5 - DISCUSSÃO .....	39
2.5.1 – Conteúdo de água do solo .....	39
2.5.2 – Temperatura do solo.....	41
2.5.3 – Conteúdo de água do <i>mulch</i> .....	42
2.5.4 – Conteúdo de água das camadas do <i>mulch</i> .....	43
2.5.5 – Emissão de CO <sub>2</sub> .....	44
2.6 – CONCLUSÕES.....	46
2.7 – REFERÊNCIAS .....	47
<b>3 – ARTIGO II - STRAW QUANTITY AND LAYER THICKNESS DETERMINES WATER DYNAMICS AND VERTICAL GRADIENTS OF DECOMPOSITION IN SUGARCANE MULCHES</b> .....	50
3.1 - ABSTRACT .....	50

3.2 – INTRODUCTION .....	51
3.3 - MATERIALS AND METHODS.....	52
<b>3.3.1 - Study site</b> .....	52
<b>3.3.2 - Main experimental design</b> .....	53
<b>3.3.3 - Decomposition of straw</b> .....	53
<b>3.3.4 - Soil water content and soil temperature</b> .....	55
<b>3.3.5 - Calculations and statistical analysis</b> .....	55
3.4 – RESULTS .....	56
<b>3.4.1 - Climatic and soil environmental conditions</b> .....	56
<b>3.4.2 - Dynamic of thickness and water retention of mulch</b> .....	58
<b>3.4.3 - Dynamic of mulch decomposition</b> .....	60
<b>3.4.4 - Dynamic of mulch straw layer decomposition</b> .....	63
3.5 - DISCUSSION .....	66
<b>3.5.1 - Effect of mulch quantity and thickness on mulch decomposition</b> ...	66
<b>3.5.2 - Gradients within the mulch</b> .....	67
<b>3.5.3 - Much conceptual modelling</b> .....	69
3.6 - CONCLUSIONS .....	69
3.7 – REFERENCES .....	70
<b>4 - DISCUSSÃO GERAL</b> .....	77
<b>5 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	78

## 1 – INTRODUÇÃO GERAL

A cultura da cana-de-açúcar é originária da Ásia e atualmente sua produção se expandiu por quase todo o globo terrestre, em especial, aos países de clima tropical e subtropical, dentre os quais o Brasil ocupa lugar de destaque com área colhida de aproximadamente 8,6 milhões de hectares (CONAB, 2018). A produção de etanol a partir da cana-de-açúcar apresenta alto potencial de redução nas emissões de gases de efeito estufa, quando comparado ao uso de combustíveis fósseis. No entanto, para suprir a crescente demanda mundial por biocombustíveis, a oferta deverá ser elevada dos atuais 80 para aproximadamente 200 bilhões de litros até 2021 (GOLDEMBERG et al., 2014).

Atualmente, em mais de 90% da área cultivada com cana-de-açúcar a colheita é mecanizada sem queima da palha, o que torna a produção ainda mais sustentável. O gradual fim das queimadas é regido por legislação nacional e, em alguns casos, estadual. Com o estabelecimento da colheita mecanizada sem queima prévia, restam cerca de 10 Mg ha<sup>-1</sup> de palha sobre a superfície do solo para cada 100 Mg ha<sup>-1</sup> de colmos produzidos (ROBERTSON e THORBURN, 2007). Embora sua presença na superfície do solo apresente benefícios para a cultura, as grandes quantidades de palha despertaram o interesse da indústria para a sua utilização como matéria prima para a geração de eletricidade e produção de etanol lignocelulósico (LEAL et al., 2013; NUNES et al., 2013). Logo, com o recolhimento de parte da palha da superfície do solo para fins comerciais, diversos autores estudaram a presença de diferentes espessuras de *mulch* com o objetivo de compreender o processo de decomposição e a emissão de gases de efeito estufa (RAMOS et al., 2016; DIETRICH et al., 2017; VASCONCELOS et al., 2018)

Como forma de minimizar os impactos negativos causados pela retirada total da palha da superfície do solo e incrementar a produção de etanol, a retirada parcial surge como uma alternativa promissora. Em virtude de ser uma prática recente, os efeitos dessa prática e a quantidade de palha que deve permanecer na superfície do solo ainda não são claros. Dessa forma, a definição da quantidade de resíduos a ser retirada da superfície do solo depende da compreensão dos fatores que interferem na decomposição, entre eles, o contato solo-palha e os fatores ambientais, como a temperatura e o conteúdo de água do solo e da palha (PERES et al., 2010; IQBAL et al., 2013, 2015; LEAL et al., 2013).

Em virtude da lenta decomposição da palha de cana-de-açúcar, grande parte desta palha permanece na superfície do solo por um longo período. Essa baixa taxa de decomposição ocorre em virtude de sua composição química, com destaque para a relação C/N, que varia de 70 a 120 (CARVALHO et al., 2016; YAMAGUCHI et al., 2017; DIETRICH et al., 2017). Devido a alta relação C/N da palha, pode ocorrer a imobilização do nitrogênio (N) do solo pelos microrganismos para que ocorra a decomposição, o que pode reduzir a disponibilidade desse nutriente para a cultura (HADAS et al., 2004). Nesse caso, a aplicação de N em cobertura aumenta a disponibilidade de N no solo e pode aumentar a taxa de decomposição. No entanto, o efeito da adubação nitrogenada no aumento da taxa de decomposição do mulch pode depender do contato entre a palha e o solo.

A relação de contato entre o solo e o mulch representa um dos principais fatores que afetam o processo de decomposição, principalmente com os resíduos incorporados ao solo (ANGERS e RECOUS, 1997). Embora *mulches* mais espessos apresentem menor proporção de palha em contato direto com o solo, esses *mulches* podem reduzir a amplitude térmica (GASPARIN et al., 2005) e mantém o conteúdo de água do solo em níveis superiores, favorecendo o processo de decomposição (CHERUBIN et al., 2017). De acordo com o modelo de decomposição APSIM - Residue, a decomposição do *mulch* ocorre apenas na camada de palha que está em contato com o solo, e a medida que a palha dessa camada é decomposta, parte da camada superior entra em contato com o solo e se decompõe (THORBURN et al., 2001). Sendo assim, menores quantidades de palha possuem maior proporção de contato com o solo e tendem a favorecer a decomposição. Em contrapartida ao maior contato solo-palha, maiores quantidades de palha podem favorecer a decomposição em função da manutenção da temperatura e umidade do mulch e do solo em níveis próximos do ideal para a atividade microbiana, o que pode não restringir a decomposição. Aliada a menor amplitude térmica, mulches mais espessos promovem a manutenção da umidade do solo por um período prolongado, favorecendo assim, a atividade da comunidade decompositora (PERES et al., 2010).

Portanto, a espessura do *mulch* de palha de cana-de-açúcar vai determinar o impacto dos fatores que vão interferir na decomposição do mulch, sendo que cada mulch apresenta características próprias que conferem condições distintas de decomposição para cada espessura de mulch, bem como, para cada camada de palha que compreende o *mulch*. Em síntese, o presente trabalho fundamenta-se na

necessidade de aprimorar o conhecimento em aspectos até então pouco estudados e/ou compreendidos, relacionados a decomposição de diferentes quantidades de palha de cana-de-açúcar em superfície com e sem adubação nitrogenada.

## 1.1 – HIPÓTESES

a) O aumento da proporção de palha de cana-de-açúcar em contato direto com o solo, em função da retirada parcial da palha da lavoura, não resulta em aumento na decomposição e liberação de carbono (C) e N da palha.

b) *Mulches* mais espessos apresentam maior conteúdo médio de água no *mulch* e no solo e menor temperatura média no solo. Também, existe um gradiente vertical de umidade no *mulch*, que aumenta conforme a proximidade com o solo. Entre os diferentes *mulches*, as camadas inferiores dos *mulches* sob maiores quantidades de palha apresentam maiores conteúdos médios de água. Ainda, a umidade das camadas do *mulch* condiciona a sua taxa de decomposição.

c) A adição de N via adubação nitrogenada aumenta a taxa de decomposição, degradação dos carboidratos estruturais e liberação de C e N nas diferentes espessuras do *mulch* e das diferentes camadas que o compõem.

## 1.2 - OBJETIVOS

### 1.2.1 - Objetivo geral

Compreender a dinâmica da decomposição de diferentes espessuras de *mulch* de palha de cana-de-açúcar, com e sem adubação nitrogenada de cobertura, na primeira soca no Sul do Brasil.

### 1.2.2 - Objetivos específicos

a) Quantificar a liberação de C e N durante a decomposição de diferentes espessuras de *mulches* e das camadas que o compõem.

b) Compreender o impacto da presença de diferentes espessuras de *mulch* na umidade e temperatura do solo e na umidade do *mulch* e de suas camadas.

c) Compreender a relação entre a umidade da palha e a decomposição e liberação de C e N em diferentes espessuras de *mulch* e de suas camadas.

d) Quantificar a degradação dos carboidratos estruturais: celulose (CEL), hemicelulose (HEM) e lignina (LIG) em diferentes espessuras do *mulch* e nas camadas que o compõem.

e) Compreender o impacto da adubação nitrogenada de cobertura na decomposição, degradação de carboidratos estruturais e liberação de C e N do *mulch* e das diferentes camadas que o compõem.



## 2 - ARTIGO I – INFLUÊNCIA DA ESPESSURA NA UMIDADE DO *MULCH*, UMIDADE E TEMPERATURA DO SOLO E NA EMISSÃO DE CO<sub>2</sub>

### 2.1 – RESUMO

A remoção parcial da palha de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp. L.) da lavoura provoca alteração na espessura do *mulch* na superfície do solo com impacto sobre a dinâmica da água no solo e no *mulch* e a liberação de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). O objetivo do presente estudo foi avaliar a dinâmica da água no solo e no *mulch*, a temperatura do solo e a emissão de CO<sub>2</sub> em diferentes espessuras de *mulch*. O experimento foi conduzido em cana de primeira soca no período de novembro de 2015 a julho de 2016. O delineamento experimental foi o de blocos inteiramente casualizados com 4 repetições. A palha de cana-de-açúcar foi adicionada à quadros em quantidades equivalentes a 0, 4,8 e 12 Mg ha<sup>-1</sup> de palha (P). Os tratamentos 8P e 12P foram divididos em 2 e 3 camadas, respectivamente. Assim, o *mulch* 8P foi dividido em camada superior (8P S) e inferior (8P I), o *mulch* 12P foi dividido em camada superior (12P S), central (12P C) e inferior (12P I). A umidade do *mulch* foi avaliada em 4 momentos, com início aos 15, 51, 103 e 238 dias após o início do estudo. Os *mulches* 8P e 12P apresentaram maior conteúdo médio de água do solo (0,23 g cm<sup>-3</sup>) e menor temperatura média do solo (22,4°C). A retenção de água dos *mulches* reduziu conforme a espessura do *mulch*: 12P (40,3%) > 8P (37,5%) > 4P (34,2%). Embora não tenha havido diferença no conteúdo de água das camadas superiores dos *mulches*, o conteúdo de água das camadas inferiores decresceu na seguinte ordem: 12P I (46,5%) > 8P I (42,0%) > 4P S/I (34,2%). O conteúdo de água das camadas dos *mulches* 8P e 12P decresceu na seguinte ordem: 8P I (42,0%) > 8P S (33,3%) e 12P I (46,5%) > 12P C (42,2%) > 12P S (32,7%), respectivamente. A emissão acumulada de C-CO<sub>2</sub> não diferiu entre os tratamentos. Existe um gradiente de umidade no *mulch*, que aumenta conforme a proximidade entre a camada de palha e o solo. Ainda, maiores quantidades de palha proporcionam maior conteúdo médio de água no *mulch* e no solo e menor temperatura média no solo, além de não afetar as emissões de C-CO<sub>2</sub>.

**Palavras-chave:** Água no solo, Cana-de-açúcar. Decomposição. Dióxido de carbono.

## 2.2 – INTRODUÇÃO

Recentemente no Brasil, a cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum spp. L.*) passou a ser colhida mecanicamente sem queima prévia para limpeza dos colmos. A adoção dessa prática gera grandes quantidades de palha que permanecem na superfície do solo após a colheita. No entanto, esta palha passou a ser recolhida para a produção de etanol de segunda geração, com isso, a superfície do solo pode permanecer coberta com diferentes espessuras de *mulch* formado pela palha remanescente na lavoura (LEAL et al., 2013; MARIN et al., 2014). A presença de diferentes espessuras de *mulch* condicionam características próprias do solo e do *mulch*, entre elas, a temperatura e o conteúdo de água do solo. *Mulches* mais espessos reduzem a amplitude térmica do solo (MURUNGU et al., 2011) e mantêm maior conteúdo de água do solo por um período mais prolongado (ANJOS et al., 2017). Esse *mulch* também pode atuar como uma barreira física impedindo que a água resultante de precipitações de baixa intensidade atinja o solo, causando a sua evaporação diretamente da palha (SOMMER et al., 2012; ALLIAUME et al., 2017). Assim, a evaporação e o acúmulo de água no solo são regidos por vários fatores, incluindo a quantidade de precipitação, a taxa potencial de evaporação, o tipo de solo e a espessura do *mulch* (JI e UNGER, 2001).

Em *mulches* pouco espessos, maior proporção da palha permanece em contato direto com o solo, no qual, os *mulches* podem apresentar conteúdo de água mais homogêneo em seu interior. Dessa forma, o conteúdo de água do *mulch* pode ser dependente de condições climáticas, da capacidade de armazenamento de água do *mulch* (IQBAL et al., 2013) e do conteúdo de água do solo (YOON et al., 2014). Em *mulches* mais espessos, a redução da amplitude térmica e a manutenção do conteúdo médio de água do solo podem alterar a atividade microbiana (KADER et al., 2017). Ainda, a temperatura e o conteúdo de água do solo e do *mulch* são importantes fatores que alteram a taxa de decomposição de resíduos agrícolas (IQBAL et al., 2015), sendo que as maiores reduções na taxa de decomposição ocorrem em altas temperaturas e nos extremos do conteúdo de água do solo (SIERRA et al., 2015).

De maneira geral, a frequência das precipitações e a ação da radiação solar e do vento podem condicionar os ciclos de umedecimento e secagem do *mulch* com impacto sobre a decomposição dos resíduos culturais (PERES et al., 2010;

SCHUSTER, 2016), com destaque para a camada inferior do *mulch*, onde o contato com o solo favorece o umedecimento (IQBAL et al., 2015). Dessa forma, a presença de diferentes espessuras de *mulch* pode manter elevado o conteúdo de água e reduzir a temperatura do solo (SANTOS, 2017), além de alterar a taxa de decomposição do *mulch*. A maior taxa de decomposição do *mulch* implica na emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), que é maior conforme aumenta o conteúdo de água do solo (MOITINHO et al., 2013; VARGAS et al., 2014) e a temperatura do ar (CAMPOS et al., 2011), dentro de valores que favoreçam a atividade microbiana. Além disso, o conteúdo de água do solo interfere na difusão de oxigênio e no movimento de substratos solúveis (LINN e DORAN, 1984; ZHOU et al., 2014; SIERRA et al., 2015) e o aumento da temperatura do ar também favorece a atividade enzimática (WALLENSTEIN et al., 2011), o que contribui para uma maior emissão de CO<sub>2</sub>.

Dessa forma, no contexto da remoção parcial ou total da palha da cana-de-açúcar da superfície do solo para a produção de energia, os objetivos do presente estudo foram compreender o comportamento da água no *mulch* e nas camadas que o compõem, bem como, o impacto da espessura do *mulch* na emissão de CO<sub>2</sub>.

## 2.3 - MATERIAL E MÉTODOS

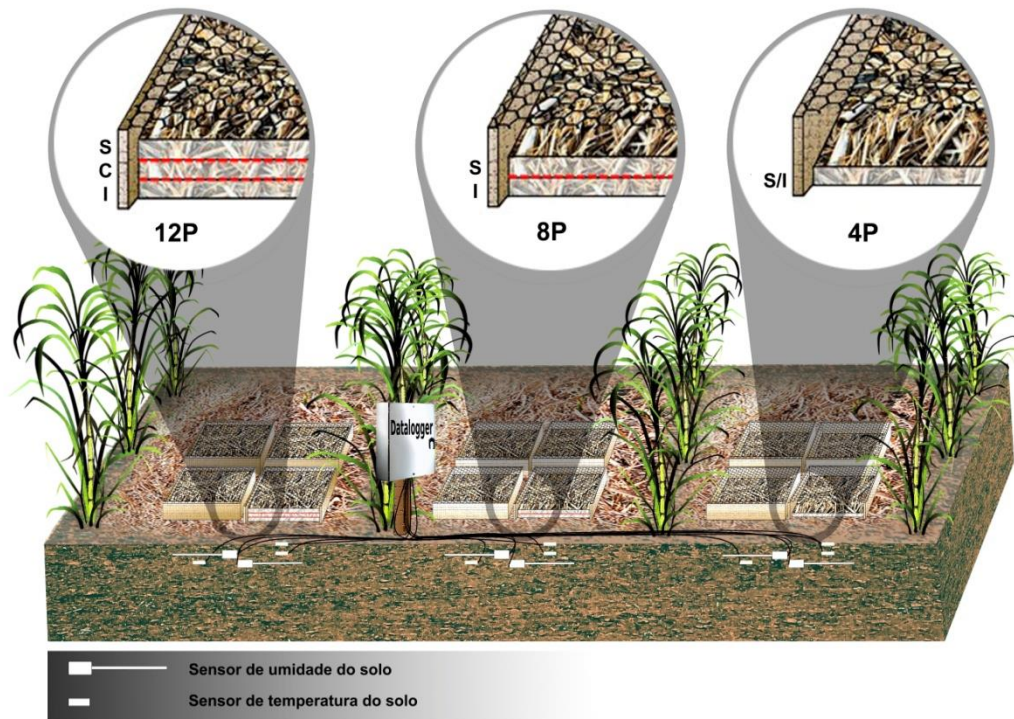
### 2.3.1 - Local do estudo e design experimental

O estudo foi conduzido na Universidade Federal de Santa Maria (29°42'54" S, 53°42'23" W; aproximadamente 90 m de altitude) no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. O clima do local de acordo com a classificação de Köppen é subtropical úmido do tipo Cfa. A temperatura média anual é de 19,3°C, com junho sendo o mês mais frio com uma temperatura mínima média de 9,3°C e janeiro o mês mais quente com uma temperatura máxima média de 30,4°C. A precipitação média anual é de 1660 mm, sem estação seca. O solo é classificado como Argissolo Vermelho Distrófico arênico (EMBRAPA, 2013), com 630 g kg<sup>-1</sup> de areia, 260 g kg<sup>-1</sup> de silte, 110 g kg<sup>-1</sup> de argila mensurados através do método do densímetro, e densidade do solo de 1,63 g dm<sup>-3</sup> na camada de 0-20 cm. As características selecionadas do solo (camada de 0-10 cm) no início do experimento foram: pH (água) = 5,6; CTC = 2,5

cmolc dm<sup>-3</sup>, Mehlich-I P = 33,4 mg dm<sup>-3</sup>, K = 40,0 mg dm<sup>-3</sup>, C total = 7,54 g kg<sup>-1</sup> e N total = 0,38 g kg<sup>-1</sup>.

O experimento foi conduzido na primeira soqueira da cana-de-açúcar, no período de novembro de 2015 a julho de 2016 e começou após a colheita da cana realizada em 20 de novembro de 2015. A variedade de cana-de-açúcar utilizada foi a RB956911 (RIDESA). A colheita foi realizada manualmente, na qual foi removida toda a biomassa presente na superfície do solo, deixando o solo descoberto. Uma área foi demarcada com 32 parcelas de 22,4 m<sup>2</sup>, consistindo de 4 linhas com 1,4 m de espaçamento entre linhas e 4 m de comprimento. O delineamento experimental utilizado foi de blocos inteiramente casualizados com 4 repetições. Os tratamentos consistiram de 4 quantidades de palha: 0 (0P), 4 (4P), 8 (8P) e 12 (12P) Mg ha<sup>-1</sup> de matéria seca (MS). Os tratamentos 8P e 12P foram compostos por 2 e 3 camadas de palha, respectivamente, com 4 Mg de MS ha<sup>-1</sup> cada. Portanto, os tratamentos com 8 Mg de MS ha<sup>-1</sup> foram divididos em camada superior (8P S) e inferior (8P I), e 12 Mg de MS ha<sup>-1</sup> foram divididos em camada superior (12P S), central (12P C) e inferior (12P I), conforme detalhado na figura 1. As camadas dos *mulches* foram separadas com rede de pesca de malha 10 mm. A palha seca ao ar foi adicionada em quadros de madeira medindo 40 x 40 x 8 cm (comprimento x largura x altura), dispostos na entrelinha da cana-de-açúcar (Figura 1). Os fundos das molduras de madeira foram delimitados com tela de náilon de 2 mm, enquanto a parte superior das molduras de madeira foram fechadas com tela de malha plástica de 10 mm para evitar a perda de palha pela ação do vento e permitir o acesso à macrofauna do solo. A palha foi homogeneamente distribuída de forma manual na superfície do solo. A palha usada neste estudo foi coletada em cana-de-açúcar de primeiro corte (RB956911) após colheita mecanizada na empresa Grandespe em Salto do Jacuí, Rio Grande do Sul, Brasil (28°59'S, 53°14'W; 345 m de altitude).

Figura 1. Disposição dos quadros de decomposição na superfície do solo, com destaque para as camadas de palha do *mulch* em cada espessura e a localização dos sensores de temperatura (superfície, 2,5 e 7,5 cm de profundidade) e conteúdo de água do solo (2,5 e 7,5 cm de profundidade).



### 2.3.2 – Dinâmica da umidade no *mulch*

A dinâmica da umidade do *mulch* foi realizada nos tratamentos 4P, 8P e 12P, com três repetições. As coletas de amostras de palha foram realizadas em quatro dinâmicas e ocorreram em diferentes estádios de decomposição da palha, sendo realizadas aos 15, 18, 19, 20, 24 (1ª dinâmica), 51, 53, 55, 57, 59 (2ª dinâmica), 103, 106, 108, 114, 117 (3ª dinâmica), 238, 240, 242, 245 e 247 dias após o início do estudo (4ª dinâmica). Para cada coleta, cada camada de palha dos tratamentos 8P e 12P foram amostradas separadamente. Após a coleta, todas as amostras de palha de cana foram armazenadas em sacos de papel e secas em estufa a 40°C. A palha foi então separada do solo aderente por limpeza a seco e uma subamostra foi seca em estufa a 65°C e pesada para a determinação da umidade. Como forma de minimizar os efeitos da variação climática sobre a umidade da palha, as coletas

sempre foram realizadas às 9 horas. A umidade gravimétrica da palha foi calculada em cada camada do *mulch* através da seguinte equação:

$$U_{gp} (\%): \left( \frac{P_u - P_s}{P_u} \right) * 100 \quad (1)$$

sendo:  $U_{gp}$  a umidade da palha;  $P_u$  a massa da palha úmida;  $P_s$  a massa da palha seca a 65°C. Para a avaliação da umidade total do *mulch*, usou-se a média ponderada em função da matéria seca remanescente em cada camada (dados não mostrados).

### 2.3.3 – Conteúdo de água e temperatura do solo

O conteúdo de água do solo foi mensurado por meio de sondas WCR (water content reflectometer) modelo CS 616 (Campbell Scientific, Inc) inseridos horizontalmente a 2,5 e 7,5 cm de profundidade foram utilizados para medir o conteúdo de água do solo. A temperatura do solo foi mensurada por meio de sensores termopares cobre-constantan do tipo T, que foram instalados na superfície do solo, a 2,5 e a 7,5 cm de profundidade (Figura 1). Os sensores termopares instalados na superfície do solo foram cobertos com uma fina camada de solo para evitar a incidência direta da radiação solar. As sondas do conteúdo de água do solo e da temperatura do solo foram instaladas na entrelinha da cana-de-açúcar e acopladas a um *datalogger* modelo CR1000 (Campbell Scientific, Logan, Utah, EUA). A temperatura e o conteúdo de água do solo foram mensuradas em leituras instantâneas a cada 10 minutos. Os dados meteorológicos (precipitação, umidade relativa do ar e insolação) foram obtidos a partir da estação meteorológica automática do INMET, instalada na Universidade Federal de Santa Maria, localizada a 1,7 km do experimento. As precipitações que antecederam as dinâmicas ocorreram aos 10, 50, 102 e 235 dias após o início do estudo e foram de 8, 2, 6 e 19 mm, respectivamente.

### 2.3.4 – Emissão de CO<sub>2</sub>

A emissão de CO<sub>2</sub> foi avaliada com um conjunto base-câmara confeccionado em aço galvanizado. As bases e as câmaras possuem 70 x 40 x 10 cm e 70 x 40 x 20 cm (comprimento x largura x altura), respectivamente. Na parte superior, as

bases possuem uma canaleta, na qual era adicionada água para total vedação do conjunto base-câmara. As bases foram inseridas no solo a 5 cm de profundidade. Na parte superior das câmaras existem 3 orifícios equidistantes vedados com tampas de borracha. O orifício central conduz energia de uma bateria de 12 volts para um ventilador de 8 cm de diâmetro, fixado na parte superior interna da câmara, cuja função é homogeneizar o ambiente. Um dos orifícios laterais contém uma válvula de três vias, onde uma seringa de polipropileno com capacidade para 20 cm<sup>3</sup> é encaixada por meio de uma rosca helicoidal. Um termômetro digital foi inserido no terceiro orifício para determinar a temperatura interna das câmaras.

As coletas de CO<sub>2</sub> foram realizadas com três repetições e ocorreram em três tempos após o fechamento das câmaras (0, 18 e 36 minutos). A temperatura e a umidade do solo foram medidas por meio dos sensores acima mencionados. Após a coleta, as amostras de ar presentes nas seringas foram inseridas em exetainers, acondicionadas em uma caixa térmica e encaminhadas para análise por cromatografia gasosa (GC – Greenhouse 2014). As coletas foram realizadas nas mesmas datas de coleta de palha. A variação da concentração de CO<sub>2</sub> em cada coleta foi ajustada através do coeficiente angular da reta obtida pelos três tempos de coleta. Os fluxos diários de CO<sub>2</sub> foram analisados por interpolação linear e os fluxos acumulados foram obtidos através da integração das médias diárias. Para tanto, a média dos fluxos entre duas coletas foi multiplicada pelo respectivo intervalo de tempo em dias.

### **2.3.5 – Análise estatística**

A análise estatística foi realizada através do programa estatístico SISVAR (FERREIRA, 2011). O conteúdo de água do *mulch* e de suas camadas foi testado por ANOVAs de dois fatores: camada ou quantidade de palha x dinâmica. A emissão acumulada de CO<sub>2</sub> também foi testada para estes fatores. Já a temperatura e a umidade do solo foram testadas por ANOVAs de três fatores: quantidade de palha x profundidade x dinâmica. Quando a ANOVA indicou diferenças significativas (P <0,05), as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Tukey (P <0,05), exceto para a emissão acumulada de C-CO<sub>2</sub>, no qual foi aplicado o teste LSD (P < 0,05).

## 2.4 - RESULTADOS

### 2.4.1 - Contexto geral

O conteúdo de água do solo foi significativo para a interação quantidade x profundidade e quantidade x dinâmica (Tabela 1). *Mulches* de 12P e 8P apresentaram conteúdo médio de água do solo maior do que 4P e 0P. O conteúdo médio de água foi maior na camada 5-10 cm do que na camada 0-5 cm. Na profundidade 0-5 cm, houve incremento no conteúdo de água do solo com o aumento da espessura do *mulch*. Na profundidade 5-10 cm, o conteúdo de água do solo em *mulches* de 12P e 8P foram maiores que os *mulches* de 4P e 0P. O conteúdo médio de água do solo diferiu apenas nas primeiras 3 dinâmicas e aumentou de 0P até *mulches* de 8P.

A temperatura média do solo foi significativa para quantidade x dinâmica e profundidade x dinâmica (Tabela 1). *Mulches* de 8P e 12P apresentaram menor temperatura média do solo. A temperatura média da superfície do solo (23,0°C) foi maior do que a observada para a profundidade de 5-10 cm (22,6°C), enquanto que a temperatura média da profundidade de 0-5 cm (22,9°C) não diferiu das demais. A presença de *mulches* de 4P apresentou menor temperatura média do solo na 1ª dinâmica. Na 2ª dinâmica, a menor temperatura média foi encontrada nos *mulches* de 8P e 12P. Entre as profundidades, a temperatura do solo diferiu apenas na 2ª dinâmica, sendo de 31,1°C (superfície) > 30,4°C (0-5 cm) = 29,8°C (5-10 cm).

A umidade do *mulch* foi significativa para quantidade de palha e dinâmica (Tabela 1). *Mulches* mais espessos apresentaram maior conteúdo médio de água. A umidade média do *mulch* 12P foi maior do que o *mulch* 4P, com exceção da 2ª dinâmica (Figura 1). Já a umidade média do *mulch* 8P foi maior que o *mulch* 4P na 4ª dinâmica e menor que no *mulch* 12P na 3ª dinâmica.

Em relação às camadas de palha do *mulch*, a umidade foi significativa para camada e dinâmica (Tabela 1). Ao comparar a localização da palha no *mulch*, a umidade média foi: 12P I (46,5%) > 12P C (42,2%) = 8P I (42,0%) > 4P (34,2%) = 8P S (33,3%) = 12P S (32,7%). A umidade das camadas superiores do *mulch* não diferiu, com exceção da 1ª dinâmica (Figura 2). Para as camadas inferiores do *mulch*, a umidade foi: 12P I > 8P I > 4P, com exceção da 1ª e 4ª dinâmicas onde 12P I foi semelhante a 8P I e da 2ª dinâmica onde os tratamentos não diferiram entre si. Entre as camadas do mesmo *mulch*, o conteúdo de água da camada 8P I foi



maior que a camada 8P S na 1ª e 3ª dinâmicas. Para o *mulch* 12P, o conteúdo de água da camada 12P I superou a camada 12P S, enquanto a camada 12P C apresentou menor conteúdo de água que a camada 12P I na 1ª dinâmica e não superou a camada 12P S na 2ª dinâmica.

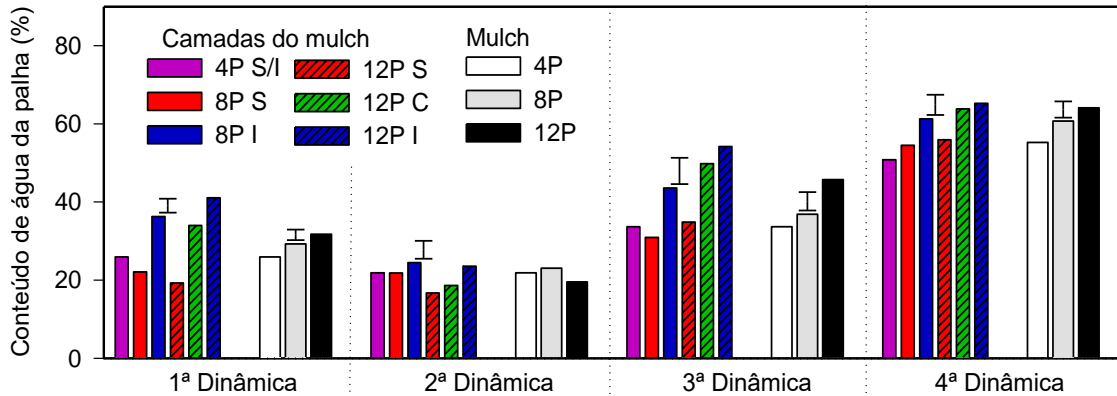
Tabela 1. Resumo da análise de variância (ANOVA) para as variáveis medidas no mulch e no solo.

Variáveis	ANOVA							
	Q <sup>a</sup>	P <sup>b</sup>	D <sup>c</sup>	Q x P	Q x D	P x D	Q x P x D	CV (%)
<b>Solo</b>								
Conteúdo de água (g cm <sup>-3</sup> )	<0,001 <sup>e</sup>	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,1529	0,9862	6,04
Temperatura (°C)	<0,001	0,0177	<0,001	0,7875	<0,001	0,0039	0,9966	2,80
	<b>Q</b>	<b>D</b>		<b>Q x D</b>				<b>CV (%)</b>
<b>Mulch</b>								
Conteúdo de água (%)	<0,001	<0,001	-	<0,001	-	-	-	7,21
Emissão acumulada (kg C-CO <sub>2</sub> ha <sup>-1</sup> )	0,8914	<0,001	-	0,0642	-	-	-	26,56
	<b>C<sup>d</sup></b>	<b>D</b>		<b>C x D</b>				<b>CV (%)</b>
<b>Camadas de palha do mulch</b>								
Conteúdo de água (%)	<0,001	<0,001	-	<0,001	-	-	-	6,95

<sup>a</sup> Q: quantidade inicial de palha (4, 8 ou 12 Mg MS ha<sup>-1</sup>). <sup>b</sup> P: profundidade para o conteúdo de água (2,5 e 7,5 cm) e para a temperatura do solo (superfície, 2,5 e 7,5 cm). <sup>c</sup> D: média das coletas na dinâmica (1<sup>a</sup>, 2<sup>a</sup>, 3<sup>a</sup> e 4<sup>a</sup>), exceto para a emissão acumulada de C-CO<sub>2</sub>. <sup>d</sup> C: camadas de palha do *mulch* (4P, 8P S, 8P I, 12P S, 12P C e 12P I). <sup>e</sup> Os fatores e suas interações são considerados significativos em valores de P <0,05.

A emissão acumulada de CO<sub>2</sub> diferiu apenas entre as dinâmicas, sendo que a 4ª dinâmica teve menor emissão acumulada de CO<sub>2</sub> em comparação as demais (Tabela 1).

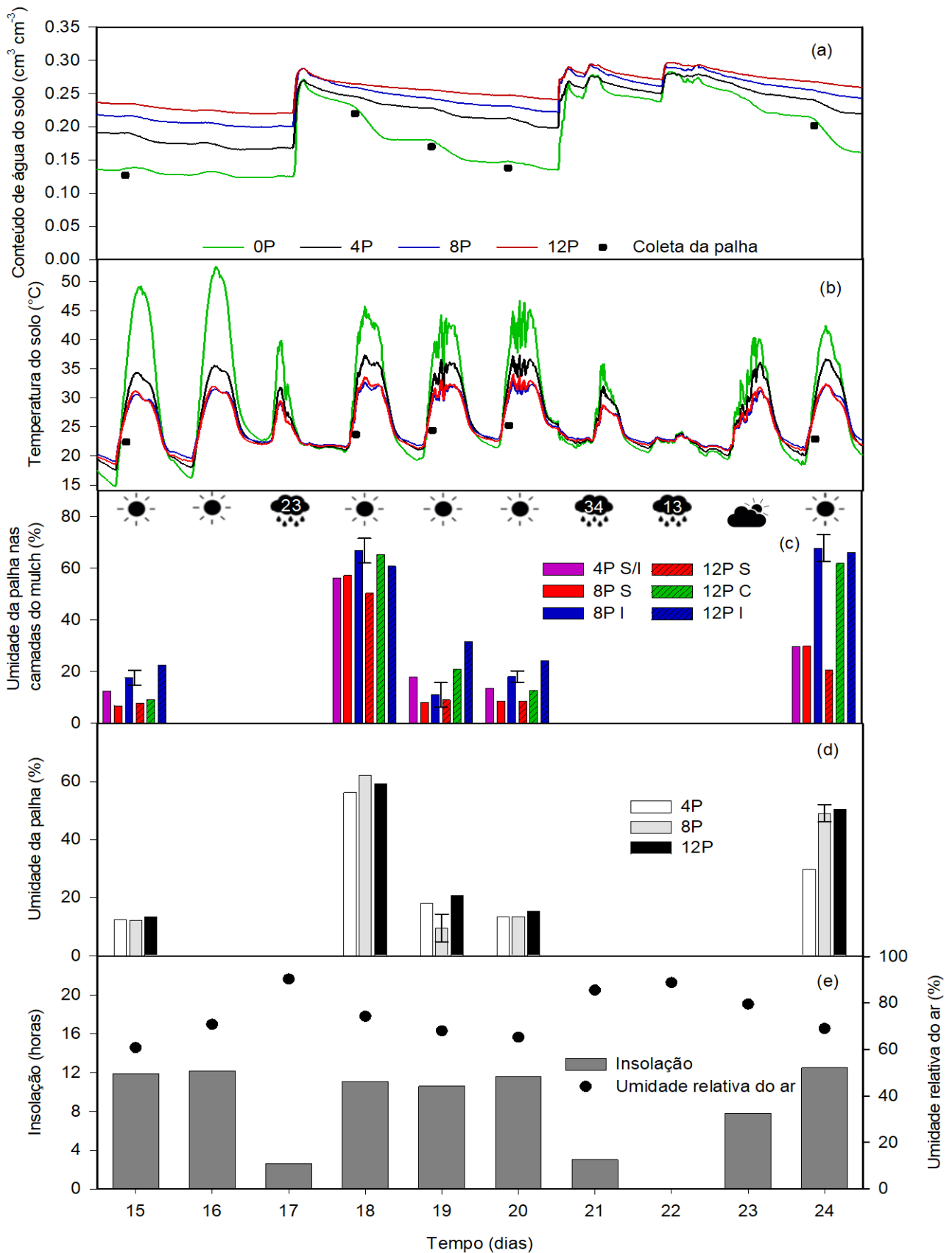
Figura 2. Umidade média do *mulch* e de suas camadas nas quatro dinâmicas avaliadas. As barras verticais representam a diferença mínima significativa entre os tratamentos.



#### 2.4.2 – 1ª dinâmica

A primeira dinâmica iniciou 15 dias após a adição da palha na superfície do solo, período em que a cana estava no início da brotação. A precipitação total da 1ª dinâmica foi de 70 mm, distribuída em 3 eventos (Figura 3c). A insolação diária foi de aproximadamente 12 horas, exceto em dias nublados ou chuvosos (Figura 3e) e a umidade relativa do ar variou de 61 a 74% em dias ensolarados e de 80 a 90% em dias nublados ou chuvosos. Nesse período, o conteúdo de água do solo nas camadas 0-5 e 5-10 cm e a temperatura da superfície do solo e das camadas 0-5 e 5-10 cm seguiram a mesma tendência entre as camadas em todas as dinâmicas. Assim, foram apresentados apenas os dados do conteúdo de água da camada 0-5 cm (Figura 3a) e a temperatura da superfície do solo (Figura 3b).

Figura 3. Conteúdo volumétrico de água do solo (a), temperatura da superfície do solo (b), umidade da palha nas camadas do mulch (c), umidade da palha (d) e insolação e umidade relativa do ar (e) na 1ª dinâmica. As barras verticais indicam diferença mínima significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey 5%.

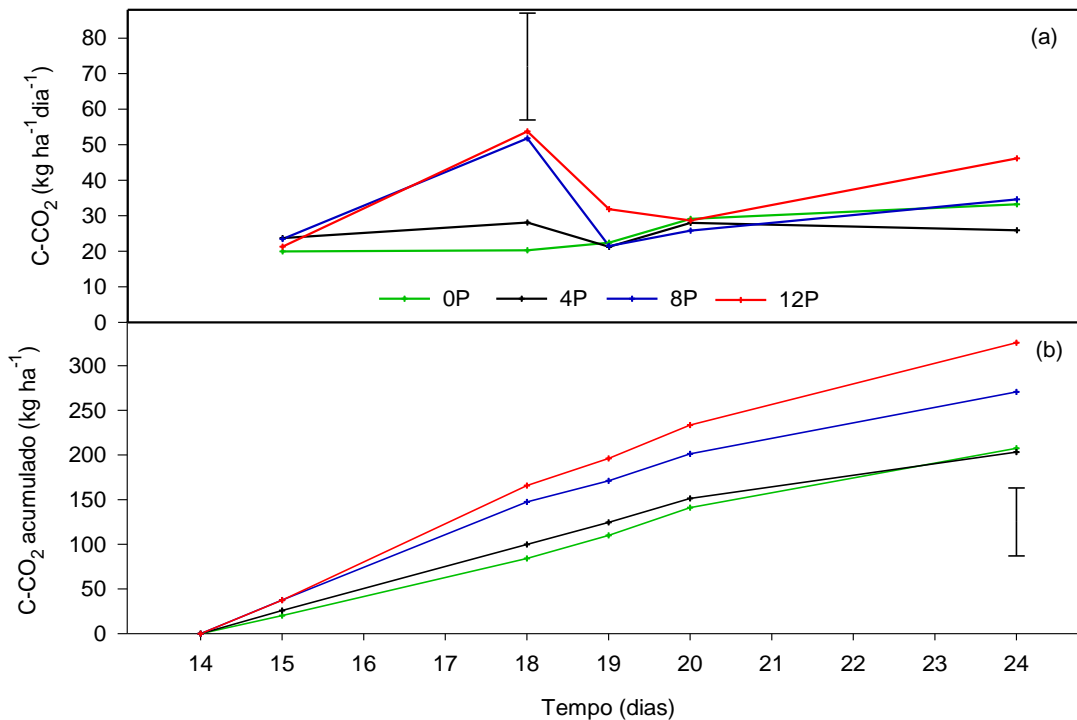


A presença de *mulch* na superfície do solo afetou significativamente, o conteúdo de água e a temperatura do solo. O efeito da presença do *mulch* é evidente em períodos sem chuva (15 a 17 e 18 a 20 dias), sendo que o conteúdo médio de água do solo no tratamento 0P ( $0,18 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) foi inferior aos demais. O *mulch* de 8P ( $0,24 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) não diferiu de 4P ( $0,22 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) e 12P ( $0,26 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ). No entanto, o solo sob o *mulch* de 12P teve maior conteúdo de água em comparação a 4P. A temperatura da superfície do solo foi menor na presença de *mulches* do que no solo descoberto, sendo: 0P ( $28,4^\circ\text{C}$ ) > 4P ( $26,2^\circ\text{C}$ ) = 8P ( $25,3^\circ\text{C}$ ) = 12P ( $25,2^\circ\text{C}$ ). Além disso, a presença do *mulch* reduziu a amplitude térmica em dias sem chuva ou nublados.

A umidade das camadas do *mulch* acompanhou a precipitação ao longo do período avaliado, permanecendo entre 7 e 68%. De maneira geral, maior umidade foi observada nas camadas inferiores do que nas camadas superiores dos *mulches* 8P e 12P, exceto para o *mulch* 8P no dia 19. Ao comparar as camadas com posição similar nos diferentes *mulches*, a umidade não diferiu entre as camadas superiores do *mulch*, exceto nos dias 19 e 24, onde  $4P > 8P \text{ S} = 12P \text{ S}$  e  $4P = 8P \text{ S} > 12P \text{ S}$ , respectivamente. Para as camadas inferiores, a umidade do tratamento 4P foi menor do que os demais na maioria das coletas. De maneira geral, a umidade dos *mulches* 4P, 8P e 12P não diferiram entre si, exceto nos dias 19 e 24, onde os tratamentos 8P e 4P, respectivamente, foram inferiores a 12P (Figura 3d).

O fluxo diário de  $\text{CO}_2$  diferiu entre os *mulches* apenas aos 18 dias (Figura 4a). Os fluxos dos *mulches* 8P e 12P foram superiores a 0P, enquanto o fluxo do *mulch* 4P não diferiu dos demais. Para a emissão acumulada de  $\text{CO}_2$  a ordem foi: 12P ( $326 \text{ kg C-CO}_2 \text{ ha}^{-1}$ ) > 4P ( $203 \text{ kg C-CO}_2 \text{ ha}^{-1}$ ) = 0P ( $207 \text{ kg C-CO}_2 \text{ ha}^{-1}$ ). O *mulch* 8P ( $271 \text{ kg C-CO}_2 \text{ ha}^{-1}$ ) não diferiu dos demais (Figura 4b).

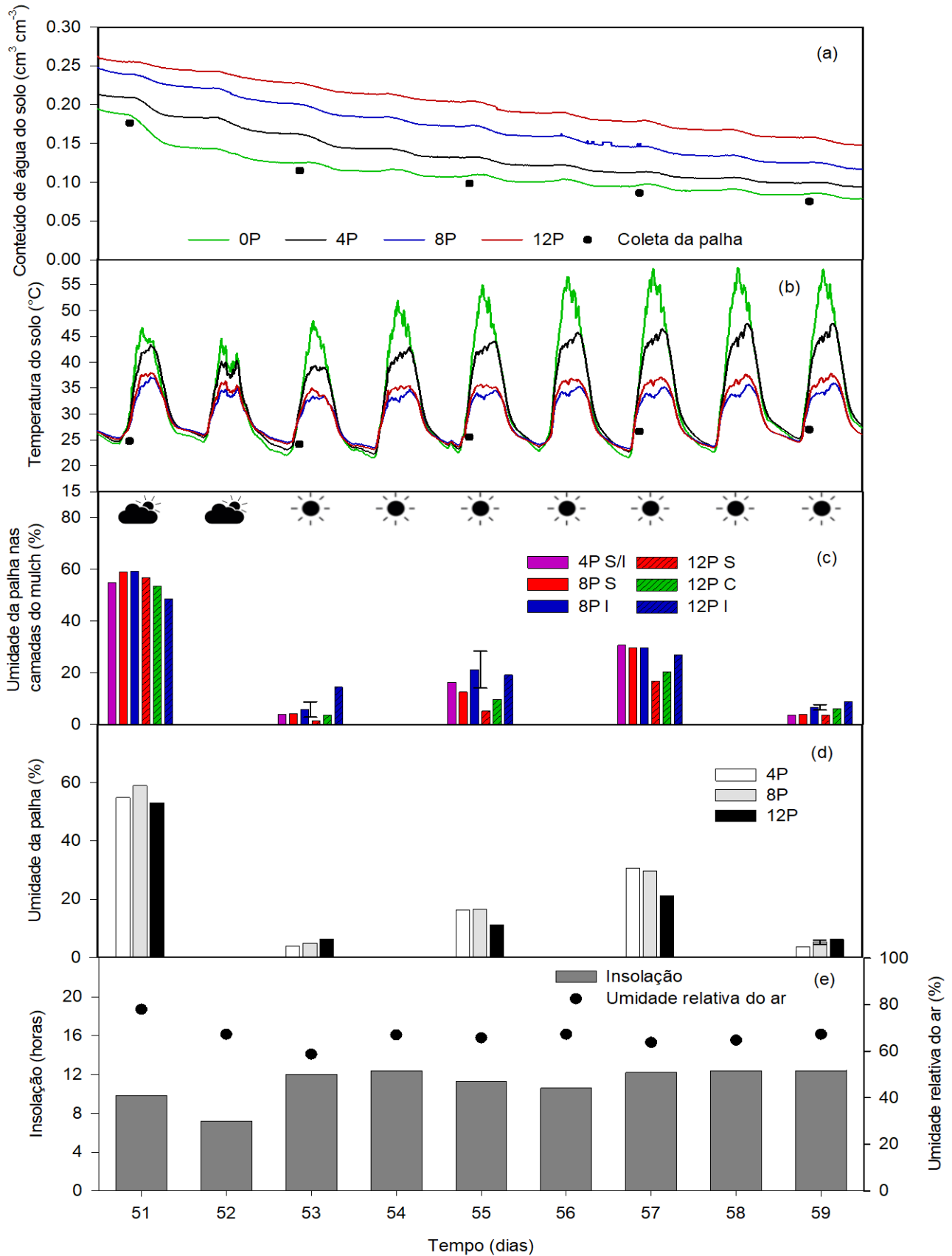
Figura 4. Emissão diária (a) e acumulada (b) de C-CO<sub>2</sub> na 1ª dinâmica. As barras verticais indicam diferença mínima significativa entre os tratamentos pelo teste LSD (P < 0.05).



### 2.4.3 – 2ª dinâmica

A 2ª dinâmica iniciou aos 51 dias após a adição da palha ao solo. Nesse período a cana estava em plena brotação e apresentava aproximadamente 50 cm de altura, porém, o dossel vegetativo ainda não cobria toda a área das entrelinhas. Durante esse período não houve precipitação, a insolação diária permaneceu entre 7 e 12 horas e a umidade relativa do ar variou entre 59 e 78% (Figura 5e). Os dias 51 e 52 apresentaram céu parcialmente nublado, coincidindo com a insolação mínima no dia 52 e umidade relativa do ar máxima no dia 51. O conteúdo de água do solo da profundidade 0-5 cm (Figura 5a) e a temperatura da superfície do solo (Figura 5b) diferiram entre os *mulches*. O solo dos *mulches* de 8P e 12P apresentou maior conteúdo de água e menor temperatura da superfície do solo quando comparados a 0P e 4P. Em média, o conteúdo de água do solo foi: 0P (0,12 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>) = 4P (0,15 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>) < 8P (0,18 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>) = 12P (0,21 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>) (Figura 5a). Já a temperatura da superfície do solo foi: 0P (33,3°C) = 4P (32,1°C) > 12P (29,6°C) = 8P (29,2°C) (Figura 5b).

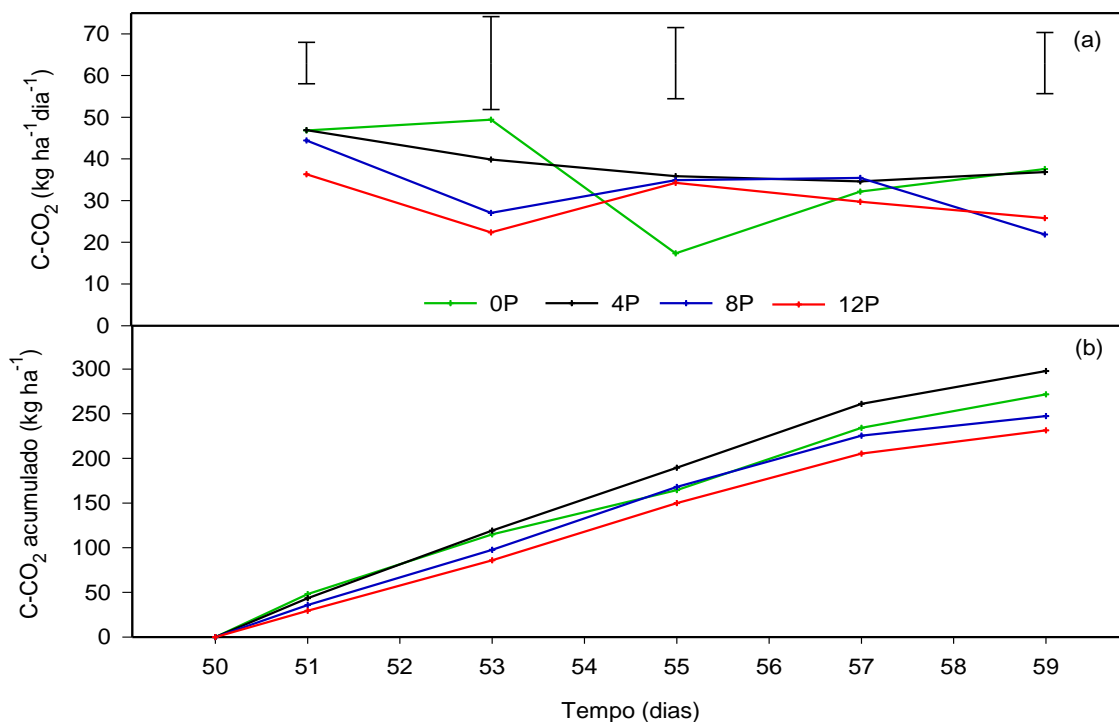
Figura 5. Conteúdo volumétrico de água do solo (a), temperatura da superfície do solo (b), umidade da palha nas camadas do mulch (c) e umidade da palha (d) e insolação e umidade relativa do ar (e) na 2ª dinâmica. As barras verticais indicam diferença mínima significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey 5%.



A elevada umidade das camadas do *mulch* encontrada aos 51 dias (48,5 a 59,1%) é decorrente de precipitações de 14, 13 e 3 mm ocorridas aos 44, 45 e 50 dias (Figura 5c). A umidade do *mulch* e das camadas do *mulch* decresceu rapidamente já na segunda coleta realizada aos 53 dias e variou entre 1,5 e 14,5%. Ao comparar a posição da palha no *mulch* do tratamento 12P, a umidade foi: 12P I > 12P C > 12P S aos 59 dias e de 12P I > 12P C = 12P S aos 53 dias. Na posição similar da palha em diferentes *mulches*, a umidade do tratamento 12P I foi superior aos demais apenas aos 53 e 59 dias. Já as camadas superiores não diferiram entre si em nenhuma coleta realizada. De maneira geral, a umidade do *mulch* não diferiu entre os *mulches*, exceto aos 59 dias, onde: 12P = 8P > 4P (Figura 5d).

O fluxo diário de CO<sub>2</sub> (kg ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> de C-CO<sub>2</sub>) variou entre os *mulches* na 2ª dinâmica, sendo 12P = 8P em todas as coletas e 4P = 8P > 0P aos 55 dias (Figura 6a). A emissão acumulada não diferiu entre os *mulches* e variou de 231 a 298 kg C-CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> nos tratamentos 12P e 4P, respectivamente (Figura 6b).

Figura 6. Emissão diária (a) e acumulada (b) de C-CO<sub>2</sub> na 2ª dinâmica. As barras verticais indicam diferença mínima significativa entre os tratamentos pelo teste LSD (P < 0.05).





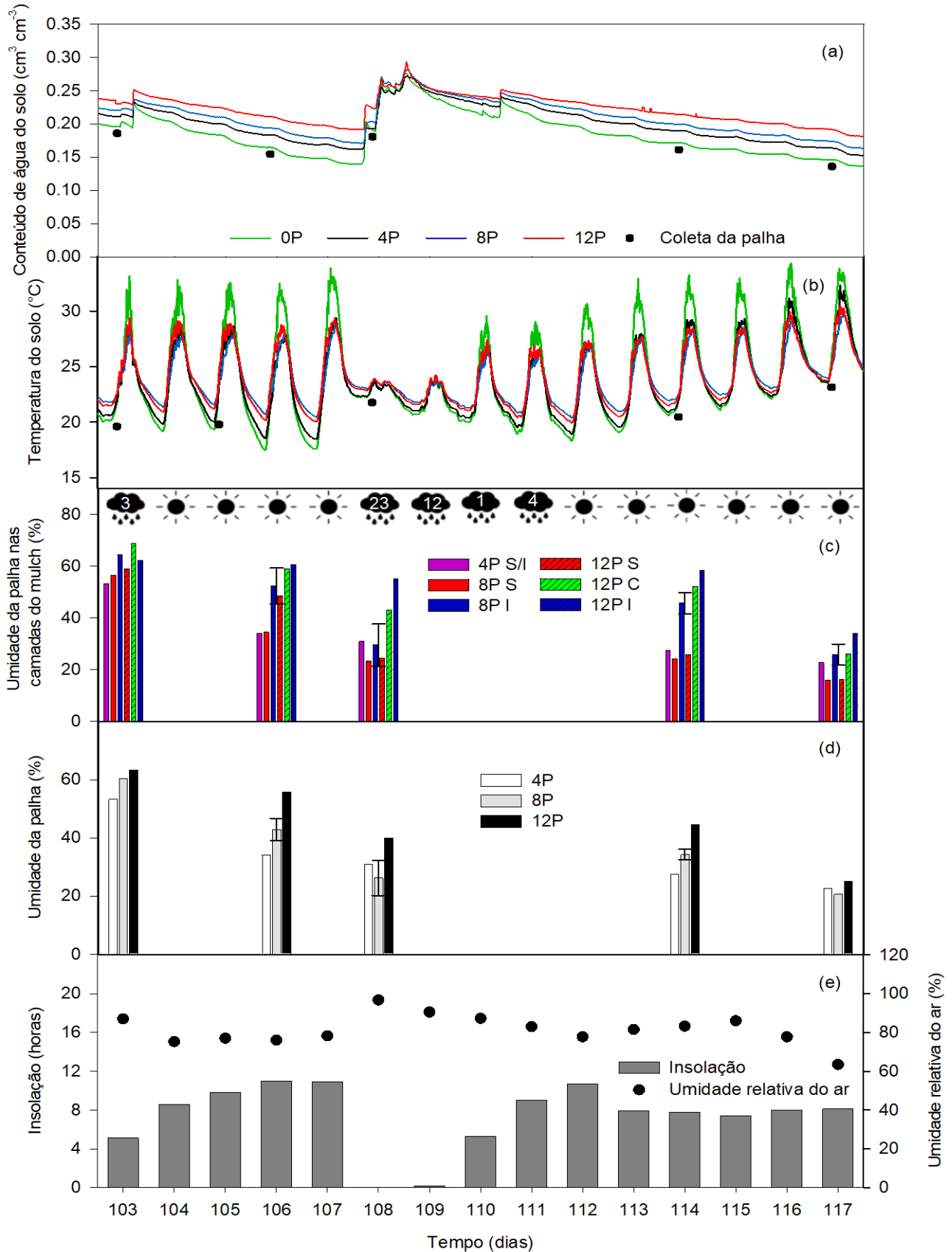
#### 2.4.4 – 3ª dinâmica

A 3ª dinâmica teve início aos 103 dias após a instalação do experimento, quando o dossel vegetativo da cana-de-açúcar cobria praticamente toda a superfície do solo. Nesse período, a precipitação total foi de 43 mm, distribuída em 5 eventos (Figura 7c). A menor insolação e maior umidade relativa do ar coincidiram com os dias de maior precipitação, sendo a insolação de 0 e 0,2 horas e a umidade relativa do ar de 97 e 91% aos 108 e 109 dias, respectivamente (Figura 7e).

O conteúdo médio de água do solo na profundidade 0-5 cm diferiu apenas entre o solo sem palha e o *mulch* 12P, sendo de  $0,19 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  para 0P,  $0,21 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  para 4P e 8P e  $0,23 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  para 12P (Figura 7a). Embora a temperatura média da superfície do solo não tenha sido afetada pela presença do *mulch*, a amplitude térmica foi menor na presença de *mulches* mais espessos (Figura 7b). A presença do *mulch* não alterou a temperatura média diária da superfície do solo, que variou de  $23,1^\circ\text{C}$  no 4P a  $23,7^\circ\text{C}$  no 12P. Assim, a perda de água foi similar entre os tratamentos e a temperatura diária foi maior após a última precipitação.

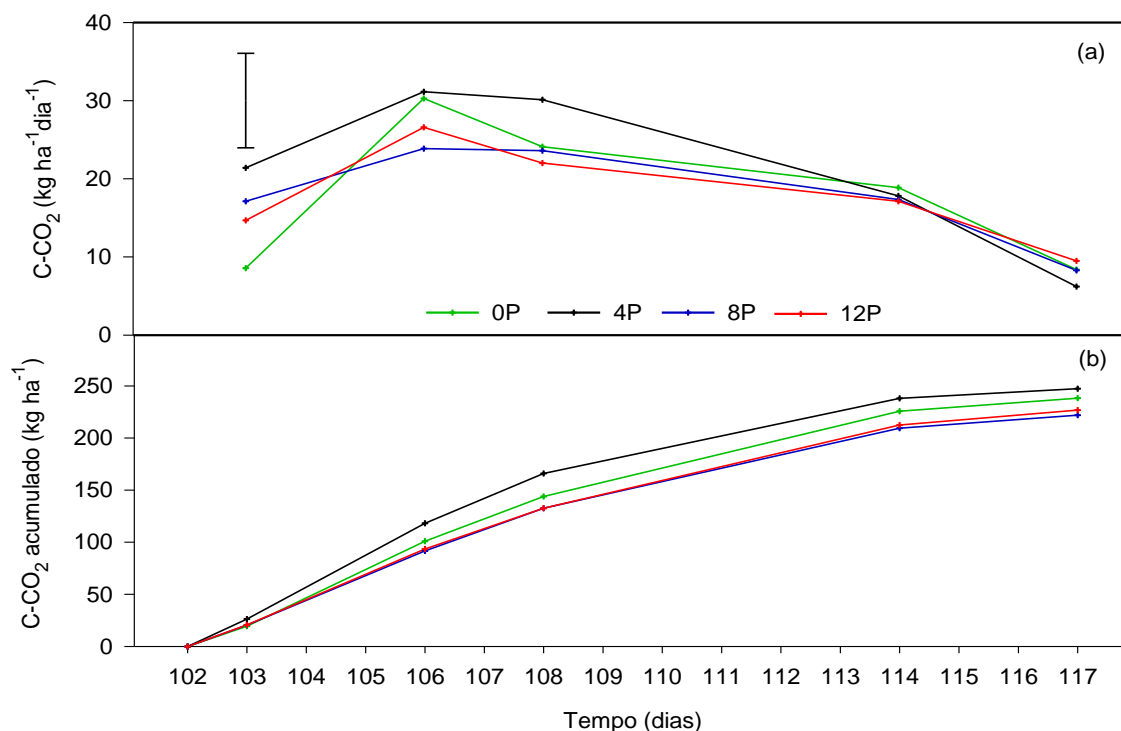
A umidade das camadas de palha variou entre 16 e 69% ao longo da 3ª dinâmica e diferiu de acordo com a localização no *mulch*. Ao comparar a posição da camada no *mulch*, a umidade foi: 8P I > 8P S e 12P I = 12P C > 12P S aos 114 e 117 dias, respectivamente. Para a posição similar em diferentes *mulches*, a umidade foi: 12P I > 4P S/I, exceto aos 103 dias. Ainda, a umidade da camada 12P I foi maior que 8P I aos 108, 114 e 117 dias, enquanto a camada 8P I foi maior que 4P S/I aos 106 e 114 dias. A umidade das camadas superiores não diferiu entre os tratamentos, exceto aos 106 dias onde  $12P > 8P = 4P$ . Considerando os diferentes *mulches*, a umidade foi:  $12P > 8P$  aos 108 dias e  $12P > 8P > 4P$  aos 106 e 114 dias (Figura 7d).

Figura 7. Conteúdo volumétrico de água do solo (a), temperatura da superfície do solo (b), umidade da palha nas camadas do mulch (c), umidade da palha (d) e insolação e umidade relativa do ar (e) na 3ª dinâmica. As barras verticais indicam diferença mínima significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey 5%.



O fluxo diário de CO<sub>2</sub> diferiu entre os *mulches* apenas aos 102 dias, onde os fluxos do *mulch* 4P (21 kg ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> de C-CO<sub>2</sub>) foi maior que o do 0P (9 kg ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> de C-CO<sub>2</sub>) (Figura 8a). Para a emissão acumulada de CO<sub>2</sub>, não houve diferença entre os *mulches* e os valores variaram de 222 (8P) e 247 kg C-CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> (4P) (Figura 8b).

Figura 8. Emissão diária (a) e acumulada (b) de C-CO<sub>2</sub> na 3ª dinâmica. As barras verticais indicam diferença mínima significativa entre os tratamentos pelo teste LSD (P < 0.05).



#### 2.4.5 – 4ª dinâmica

A 4ª dinâmica teve início aos 238 dias quando o dossel da cana cobria totalmente a superfície do solo. Não houve precipitação durante o período avaliado e o último registro de precipitação foi de 19 mm, 3 dias antes do início da quarta dinâmica (Figura 9c). Mesmo não havendo precipitação durante a 4ª dinâmica, a insolação diária permaneceu entre 5,0 e 9,3 horas e a umidade relativa do ar permaneceu acima de 74% em função da estação do ano (Figura 9e).

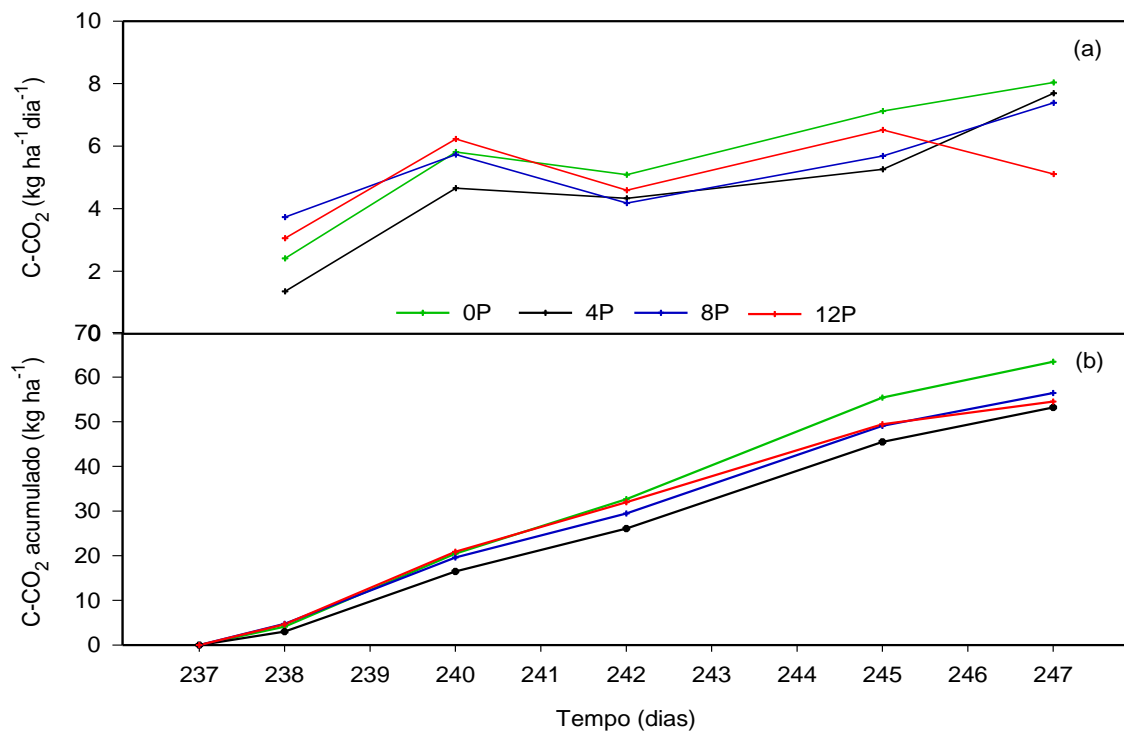


O conteúdo de água do solo na profundidade 0-5 cm e a temperatura da superfície do solo não diferiram entre os tratamentos na 4ª dinâmica (Figuras 9a e 9b). O conteúdo médio de água do solo variou de  $0,21 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  no 0P a  $0,23 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  no 12P (Figura 9a). Já a temperatura média da superfície do solo variou de  $11,0^\circ\text{C}$  no 0P a  $11,6^\circ\text{C}$  no 8P (Figura 9b). A máxima amplitude térmica ocorreu aos 245 dias e foi de apenas  $6,4^\circ\text{C}$  para o tratamento 0P.

A umidade das camadas do *mulch* variou entre 53 e 77% ao longo da 4ª dinâmica, exceto aos 245 dias, onde a umidade das camadas superiores foi em média de 34%. Ao comparar a posição da camada no *mulch*, a umidade não diferiu entre as camadas, exceto para 12P aos 245 dias, onde:  $12P \text{ I} = 12P \text{ C} > 12P \text{ S}$ . A umidade não diferiu entre a posição similar dos diferentes *mulches*, exceto aos 245 dias, onde:  $12P \text{ I} = 8P \text{ I} > 4P \text{ S/I}$ . Não houve diferença na umidade entre os *mulches*, exceto aos 245 dias onde o tratamento 4P foi inferior aos demais (Figura 9d).

O fluxo diário de  $\text{CO}_2$  não diferiu entre os *mulches*, variando de 1 (4P) a  $8 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$  de C- $\text{CO}_2$  (0P) (Figura 10a). Para a emissão acumulada de  $\text{CO}_2$ , não houve diferença entre os *mulches* e os valores variaram de 53 (4P) a  $63 \text{ kg C-CO}_2 \text{ ha}^{-1}$  (0P) (Figura 10b).

Figura 10. Emissão diária (a) e acumulada (b) de C-CO<sub>2</sub> na 4ª dinâmica. As barras verticais indicam diferença mínima significativa entre os tratamentos pelo teste LSD ( $P < 0.05$ ).



## 2.5 - DISCUSSÃO

### 2.5.1 – Conteúdo de água do solo

De maneira geral, os *mulches* 8P e 12P mantiveram o conteúdo médio de água do solo maior em relação aos demais tratamentos, o que corrobora com os resultados encontrados na mesma cultura por Santos (2017). A alta cobertura do solo proporcionado por estes *mulches* reduz a incidência direta da radiação solar e do vento na superfície do solo, o que reduz as perdas de água por evaporação. Embora esses *mulches* possam ter causado a redução da infiltração em períodos de pouca chuva, as perdas de água são reduzidas ao longo do tempo pela menor taxa de evaporação decorrente da barreira física promovida pelo *mulch* (ALLIAUME et al., 2017). Resultados semelhantes foram encontrados por Pereira et al. (2015), que concluíram que *mulches* de 12 Mg ha<sup>-1</sup> de palha de milho proporcionaram o melhor aproveitamento da água na cultura do feijão por diminuir a evaporação e a temperatura do solo, bem como, por manter a umidade elevada em todo o perfil do solo. A manutenção da umidade do solo sob diferentes *mulches* e

precipitações também foi avaliada em condições de laboratório por Ji e Unger (2001). Neste estudo, os autores encontraram maiores acúmulos de água no solo sob os *mulches* mais espessos (2 e 4 Mg ha<sup>-1</sup> de palha de trigo), com destaque para as precipitações de 5 mm, onde o conteúdo de água do solo dobrou e triplicou em relação ao solo descoberto, para 2 e 4 Mg ha<sup>-1</sup> de palha, respectivamente. Maiores conteúdos de água do solo sob *mulch* também foram encontrados por Verburg et al. (2012) em precipitações menores e mais frequentes, se comparadas a altas precipitações isoladas e seguidas de grande demanda evaporativa.

Embora o conteúdo inicial de água do solo seja distinto, as primeiras três dinâmicas apresentaram condições favoráveis a perda de água do solo e do *mulch*. Dentre estas condições pode-se citar: o limitado sombreamento do dossel vegetativo; a crescente demanda hídrica da cultura; as altas temperaturas e a insolação registrada no período. Estes fatores culminam com um alto potencial de evaporação. Para Mahdavi et al. (2017), a evaporação do solo sob *mulch* de 4 Mg MS ha<sup>-1</sup> de palha de grama reduziu em até 40% em comparação com o solo descoberto. Dessa forma, o impacto do *mulch* na redução das perdas de água se intensifica nos períodos que antecedem o fechamento do dossel vegetativo e pode acarretar em ganhos de produtividade, conforme associação realizada por Tavares et al. (2010).

Anjos et al. (2017) avaliaram a umidade do solo sob *mulches* de 0 a 18,4 Mg ha<sup>-1</sup> de palha de cana-de-açúcar durante o perfilhamento, e concluíram que os *mulches* mais espessos retardaram o alcance do armazenamento crítico de água do solo de forma crescente, em até 11 dias, quando comparados ao solo descoberto. Isto demonstra a importância do *mulch*, principalmente durante o período em que a demanda hídrica da cultura é maior. Após esse período, o sombreamento do dossel vegetativo e as condições meteorológicas, das quais se destacam a ausência de precipitação e as baixas temperaturas, podem ter contribuído para a redução da evaporação e a limitação do efeito do *mulch* na manutenção do conteúdo de água do solo.

O conteúdo médio de água do solo aumenta conforme a profundidade em função da perda de água por evaporação ocorrer inicialmente na superfície do solo. Iqbal et al. (2015), ao avaliarem o efeito do *mulch* na dinâmica da água em condições de laboratório, constataram que o potencial matricial máximo a 3 cm é superior ao encontrado a 15 cm de profundidade. Os autores atribuíram este resultado a evaporação da superfície do solo. Em outro estudo, avaliando a influência de *mulches* de 15 Mg ha<sup>-1</sup> de palha de cana-de-açúcar na perda de água do solo, Peres et al. (2010) constataram que o conteúdo médio de água aumentou conforme a profundidade, bem como, que o *mulch* reduziu as perdas

de água em aproximadamente 50% na camada 0-20 cm, diferentemente da camada 20-40 cm, onde as perdas de água foram reduzidas em apenas 10%. Assim, fica evidenciado que a barreira física promovida pelo *mulch* tem maior impacto sobre o conteúdo de água do solo na camada 0-5 cm, se comparada a 5-10 cm.

### 2.5.2 – Temperatura do solo

A temperatura média do solo seguiu a mesma tendência verificada no conteúdo médio de água do solo e foi menor nos *mulches* 8P e 12P. Essa associação também foi encontrada em estudos realizados por Novak (2010) e Santos (2017). Novak (2010) verificou que a temperatura do solo dos diferentes *mulches* está associada ao respectivo conteúdo de água. Dessa forma, o alto calor específico da água e a barreira física do *mulch* pode retardar a mudança de temperatura do solo. Assim, a barreira física promovida pelos *mulches* mais espessos aumenta o isolamento térmico e reduz o aquecimento do solo durante o dia e a dissipação do calor do solo para a atmosfera durante a noite (MIRANDA et al., 2004; LIU et al., 2014; ZWIRTES et al., 2017).

Mahdavi et al. (2017) avaliaram o efeito de um *mulch* de 4 Mg MS ha<sup>-1</sup> de palha de grama na temperatura de um solo arenoso e também encontraram redução significativa na temperatura do solo com *mulch*, com destaque para o período entre o nascer e o pôr do sol, corroborando com o resultado encontrado no presente estudo. Os autores atribuíram o resultado a redução da absorção de energia solar do tratamento contendo o *mulch*, na comparação com o solo descoberto. Ainda no mesmo estudo, os autores encontraram decréscimo da temperatura com o aumento da profundidade. Resultado semelhante foi encontrado por Murungu et al. (2011), que avaliaram o efeito de diferentes *mulches* no desenvolvimento da cultura do milho irrigado e constataram correlação significativa e inversa entre a quantidade de palha e a temperatura do solo a 5 cm de profundidade. Os autores também observaram que as temperaturas decresceram a 10 cm de profundidade e que nessa profundidade, as diferenças foram menos aparentes entre os *mulches*. Estes resultados estão de acordo com os encontrados no presente estudo e evidencia a importância do *mulch* na redução da temperatura da camada superficial do solo.

O comportamento da temperatura do solo entre as dinâmicas também foi conduzido pelo conteúdo de água do solo durante o crescimento vegetativo da cultura. Embora a precipitação acumulada da 1ª dinâmica tenha sido expressiva, o limitado sombreamento do dossel vegetativo da cana-de-açúcar e as altas temperaturas



registradas no período podem ter causado o aumento da temperatura no solo descoberto. Isso indica que o efeito do *mulch* sobre as temperaturas em diferentes profundidades do solo depende das condições da cultura e da interceptação da radiação solar (ZWIRTES et al., 2017). Já a ausência de precipitações registradas na 2ª dinâmica, aliada as altas temperaturas e a intensa radiação solar incidente nos *mulches* podem ter contribuído com o aumento da temperatura da superfície do solo do *mulch* 4P e do solo descoberto. Ainda, a espessura do *mulch* não alterou a temperatura do solo após esse período. Diversos autores também atribuíram a ausência de efeito do *mulch* na temperatura do solo ao expressivo sombreamento do dossel vegetativo da cultura em virtude da redução da radiação solar que incide diretamente na superfície do solo (BRADY; WEIL, 2013; AWE et al., 2015).

### 2.5.3 – Conteúdo de água do *mulch*

O conteúdo médio de água é maior conforme o aumento da espessura do *mulch*. Assim, *mulches* mais espessos são favorecidos pela barreira física promovida pelas camadas superiores do *mulch*, na qual, as camadas inferiores permanecem protegidas contra as perdas de água por evaporação e pela ação do vento. Outro fator que pode promover a manutenção do conteúdo de água de *mulches* mais espessos é a transferência de maiores quantidades de água do solo para o *mulch*, sem que essa água seja perdida para a atmosfera na forma de vapor. Dessa forma, o conteúdo de água de *mulches* mais espessos e de seu respectivo solo é superior.

Já entre as dinâmicas, o conteúdo médio de água dos *mulches* segue a mesma tendência encontrada nas camadas do *mulch*, sendo em média, 21% superior na 4ª dinâmica, período de intenso sombreamento do dossel vegetativo da cana-de-açúcar, alto conteúdo de água do solo e baixas temperaturas, diferentemente da 2ª dinâmica, onde as altas temperaturas favoreceram a evaporação de todos os *mulches*. De acordo com estudo conduzido em laboratório por Iqbal et al. (2015), o conteúdo de água do *mulch* composto por milho + lablab foi de 2 a 3 vezes maior quando submetido a precipitações leves e frequentes, se comparada a precipitações pouco frequentes e infrequentes, respectivamente. A interceptação de precipitações de baixo volume por *mulches* espessos também podem causar a evaporação diretamente do *mulch* sem que a água atinja o solo (SOMMER et al., 2012; ALLIAUME et al., 2017).

A manutenção da umidade do *mulch* é um importante fator que acelera a atividade microbiana e possibilita a decomposição. Schimel et al. (1999), avaliaram a atividade

microbiana da serapilheira de uma floresta boreal e concluíram que a atividade microbiana é estreitamente relacionada ao conteúdo de água da serapilheira, sendo que o conteúdo de água de  $0,5\text{g H}_2\text{O g}^{-1}$  de serapilheira foi considerado o patamar mínimo no qual a atividade microbiana pode ser mensurada. Porém, no presente estudo, o conteúdo médio de água encontrado nos *mulches* foi superior a 50% apenas na 4ª dinâmica, bem como em algumas avaliações pontuais nas demais dinâmicas. Assim, em função da decomposição encontrada durante todo o estudo (dados não mostrados), o patamar mínimo do conteúdo de água do *mulch* estabelecido por Schimel et al. (1999) pode estar superestimado para as condições ambientais encontrados no presente estudo.

#### 2.5.4 – Conteúdo de água das camadas do mulch

O conteúdo de água do *mulch* e de suas camadas aumenta de acordo com a intensidade e a frequência das precipitações e, na média da dinâmica, se correlaciona inversamente com a temperatura média registrada no período. Na 3ª e 4ª dinâmicas, o aumento do conteúdo médio de água ocorreu devido ao sombreamento do dossel vegetativo da cana-de-açúcar e pelo menor potencial de evaporação causado pelas baixas temperaturas registradas no período.

De maneira geral, o conteúdo de água das camadas dos *mulches* 8P e 12P aumenta conforme se aproximam da superfície do solo, com exceção do *mulch* 8P na 2ª e 4ª dinâmicas, onde a ausência de diferenças no conteúdo médio de água entre as camadas possivelmente tenham ocorrido em função da ausência de precipitações nos períodos. Na 2ª dinâmica, essa igualdade pode ter ocorrido em função do baixo potencial de transferência de água do solo para a camada inferior do *mulch* e da evaporação causada pelas altas temperaturas registradas no período. Já na 4ª dinâmica, o alto sombreamento do dossel vegetativo da cana-de-açúcar pode ter reduzido as perdas de água por evaporação, que aliada a alta umidade relativa do ar no interior do canal pode ter limitado as perdas de água da camada superior do *mulch*. Para o *mulch* 12P, o conteúdo de água da camada 12P I tendeu a superar a camada 12P C em períodos secos, quentes e de baixo sombreamento do dossel vegetativo da cana-de-açúcar. Nesses casos, a evaporação da água superou a camada 12P S e provocou perdas de água na camada 12P C. Dessa forma, a transferência da água proveniente do solo não evitou a perda de água da camada 12P C. Portanto, de acordo com o conteúdo de água mínimo do *mulch* para a mensuração da atividade microbiana descrito por Schimel et al.

(1999), as camadas superiores estão menos propensas a decomposição quando comparadas as camadas inferiores.

De acordo com Zwirtes et al. (2017), a penetração de aquecimento do solo sob *mulch* aumenta ao longo do dia. Logo, esse gradiente de aquecimento também pode ocorrer no interior do *mulch* e contribuir com o gradiente do conteúdo de água encontrado nas diferentes camadas do mesmo *mulch* e de camadas de *mulches* diferentes, de acordo com a quantidade de palha acima da camada avaliada. O conteúdo de água das camadas inferiores dos diferentes *mulches* aumenta conforme a espessura do *mulch*, provavelmente em função da barreira física promovida pelas camadas superiores e que dificulta a evaporação das camadas inferiores do *mulch*. No entanto, o alto conteúdo de água do solo da 1ª e 4ª dinâmicas promoveu a transferência de água para as camadas inferiores dos *mulches* e igualou o conteúdo de água das camadas 12P I e 8P I.

Iqbal et al. (2013), avaliaram o potencial de retenção de água de *mulches* de 11 espécies em diferentes estádios de decomposição através da imersão e concluíram que o potencial de retenção de água do *mulch* aumenta conforme o avanço da decomposição. Assim, a menor quantidade de palha remanescente nas camadas inferiores do *mulch* (dados não mostrados) pode estar associada ao maior conteúdo de água encontrado nessas camadas. Já a indiferença do conteúdo de água encontrado nas camadas superiores do *mulch* pode estar associada a incidência direta da radiação solar, onde essas camadas recebem a mesma intensidade da radiação solar, independente da espessura do *mulch*. Porém, na 1ª dinâmica, o alto conteúdo de água do solo, aliado ao contato com a camada 4P S/I, reduziu a perda de água do *mulch* 4P S/I, diferentemente da camada 12P S que perdeu água por evaporação devido ao irrelevante sombreamento da cana-de-açúcar no período e da distância para com o solo.

### 2.5.5 – Emissão de CO<sub>2</sub>

De maneira geral, a emissão acumulada de CO<sub>2</sub> não foi influenciada pela espessura do *mulch*, sendo que o crescente sombreamento da cana-de-açúcar pode ter atenuado essa diferença ao longo do estudo em decorrência da aproximação das condições climáticas do solo e do *mulch* dos diferentes tratamentos. Esse resultado difere de Vasconcelos et al. (2018), que avaliou a emissão de CO<sub>2</sub> em diferentes *mulches* de cana-de-açúcar e encontrou maiores emissões acumuladas de CO<sub>2</sub> apenas sob *mulch* de 12 Mg ha<sup>-1</sup> em comparação ao solo descoberto.

Ainda, o resultado de Vasconcelos et al. (2018), se assemelha ao encontrado na 1ª dinâmica, onde a emissão acumulada de CO<sub>2</sub> foi superior no *mulch* 12P quando comparada aos *mulches* 0P e 4P. Embora a temperatura dos *mulches* 4P e 12P não tenha diferido entre si, a emissão de CO<sub>2</sub> pode responder ao incremento da disponibilidade de C apenas em condições próximas do ideal. Nesse período, destaca-se a emissão de CO<sub>2</sub> dos *mulches* 8P e 12P ocorrida no dia 18, sob alto conteúdo de água dos *mulches* e dos solos, indicando a dependência do conteúdo de água do *mulch* e evidenciando a correlação positiva com a umidade do solo (VARGAS et al., 2014).

Estudos divergem sobre a correlação entre a emissão de CO<sub>2</sub> e as variáveis climáticas (umidade e a temperatura do solo). De acordo com Vargas et al. (2014), a emissão de CO<sub>2</sub> em laboratório aumenta na presença de *mulch* e também, de forma linear, em decorrência do aumento da umidade do solo (25, 50, 75 e 100%). Para Campos et al. (2011), o impacto de sistemas de preparo do solo e das culturas na emissão de CO<sub>2</sub> não foi afetado pela umidade do solo e apresentou baixa correlação positiva com a temperatura do ar. Diferentemente de Yoon et al. (2014), que avaliaram o efeito da umidade do solo na emissão de CO<sub>2</sub> da serapilheira e constataram o aumento da emissão em função da elevação da temperatura e da redução da umidade do solo. Resultados semelhantes foram obtidos por Moitinho et al. (2013), que avaliaram como o manejo adotado no cultivo da cana-de-açúcar afeta a emissão de CO<sub>2</sub>. Nesse estudo, os autores encontraram redução das emissões acumuladas de CO<sub>2</sub> na presença do *mulch* e atribuíram esse resultado ao aumento da umidade do solo de 36 para 44% com a presença do *mulch*, bem como, pela redução da variação térmica causada pela presença do *mulch*.

A recalitrância da palha de cana-de-açúcar remanescente aos 238 dias após o início da decomposição (DIETRICH et al., 2017), aliada as menores temperaturas diárias e o estágio fisiológico da cana-de-açúcar no presente estudo causaram a redução média de 77% da emissão acumulada de CO<sub>2</sub> na 4ª dinâmica. Flessa et al. (2002), avaliaram o efeito do *mulch* na emissão de CO<sub>2</sub> de fluxo contínuo em estufa arejada ao longo de 7 semanas sob irrigação diária de 1,8 mm e concluíram que 80% da variabilidade diurna da emissão de CO<sub>2</sub> pode ser explicada por mudanças na temperatura em função do aumento da demanda respiratória por O<sub>2</sub>. Assim, a elevada amplitude térmica diária do solo e a disparidade registrada entre os tratamentos podem ter subestimado as emissões de CO<sub>2</sub> dos *mulches* 0P e 4P nas primeiras três dinâmicas em função da temperatura do solo no horário da coleta (9h).

## 2.6 – CONCLUSÕES

a) *Mulches* mais espessos mantêm o conteúdo médio de água do solo maior e a temperatura média do solo menor, na comparação com solo descoberto ou *mulches* pouco espessos. Também, o conteúdo médio de água do solo aumenta e a temperatura média do solo diminui com o aumento da profundidade.

b) O conteúdo médio de água das camadas do *mulch* aumenta conforme a proximidade do solo. Diferentemente das camadas superiores, onde o conteúdo de água não difere entre os diferentes *mulches*, as camadas inferiores do *mulches* que estão sob maiores quantidades de palha apresentam maior conteúdo de água.

c) A emissão acumulada de CO<sub>2</sub> não difere entre os diferentes *mulches*, e é menor no período de baixas temperaturas e intenso sombreamento provocado pelo dossel vegetativo da cana-de-açúcar.

## 2.7 – REFERÊNCIAS

- AWE, G. O.; REICHERT, J. M.; 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.
- ALLIAUME, F. et al. Modelling soil tillage and mulching effects on soil water dynamics in raised-bed vegetable rotations. **Europ. J. Agronomy**. v.82, p. 268-281, 2017.
- ANJOS, J. C. R. dos. et al. Water storage in a Plinthaqualf cultivated with sugarcane under straw levels. **Pesqui. Agropecu. Bras**. v.52, p. 464-473, 2017.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3. Ed. Porto Alegre-RS; Bookman, 2013. 704p.
- CAMPOS, B. H. C. et al. Long-term C-CO<sub>2</sub> emissions and carbon crop residue mineralization in an oxisol under different tillage and crop rotation systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.35, p. 819-832, 2011.
- DIETRICH, G. et al. Sugarcane mulch C and N dynamics during decomposition under different rates of trash removal. **Agriculture, Ecosystems and Environment**. v.243, p. 123-131, 2017.
- EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2013. v.1, 353 p.
- FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**. v.35, p. 1039-1042, 2011.
- FLESSA, H.; POTTHOFF, M.; LOFTFIELD, N. Laboratory estimates of CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O emissions following surface application of grass mulch: importance of indigenous microflora of mulch. **Soil Biology and Biochemistry**. v.34, p. 875-879, 2002.
- IQBAL, A. et al. Tissue density determines the water storage characteristics of crop residues. **Plant Soil**. v.367, p. 285-299, 2013.
- IQBAL, A. et al. Rain regime and soil type affect the C and N dynamics in soil columns that are covered with mixed-species mulches. **Plant Soil**. v.393, p. 319-334, 2015.
- JI, S.; UNGER, P. W. Soil water accumulation under different precipitation, potential evaporation, and straw mulch conditions. **Soil Science Society of America Journal**. v.65, p. 442-448, 2001.
- KADER, M. A. et al. Recent advances in mulching materials and methods for modifying soil environment. **Soil and Tillage Research**.-v.168, p. 155-166, 2017.
- LEAL, M. R. L. V. et al. Sugarcane straw availability, quality, recovery and energy use: A literature review. **Biomass and Bioenergy**. v.53, p. 11-19, 2013.

- LIN, D. M.; DORAN, J. W. Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and non-tilled soils. **Soil Science Society of America Journal**. v.48, p. 1267-1272, 1984.
- LIU, Y. et al. Straw mulching reduces the harmful effects of extreme hydrological and temperature conditions in citrus orchards. **PLOS ONE**. v.9, e87094, 2014.
- MAHDAVI, S. M. et al. Coupled heat and moisture transfer and evaporation in mulched soils. **Catena**, v.151. p. 34-48, 2017.
- MARIN, F.R. et al. Simulating long-term effects of trash management on sugarcane yield for brazilian cropping systems. **Sugar Tech**. v.16, p. 164-173, 2014.
- MIRANDA, F. R. de. et al. Efeito da cobertura morta com a fibra da casca de coco sobre a temperatura do solo. **Ciência Agrônômica**. v.35, p. 335-339, 2004.
- MOITINHO, M. R. et al. Efeito do preparo do solo e resíduo da colheita de cana-de-açúcar sobre a emissão de CO<sub>2</sub>. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.37, p.1720-1728, 2013.
- MURUNGU, F. S. et al. Efeitos cobertura morta na umidade do solo e nitrogênio, crescimento de ervas daninhas e produtividade do milho irrigado em um clima temperado-quentes da África do Sul. **Soil and Tillage Research**. v.112, p.58-65, 2011.
- NOVAK, M. D. Dynamics of the near-surface evaporation zone and corresponding effects on the surface energy balance of a drying bare soil. **Agric. For. Meteorol**. v.150, p.1358-1365, 2010.
- PEREIRA, F. F. S. et al. Retenção de água em níveis de cobertura morta no feijoeiro irrigado em sistema de plantio direto. **Irriga**. v.20, p.557-569, 2015.
- PERES, J. G.; SOUZA, C. F.; LAVORENTI, N. A. Evaluation of the effects of sugarcane straw coverage in moisture and water loss of soil. **Engenharia Agrícola**. v.30, p.875-886, 2010.
- SANTOS, A. K. B. dos. **Dinâmica da temperatura e umidade do solo sob diferentes quantidades de palha de cana-de-açúcar em decomposição**. 2017. 69 p. Dissertação (Mestrado em Ciências)—Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP, 2017.
- SCHIMEL J. P. et al. Moisture effects on microbial activity and community structure in decomposing birch litter in the Alaskan taiga. **Soil Biol. Biochem**. v.31, p.831-838, 1999.
- SCHUSTER, M. J. Increased rainfall variability and N addition accelerate litter decomposition in a restored prairie. **Oecologia**. v.180, p.645-655, 2016.
- SIERRA, C. A. et al. Sensitivity of decomposition rates of soil organic matter with respect to simultaneous changes in temperature and moisture. **J. Adv. Modeling Earth Syst**. v.7, p.335-356, 2015.

- SOMMER, R. et al. Simulating the effects of zero tillage and crop residue retention on water relations and yield of wheat under rainfed semiarid Mediterranean conditions. **Field Crops Res.** v.132, p.40-52, 2012.
- TAVARES, O. C. H.; LIMA, E.; ZONTA, E. Crescimento e produtividade da cana planta cultivada em diferentes sistemas de preparo do solo e de colheita. **Acta Scientiarum Agronomy.** v.32, p. 61-68, 2010.
- VARGAS, V. P. et al. Sugarcane crop residue increases N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> emissions under high soil moisture conditions. **Sugar Tech.** v.16, p. 174-179, 2014.
- VASCONCELOS, A. L. S. et al. Greenhouse gas emission responses to sugarcane straw removal. **Biomass and Bioenergy.** v.113, p.15-21, 2018.
- VERBURG, K.; BOND, W. J.; HUNT, J. R. Fallow management in dryland agriculture: explaining soil water accumulation using a pulse paradigm. **Field Crop Res.** v.130, p. 68-79, 2012.
- WALLENSTEIN, M. D. et al. Controls on the temperature sensitivity of soil enzymes: a key driver of in situ enzyme activity rates. Shukla, G., Varma, A., (Eds.), **Soil Enzymology**, Springer-Verlag, Berlin, p. 245-258. 2011.
- YOON, T. K. et al. Soil moisture effects on leaf litter decomposition and soil carbon dioxide efflux in wetland and upland forests. **Soil Sci. Soc. Am. J.** v.78, p. 1804-1816, 2014.
- ZHOU, W. P.; HUI, D. F.; SHEN, W. J. Effects of soil moisture on the temperature sensitivity of soil heterotrophic respiration: A laboratory incubation study. **PLOS ONE.** v.9, e92531, 2014.
- ZWIRTES, A. L. et al. Temperature changes in soil covered by black oat straw. **Pesquisa Agropecuária Brasileira.** v.52, p. 1127-1130, 2017.



### **3 – ARTIGO II - STRAW QUANTITY AND LAYER THICKNESS DETERMINES WATER DYNAMICS AND VERTICAL GRADIENTS OF DECOMPOSITION IN SUGARCANE MULCHES**

#### **3.1 - ABSTRACT**

Recent studies have shown that the mulch decomposition rate was not reduced by increase of amounts of straw on the soil surface. Therefore, there is an apparent contradiction between the importance of the soil-residue contact would be possibly modulated by the interactions between the amount of straw and the dynamics of the water in the soil and mulch, but so far these interactions remain unclear. We investigated how decomposition occurs within the mulch of varying thickness and the consequences on dynamics of mulch-C and -N, and identify the driving factors and the role of the contact between soil and mulch after sugarcane harvest, under subtropical climate over one year. We placed three different sugarcane straw quantities (4, 8 and 12 Mg ha<sup>-1</sup>) into open-wooden frames with a 2-mm aperture mesh at the bottom and we stacked either a single layer of 4 Mg ha<sup>-1</sup> (T: top), or 2 layers (L: low + T) or 3 layers (L + M: medium +T) on the surface of the soil, so as to reconstitute the three straw quantities. We quantified the, carbon (C) and nitrogen (N) contents and humidity of the remaining mulch in each layer, at intervals ranging from 15 to 70 days. Our results showed that i) mulch degradation and N remaining was not affected by N fertilization and was proportional to the initial amount of straw and ii) L, M and T layers were all decomposing, but the rate of decomposition differ according to their position (L>M>T). The striking result is that the upper layer of particles (T), at the interface with the atmosphere, evolved in the same way for the three treatments, i.e., whatever the thickness below it (0, 4 and 8 Mg ha<sup>-1</sup>). On the other hand, the lower layer (L), in contact with the soil, decomposed all the more quickly as the quantity of straw was thick above it, which also corresponded to a higher moisture content (12> 8> 4). The slightest contact with the soil with the thicker mulches appears to be compensated by a better conservation of the moisture mulch, which accelerates the decomposition of the lower layer of the mulch. These results suggest that the dynamics of the mulch is primarily driven by the dynamics of water, driven itself by the rain regime, evaporation, and the mulch characteristics.

Keywords: crop residue, mulch, C losses, straw removal

**\*Artigo redigido nas normas da revista Soil Biology and Biochemistry.**

### 3.2 – INTRODUCTION

The decomposition of crop residues controls nutrients cycling and the incorporation of new C into soils (Lynch et al., 2016; Schmatz et al., 2017). Several studies showed that the decomposition of crop residues at the soil surface results in lower rates of decomposition than those residues incorporated into the soil (Douglas et al., 1980; Schomberg et al., 1994; Coppens et al., 2006; Curtin et al., 2008). This is due to the residues left on the soil surface undergoing greater and frequent fluctuations in moisture, and particularly frequent drying between rains, combined with reduced diffusion of nutrients and water from soil to the decomposition sites in the mulch (Santos et al., 2010). These conditions unfavorable to colonization and microbial activity are well established, because part of the mulch is exposed to the atmosphere and only a fraction of mulch is in direct contact with the soil (Iqbal et al., 2013). The proportion of mulch exposed to the atmosphere or in contact with the soil may first vary depending on the morphological characteristics of the plant residues and the amount of straw on the soil surface (Iqbal et al., 2015). For a given crop residue type, how much higher is the amount of residues on the soil surface much smaller is the residues proportion that is in contact with soil. Based on results obtained with various intensity of contact between soil and crop residues, obtained by incorporating residues of increasing particle sizes (e.g., Angers and Recous, 1997; Iqbal et al., 2013) lower rates of decomposition are expected under conditions of poor soil-residue contact. However, recent studies have shown that the mulch decomposition rate was not affected by different amounts of mulch of cover crops (3 to 10 Mg ha<sup>-1</sup>) (Acosta et al., 2014; Halde and Entz, 2016) and sugarcane straw (3 to 12 Mg ha<sup>-1</sup>) (Ramos et al., 2016; Dietrich et al., 2017) and were higher in the presence of larger amounts of rye straw (2 to 15 Mg ha<sup>-1</sup>) (Williams et al., 2018) and sugarcane straw (3 to 21 Mg ha<sup>-1</sup>) (Sousa Jr et al. 2017; Vasconcellos et al., 2018). It was shown that higher amounts of residues contributed to a greater maintenance of soil moisture (Pineiro, 2018) and the activity of the microorganisms should be favored and maintained for a longer time. Conversely with low amount of straw, the soil coverage is less and moisture decreases rapidly reducing microbial activity. Therefore, there is an apparent contradiction between the importance of the soil-residue contact (which proportion increases with decreasing mass, for a given residue) would be possibly modulated by the interactions between the amount of straw on the soil surface and the dynamics of the water in the soil and mulch, but so far these interactions remain unclear.

Therefore, understanding the biological and physical processes by which a residue mulch decomposes is important, and how these processes are affected by the characteristics of the mulch. This becomes even more important with the development of cropping systems dedicated to the production of energy from biomass, in which the partial removal of the straw from the field causes changes in the quantities of straw that form the mulch (Guzman et al., 2015; Vasconcelos et al., 2018), but also the increasing proportion of agricultural situations under no till, with annual or perennial crops. Also because residue mulches has been shown to be potential hotspots of gas emissions, particularly  $\text{N}_2\text{O}$  (Vasconcelos et al., 2018), due to interactive microbial and physical processes at the soil-mulch interface (Vargas et al., 2014).

In this context, this study aims at investigating the vertical heterogeneity of the decomposition process within a sugarcane straw mulch in the field, and, by varying the initial amount of the mulch, i) explore how decomposition occurs within the mulch of varying thickness, ii) quantify the consequences on dynamics of mulch-C and -N, and iii) identify the driving factors and the role of the contact between soil and mulch. To do so, we run an experiment in the field with three initial sugarcane straw quantities (4, 8 and 12  $\text{Mg ha}^{-1}$ ) during one year after sugarcane harvest.

### 3.3 - MATERIALS AND METHODS

#### 3.3.1 - Study site

The study was conducted at the Federal University of Santa Maria (29°42'54" S, 53°42'23" W, approximately 90 m altitude) in the state of Rio Grande do Sul, Brazil. The local climate according to the Köppen classification is sub-tropical humid type Cfa. The mean annual temperature is 19.3 °C, with June being the coldest month with a mean minimum temperature of 9.3 °C and January the warmest month with a mean maximum temperature of 30.4 °C. The mean annual precipitation is 1660 mm, without dry season. The soil was classified as a Typic Paleudalf according to the USDA Taxonomy (Soil Survey Staff 2010) with 110  $\text{g kg}^{-1}$  clay, 630  $\text{g kg}^{-1}$  sand and soil bulk density of 1.63  $\text{g dm}^{-3}$  in 0-20 cm layer. Selected soil characteristics (0-20 cm layer) at the beginning of the experiment were: pH (water) = 5.4; CEC = 2.5  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , Mehlich-I P = 33.4  $\text{mg dm}^{-3}$ , K = 40.0  $\text{mg dm}^{-3}$ , total C = 4.1  $\text{g kg}^{-1}$  and total N = 0.32  $\text{g kg}^{-1}$ .

### 3.3.2 - Main experimental design

The experiment was carried out at the first ratoon sugarcane crop from November 2015 to November 2016 and began after the harvest of the cane plant held on November 20, 2015. The sugarcane variety was RB956911 and harvest was manual, removing all aboveground biomass (stalk + leaves + tops) leaving the soil uncovered. An area was demarcated with 32 plots of 22.4 m<sup>2</sup>, consisting of 4 lines with 1.4 m of spacing between rows and 4 m of length.

We used a randomized complete blocks design in a factorial scheme 4x2 with four replicates. The first factor were four straw quantities: 0, 4, 8 and 12 Mg ha<sup>-1</sup> of dry matter (DM). The second factor were two doses of urea-N: 0 and 100 kg N ha<sup>-1</sup>. The straw was homogeneously distributed by hand on the soil surface. The urea-N was applied as granule in a single dose on the soil surface and on the straw surface in tillering phase of sugarcane at day 52 after plant cane harvest. The sugarcane straw used in this study was collected from plant cane (RB956911) after a mechanical sugarcane harvest at Grandespe company at Salto do Jacuí, Rio Grande do Sul, Brazil (28°59' S, 53°14' W; 345 m de altitude).

### 3.3.3 - Decomposition of straw

The decomposition of sugarcane straw was studied in treatments 4, 8 and 12 Mg ha<sup>-1</sup> of straw, with and without N addition, respectively named (0S, 0S+N, 4S, 4S+N, 8S, 8S+N, 12S, 12S+N). The air-dried straw was added in 0.16-m<sup>2</sup> wooden frames (40-cm length x 40-cm width x 8-cm height) between rows of sugarcane. The bottoms of the wooden frames were delimitedated with 2-mm nylon mesh, while the tops of wooden frames were closed with 10-mm plastic screen mesh in order to prevent straw loss by wind and allow access for soil macrofauna. Dietrich et al. (2017) described details of this methodology. In order to evaluate the gradient of decomposition within the mulch, the mulch was divided into straw layers of 4 Mg ha<sup>-1</sup> each. We stacked either a single layer of 4 Mg DM straw ha<sup>-1</sup>, or 2 layers or 3 layers on the surface of the soil, so as to reconstitute the 3 straw quantities. The layers were separated by a maneable 10-mm synthetic mesh with wide aperture so as to being able to sample every layer separately for analysis. Therefore, the 4 Mg ha<sup>-1</sup> treatment has one layer simultaneously in contact with the soil (low) and in contact with the atmosphere (high) (4S L/T layer), 8 Mg ha<sup>-1</sup> treatments were

divided in top (8S T) and low layer (8S L), and 12 Mg ha<sup>-1</sup> treatments were divided in top (12S T), central (12S C) and low layer (12S L).

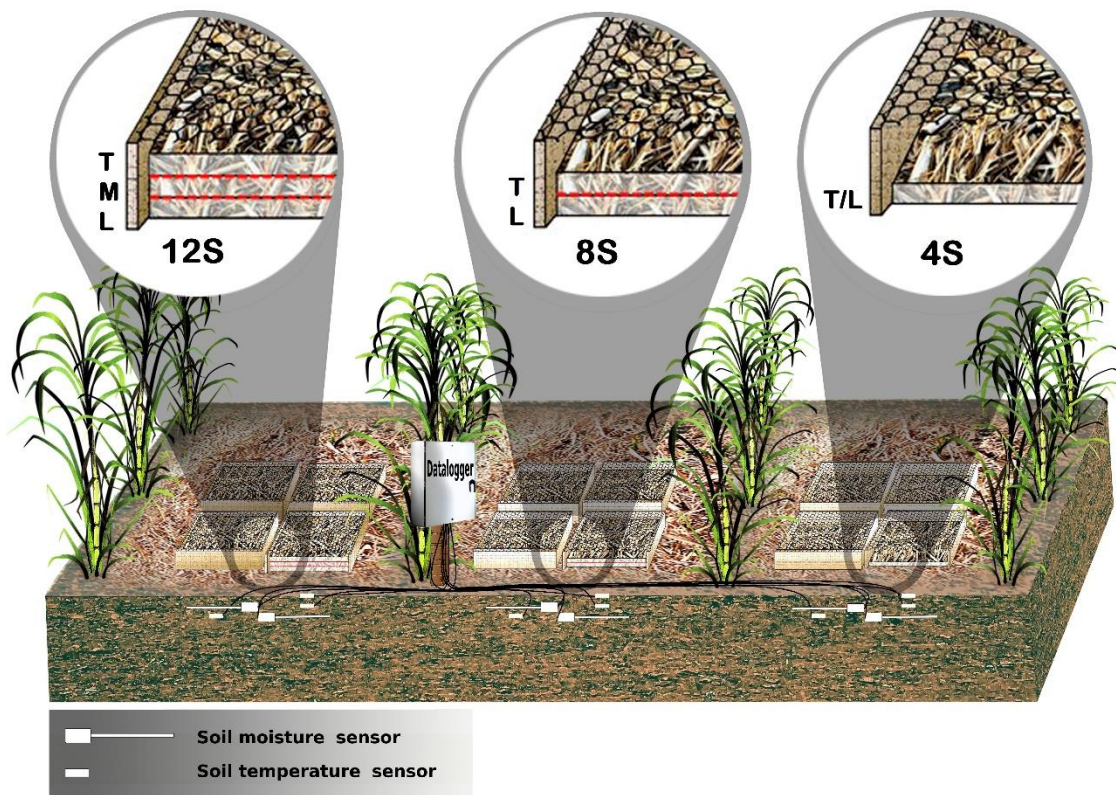


Figure 1. Figure demonstrating the layout of the soil surface decomposition tables, with emphasis on the straw layers of the mulch in each thickness and the location of temperature sensors (surface, 2.5 and 7.5 cm depth) and water content of the soil (2.5 and 7.5 cm deep).

Straw sampling was performed over one year, after 0, 15, 36, 51, 72, 103, 168, 238, 296 and 360 days or straw application, from November 2015 to November 2016. At each sampling date, each straw layer of each treatment was sampled separately. After sampling, all sugarcane straw samples were weighed wet, stored in paper bags and dried in an oven at 40 °C. The straw was then separated from adhering soil by dry cleaning and a subsample was dried in an oven at 65 °C and weight to determine the litter dry mass loss. Straw ashes were measured by incinerating 0.4 g in a muffle furnace at 550 °C for 3 h. The total C and N contents were determined by dry combustion of ground straw using an elemental analyzer (FlashEA 1112 model, ThermoFinnigan, Milan, Italy). Straw chemical fractions (soluble-SOL, cellulose-CEL, hemicellulose-HEM and lignin-LIG) were determined in residues pre-dried at 40 °C following the method described by Redin et al.

(2014). The water-soluble organic C ( $C_{sw}$ ) and water-soluble total N ( $N_{sw}$ ) was extracted using 2 g of chopped plant residue (1 cm) pre-dried at 40 °C in 80 ml of water following methodology described by Schmatz et al. (2017). The  $C_{sw}$  and  $N_{sw}$  contents were analysed using a total organic carbon (TOC) analyser equipped with a kit for N analysis (Shimadzu TOC-LCPH, Shimadzu, Kyoto, Japan). The chemical characteristics of straw at the beginning of experiment were: 228 g kg<sup>-1</sup> SOL, 372 g kg<sup>-1</sup> CEL, 335 g kg<sup>-1</sup> HEM, 65 g kg<sup>-1</sup> LIG, 425 g kg<sup>-1</sup> total C, 8 g kg<sup>-1</sup> total N, 36.7 g kg<sup>-1</sup>  $C_{sw}$ , 1.2 g kg<sup>-1</sup>  $N_{sw}$  and a C/N ratio of 53.

Mulch thickness was evaluated in four wooden frames randomly selected. In each wooden frame, nine thickness non-destructive measurements were performed using a graduate ruler. The measurements were performed at 0, 29, 54, 72, 103, 168, 238, 296 and 360 days after straw addition on the soil surface.

### **3.3.4 - Soil water content and soil temperature**

Sensors with two 30-cm-long stainless steel rods (FDR CS 616-L) inserted at 2.5 and 7.5 cm depth was used to measure soil moisture. The type T copper-constantan thermocouple was installed on soil surface, 2.5 and 7.5 cm depth to measure soil temperature. Both sensors were installed between sugarcane rows and coupled to a datalogger (CR1000, Campbell Scientific, Logan, Utah, USA) and measurements were done at a 10 min sampling interval. Air temperature at 30-cm from soil surface inside of sugarcane plantation was also evaluated using the same sensor model. The sensor was cover by a polyvinyl chloride pipe wrapped by asphalt adhesive tape with holes in the sides. Soil temperature and moisture and air temperature were measured every 10 minutes. Daily air temperature and rainfall data were obtained from an automatic weather station located 1.7 km away from the experiment.

### **3.3.5 - Calculations and statistical analysis**

The mass of each straw layer remaining, expressed as a function of the initial mass, was calculated by dividing the mass collected at each harvest time in each wooden frame by the initial mass of straw in each frame after deducting the ash content of each sample. In treatments 8S and 12S (with and without N), the amount of straw remaining was obtained by summing the amount of straw in each mulch layer. The C and N quantity of the remaining mulch were then obtained by multiplying the measured mulch mass of each

layer by the total C and N concentrations of the mulch in each layer (deduced from the ashes content) at each sampling date. The decomposition rate of straw ( $k$ ) and straw C pool ( $C_0$ ) of each layer and of the total mulch were calculated over one year using a simple one-compartment equation according to Jenny et al. (1949):

$$C \text{ remaining} = C_0 e^{-kt} \quad (1)$$

where  $C$  remaining is the mass of the remaining C ( $\text{Mg C ha}^{-1}$ ),  $C_0$  is trash C pool ( $\text{Mg C ha}^{-1}$ ),  $k$  is the degradation rate constant ( $\text{day}^{-1}$ ), and  $t$  is the time (day). Half-life time  $t_{1/2}$  of the trash corresponds to the time necessary to degrade half of the initial quantity of the mulch added and is equal to

$$t_{1/2} = \ln 2 / k \quad (2)$$

The LCI (lignocellulose index) was calculated from the biochemical fractions of sugarcane straw and corresponds to the relative enrichment of LIG in the plant cell walls (Whittinghill et al., 2012). This index is taken as an index of progress of degradation of the lignocellulose substrates.

Significant differences between mulch decomposition variables were tested by three-factor ANOVAs: straw quantity x N fertilization x time of decomposition. Decomposition variables related to straw layer position on mulch were also tested by other three-factor ANOVAs: straw layer x N fertilization x time of decomposition. Soil moisture and soil temperature were tested by three-factor ANOVAs: straw quantity x soil depth x date (average between straw sampling). Significant differences between decomposition model parameters ( $C_0$ ,  $k$  and  $t_{1/2}$ ) were tested by two-factor ANOVAs: straw quantity x N fertilization and straw layer x N fertilization. In the straw layer data analysis, the data from the 4S treatment were included in the statistical analysis. This treatment was considered as a straw layer L and T straw because it was in direct contact with the soil and the atmosphere, respectively. When the ANOVA indicated significant differences ( $P < 0.05$ ), we compared the treatment meanings using Tukey test ( $P < 0.05$ ).

## 3.4 – RESULTS

### 3.4.1 - Climatic and soil environmental conditions

The cumulative rainfall was 1519 mm, distributed over 107 events and the mean air temperature was 18.4 °C, similar to historical average (Fig. 2a). The relative air humidity ranged from 39 to 99%, with most values in the 70-90% range (Fig. 2b). As the

temperature and moisture of the 0-5 cm and 5-10 cm layers have varied in the same way over time and between treatments, only the 0-5 cm layer is shown here in Fig. 2c. The effect of straw amount on soil temperature was observed only in the first three months, when sugarcane canopy had still not completely cover the soil surface (Fig. 2c) and the mean soil temperature during this period at 0-5 cm depth decreased with increasing amount of straw, as 0S (28.2 °C) > 4S (27.1 °C) > 8S (26.4 °C) = 12S (26.5 °C), indicating about 2 °C difference in mean temperature between the highest (12S) and the lowest (0S) amount of straw. For the soil moisture data, only those of the 0-5 cm layer were presented, since these were similar to those of the 5-10 cm layer (Fig. 2d). Soil water content responded to daily rainfall and was affected by straw quantities (Fig. 2d). Averaged over the experimental year, soil volumetric water content was 0.17 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> for 0S, 0.19 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> for 4S, 0.21 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> for 8S and 0.23 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> for 12S treatments. Therefore, soil water content was markedly lower in treatments with lower straw quantities on soil surface during periods with small amount of rainfall or a short dry period e.g., from 46 to 67 day, 190 to 217 day and 297 to 320 day.



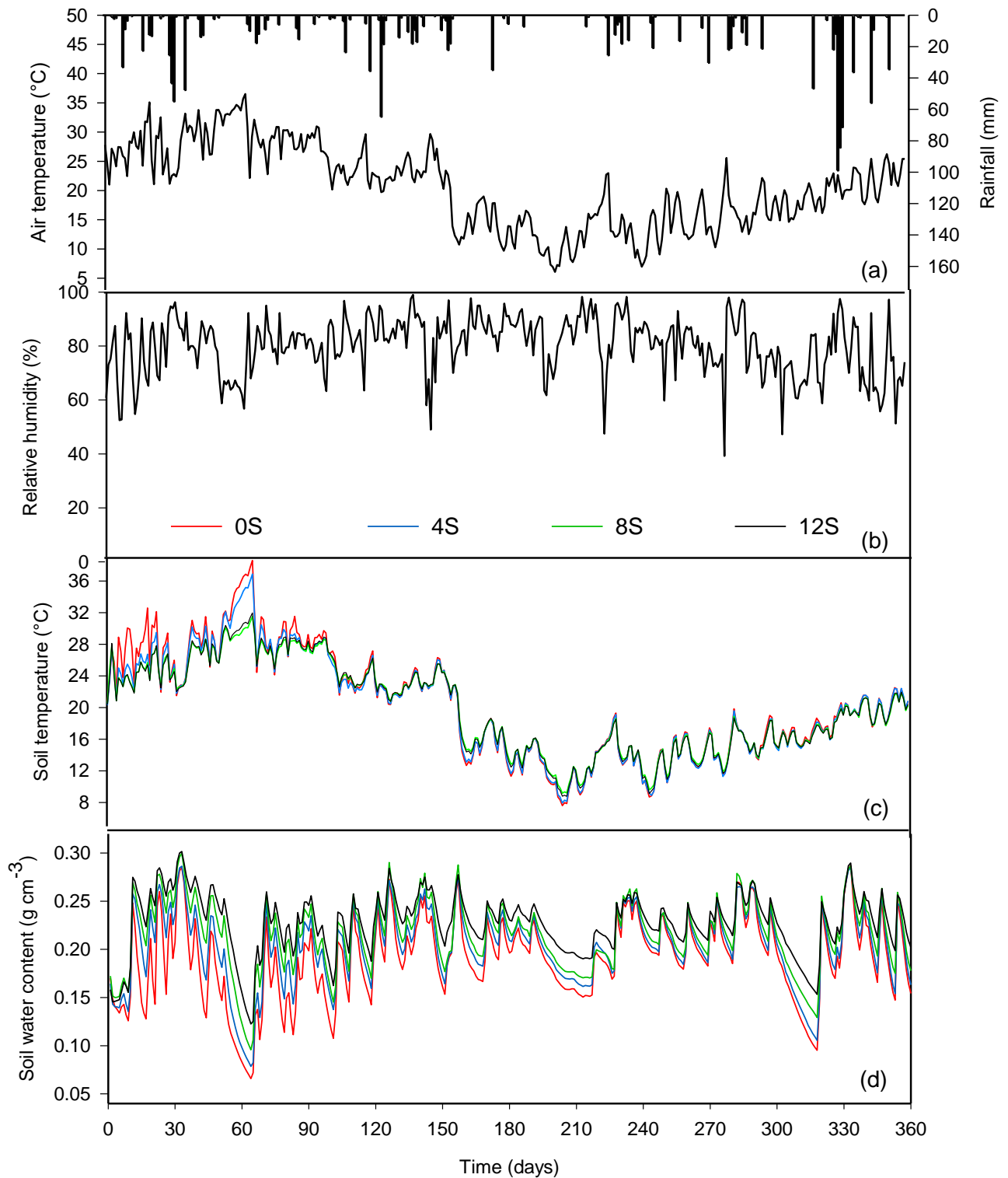


Figure 2. Precipitation and air temperature (a), relative humidity (b), soil temperature at surface (c) and soil moisture in the 0-5 cm soil layer of (d) for the four sugarcane straw treatments (0S: 0Mg, 4S: 4Mg, 8S: 8Mg and 12S: 12 Mg DM ha<sup>-1</sup>) during the 360 days of experiment.

### 3.4.2 - Dynamic of thickness and water retention of mulch

The initial mulch thickness varied with straw quantity ( $P < 0.01$ ), and as expected ranked as  $12S > 8S > 4S$ , between 4.7 cm (12S) and 1.9 cm thick (4S) at day 0 (Fig. 3a). The evolution of mulch thickness was almost similar in the three straw treatments, with 32% thickness decrease at day 29, 50% at day 103 and 68% after 360 days. At that time the mulch was 0.6, 1.2 and 1.5 cm thick for 4S, 8S and 12S, respectively.

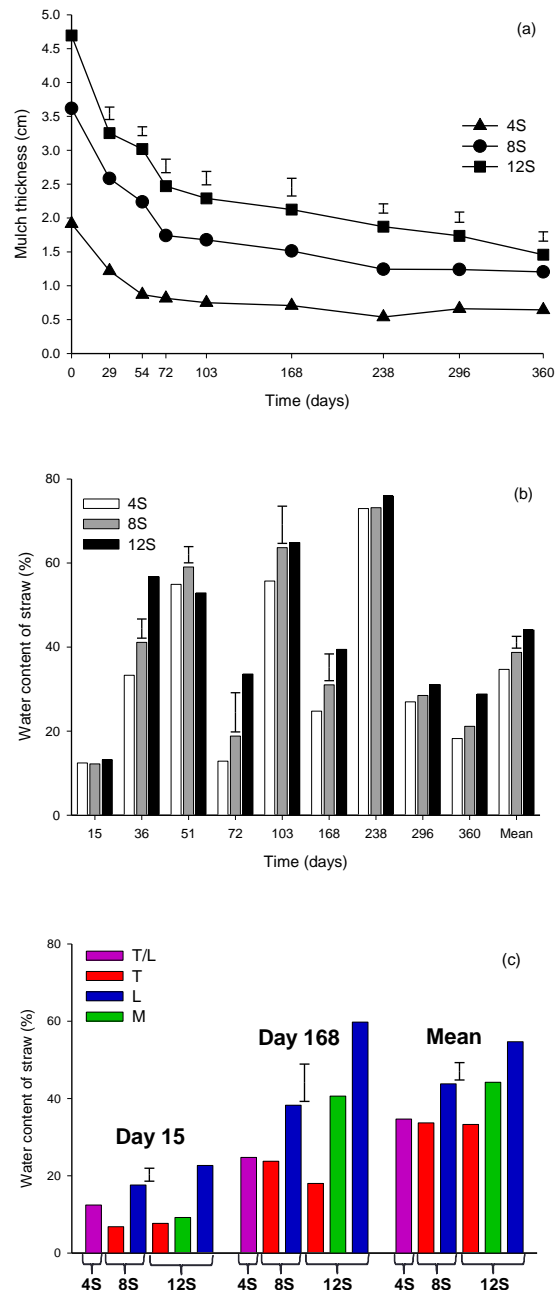


Figure 3. Evolution of mulch thickness (a) and water content of mulch (b) during 360 days of decomposition, and (c) water content of layers in the mulch at two sampling dates and on average for the year. Three straw treatments (4S: 4Mg, 8S: 8Mg and 12S: 12 Mg DM ha<sup>-1</sup>) and position of the layers in the mulch (L: low, M: medium, T: top). The vertical bars in the graph indicate the minimum significant difference between treatments (Tukey at  $P <$

0.05). Values are the mean of 36 replicates for thickness and 4 replicates for straw water content.

The moisture of mulches measured at each sampling time, varied greatly over the course of the year, between 10 and 80%. It also varied significantly as a function of straw quantities (Fig. 3b) and differed between straw layers that constituted mulches (Fig. 3c and Fig. S1). Overall, the mulch water content was positively related to straw quantity. Comparing layer position for a given treatment, we observed that the L layers of treatments 8S and 12S showed higher water content than the T layers of the same straw treatments, except for samplings performed at days 51, 103 and 238. Comparing similar layer position for different mulch quantities, we observed that the straw water content of layer L 12S was higher than water content of layer L 8S at four sampling dates. Except at one date (day 15), water content of layer L 8S was similar to layer M 12S. The straw water content did not differ in the layers T 8S and 12S and was similar to 4S (layer L/T).

### **3.4.3 - Dynamic of mulch decomposition**

The straw C and N remaining as mulch, expressed as a function of initial straw C or N added, decreased quickly over time, but were not influenced by straw quantity, N fertilization or their interaction (Table S1) and therefore the mean data of the 0N and 100N treatments for each straw treatment are presented here (Fig. 4a and 4b). Remarkably, approximately half of the straw C and two thirds of straw N lost during 360 days was lost in the first 36 days whatever the initial straw quantity.

The straw C and N lost after 360 days, averaged for 12S, 8S and 4S treatments, amounted to 75 and 46% of initial C and N, respectively. The C:N ratio of the remaining straw decreased from initial C:N of 53 to final C:N of 29 with no significant differences between straw treatments or between N treatments (data not shown).

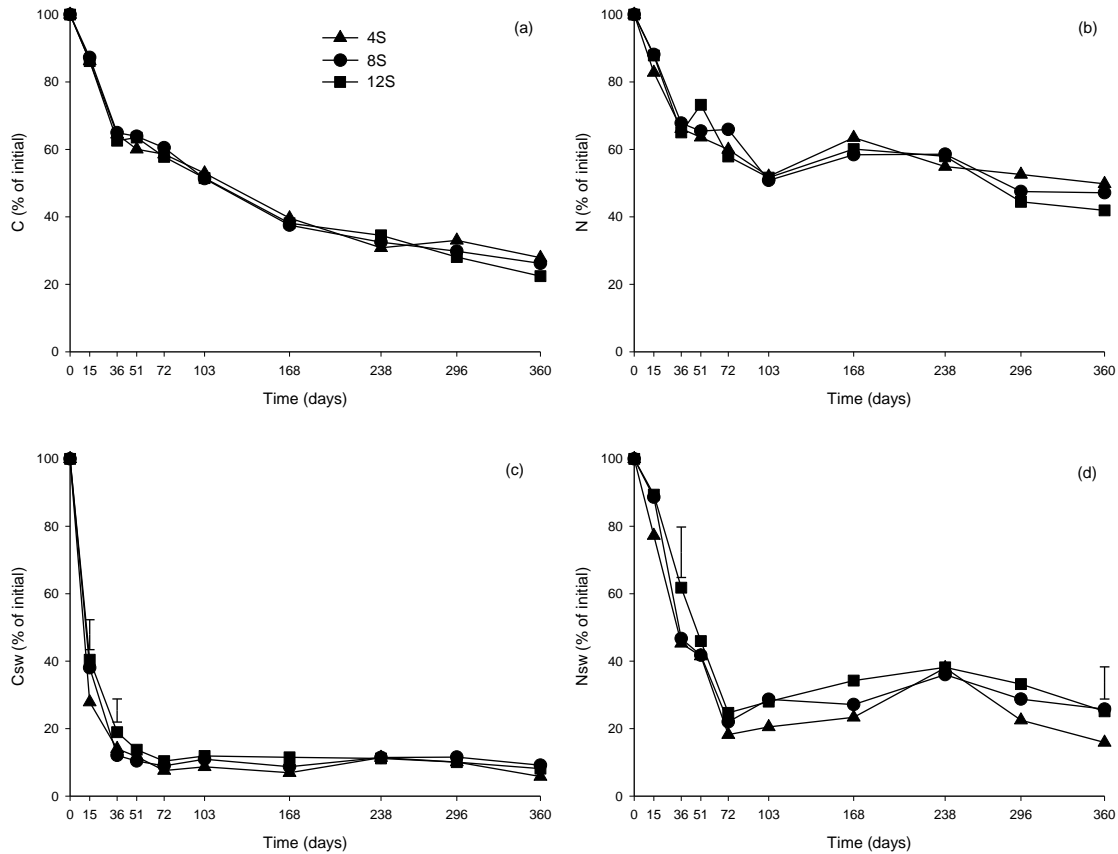


Figure 4. Dynamics of straw total C (a), straw total N (b), straw water-soluble C (c) and straw-water soluble N (d) in the remaining mulch particles for each straw treatment (4S: 4Mg, 8S: 8Mg and 12S: 12 Mg ha<sup>-1</sup>). Data are the average of the 0N and 100N treatments. The vertical bars in the graph indicate the minimum significant difference between treatments (Tukey at  $P < 0.05$ ). Values are the mean of 8 replicates per treatment and per date.

Straw Csw decreased very quickly and at day 36 only 14, 12 and 19% of initial Csw remained, in the 4S, 8S and 12S treatments respectively, with significant by very transient differences between treatments (Fig. 4c). Straw Nsw decreased more slowly, until day 72 then remained stable until the end (Fig. 4d). The chemical composition of the straw particles changed over time, from day 0 with 22% SOL, 37% CEL, 34% HEM and 7% LIG, to day 360 with 25% (SOL), 21% (CEL), 41% (HEM) and 13% (LIG) at day 360. This final composition was not influenced by straw quantity, N application or their interaction ( $P > 0.05$ ). (Table S1). The C<sub>0</sub> straw pool calculated by fitting the kinetics of C decomposition with one-compartment equation, was influenced only by straw quantity and varied proportionally with the initial straw quantities, representing 1.47 Mg ha<sup>-1</sup> (4S), 2.99 Mg ha<sup>-1</sup> (8S) and 4.45 Mg ha<sup>-1</sup> (12S) (Table 1). The straw quantity and N addition did not change the  $k$  decomposition rates with on average  $k = 0.0044$ , and the half-life time of C ( $t_{1/2}$  mean = 158 days).

Table 1. Decomposition parameters of the degradation model (Jenny et al., 1949) for the mulch with different straw quantity (4S: 4Mg, 8S: 8Mg and 12S: 12 Mg ha<sup>-1</sup>) and N rate (0 and 100 Mg ha<sup>-1</sup>) and mulch straw layers (L: low, M: medium, T: top).

Parameters	Initial straw quantity (Mg ha <sup>-1</sup> )			N rate (kg ha <sup>-1</sup> )		Mulch straw layers					
	4S	8S	12S	0	100	4S L/T	8S T	8S L	12S T	12S M	12S L
C <sub>0</sub> (Mg ha <sup>-1</sup> ) <sup>a</sup>	1.47c	2.99b	4.45b	2.97a	2.97a	1.47ab	1.51a	1.51a	1.43b	1.52a	1.52a
k (dias <sup>-1</sup> ) <sup>b</sup>	0.0042a	0.0040a	0.0046a	0.0045a	0.0044a	0.0042b	0.0037bc	0.0055a	0.0033c	0.0046b	0.0064a
t <sub>1/2</sub> (dias <sup>-1</sup> ) <sup>c</sup>	166a	155a	153a	158a	159a	166bc	188ab	126de	209a	155cd	110e

Values followed by the same letters at the same line are not significantly different (Tukey; P<0.05).

<sup>a</sup> C<sub>0</sub> is straw C pool.

<sup>b</sup> k is the degradation rate constant.

<sup>c</sup> t<sub>1/2</sub> is the half-life of the mulch.

### 3.4.4 - Dynamic of mulch straw layer decomposition

#### 3.4.4.1 - C and N evolution

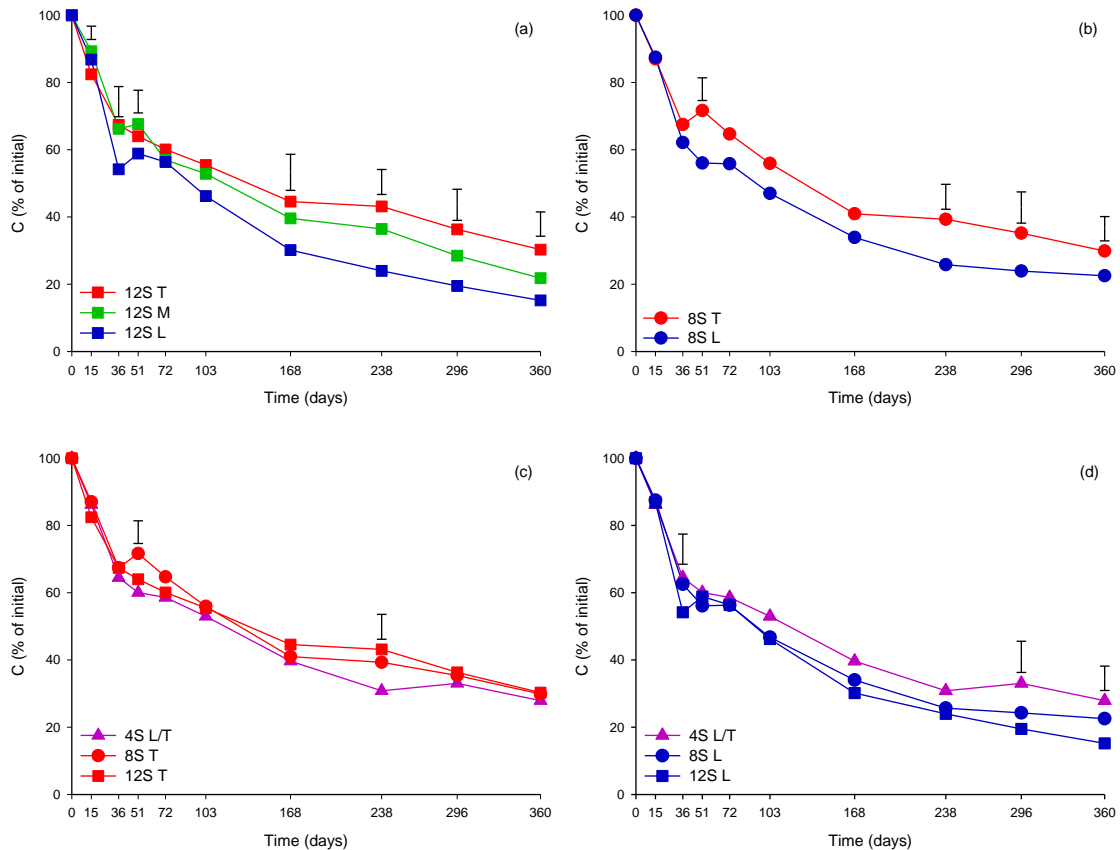


Figure 5. C remaining in the mulch straw layers having different positions in the mulch (L: low, M: medium, T: top) for (a) 12S straw treatment and (b) 8S treatment and C remaining in the mulch straw layer located (c) on the top of the mulch (T and L/T) or (d) on the bottom of the mulch, in contact with the soil, (L or L/T) in the mulch treatment 12S. The treatments 4S, 8S and 12S correspond to initial quantity of straw 4Mg, 8Mg and 12 Mg ha<sup>-1</sup>, respectively. The vertical bars in the graph indicate the minimum significant difference between treatments (Tukey at  $P < 0.05$ ). The values are the mean of 8 replicates per treatment and per sampling dates.

The dynamics of straw C and N in the various mulch layers were significantly influenced by the position of the straw layers within the mulch ( $P < 0.001$ ) but not by N fertilization or their interaction ( $P > 0.05$ ) (Table S2), and therefore the mean of the two N treatments will be presented here (Fig. 5). With treatment 12S (Fig 5a), the dynamics was characterized by the rapid decrease in straw-C similar for all layer positions (0-36 days), followed by a slower decrease, a phase in which decomposition of 12 L > 12C > 12T. The same pattern was also observed with 8S treatment, with layer 8L > layer 8T (Fig 5b). As

expected, the decomposition parameters of the adjusted model were significantly different only for the mulch layer positions (Table S2 and Table 1): the higher and lower decomposition  $k$  rates were observed in the L and T layers, respectively.

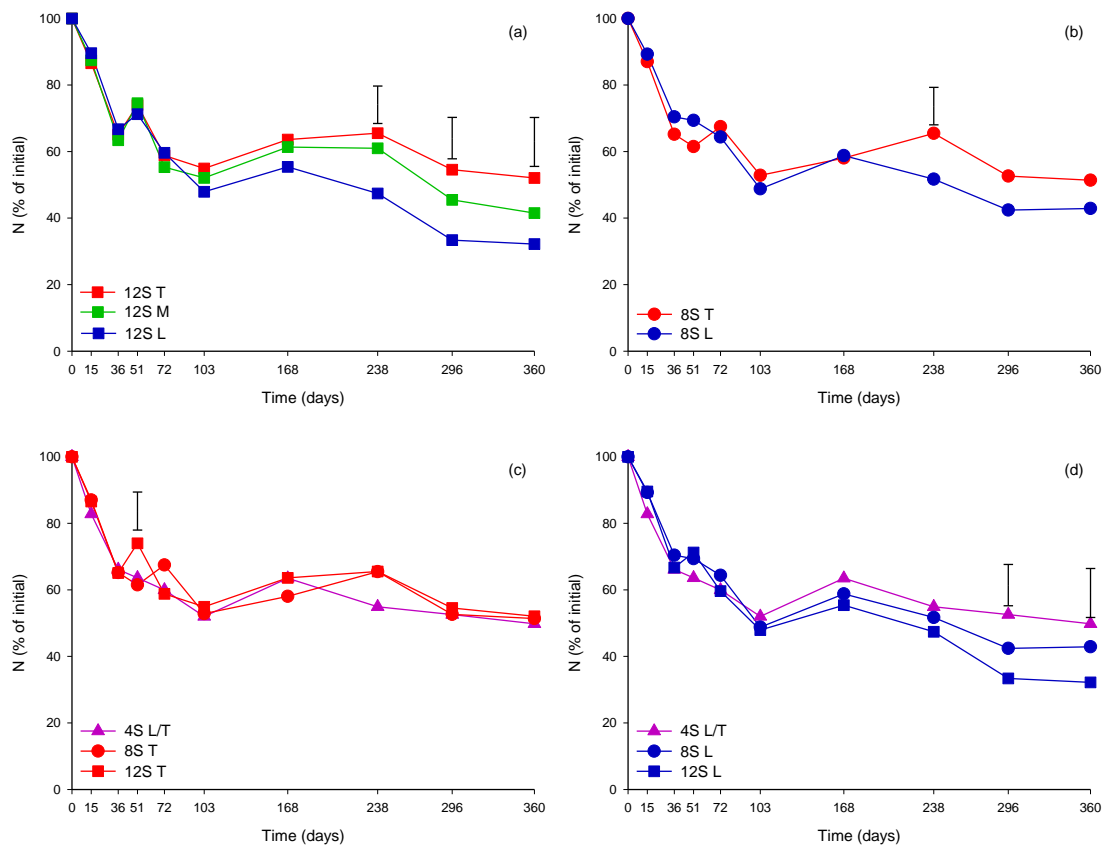


Figure 6. N remaining in the mulch straw layers having different positions in the mulch (L: low, M: medium, T: top) for (a) 12S straw treatment and (b) 8S treatment and N remaining in the mulch straw layer located (c) on the top of the mulch (T and L/T) or (d) on the bottom of the mulch, in contact with the soil, (L or L/T) in the mulch treatment 12S. The treatments 4S, 8S and 12S correspond to initial quantity of straw 4Mg, 8Mg and 12 Mg ha<sup>-1</sup>, respectively. The vertical bars in the graph indicate the minimum significant difference between treatments (Tukey at  $P < 0.05$ ). The values are the mean of 8 replicates per treatment and per sampling dates.

Comparing the C loss of the top layers across the three straw treatments (4S L/T vs. 8S T vs. 12S T), we observed that the dynamics was very similar, except at two dates with a transient difference which disappeared thereafter (Fig. 5c). The same comparison with low layers (4S L/T vs. 8S L vs. 12S L) showed that, in trend, the 4S L/T layer decomposed less rapidly than the other two, and significantly less over the last two sampling dates (Fig. 5d). The kinetics of straw N followed the same pattern for each layer position (Fig. 6). The dynamics was characterized by the rapid decrease in straw-N (0-36 days) similar for all layer positions, followed by a slower decrease up to 103 days and after a phase where the remaining N values were relatively stable until 360 days. Differences in

the N remaining between the straw layers were observed mainly from the day 238 in the 12S (T > M > L) and 8S (T > L) mulch and between low layers (8S = 4S > 12S = 8S).

#### 3.4.4.2 - Changes in chemical composition

The chemical composition of the straw layers revealed by modifications of the straw C:N ratio and of their biochemical composition, and taken as indicator of decomposition process, varied over time for all layer positions and depended of their position in the mulch (Fig. 7, with the 12S treatment as example). The pattern of evolution of the C:N ratio was similar between the three layers, but in general the C:N decrease was more pronounced for low layers with 12S L < 12S M < 12S T. Lignocellulose index (LCI) increased over time for all layers from 0.08 to 0.17, and was significantly different between layers of different positions until 168 days (12S = 12M > 12T), but no difference persisted at 360 days (Fig. 7b).

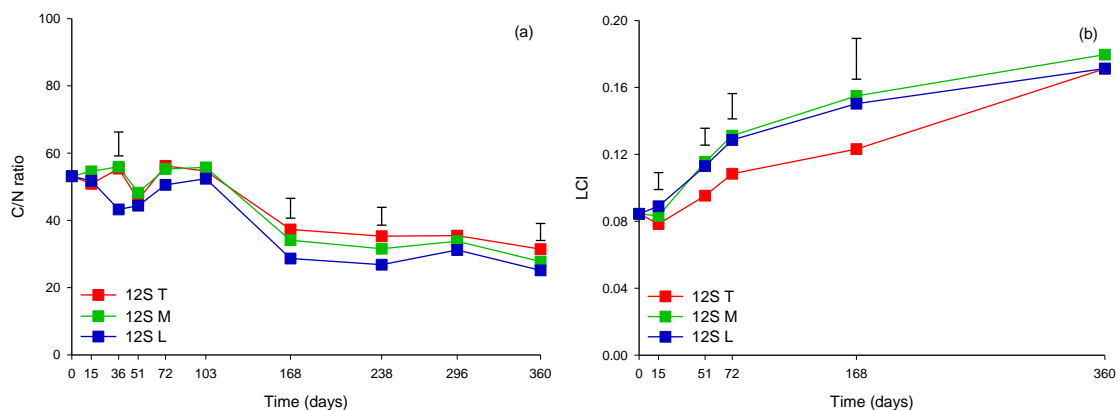


Figure 7. Evolution of the C:N ratio (a) and of the lignocellulose index (LCI) (b) of the straw for different position of straw layers in the mulch (L: low, M: medium, T: top) for the treatment 12S (initial amount of straw 12 Mg ha<sup>-1</sup>) during the 360 days of experiment. The vertical bars in the graph indicate the minimum significant difference between treatments (Tukey at  $P < 0.05$ ). Data are the mean of 8 replicates per treatment and per date.

#### 3.4.4.3. Relationships with straw water content

The amount of straw C and straw N remaining at day 360, in the different layers having low, medium or top position in the mulch, was significantly and linearly related to the average moisture content of these layers during the year, whatever the position of the layer within the mulch and the mulch quantity (Fig. 8a). This is also true when using the



degradation constant  $k$ , which reflects the entire decomposition kinetics with  $k= 0.0001x - 0.0005$  ( $R^2=0.8822$ ).

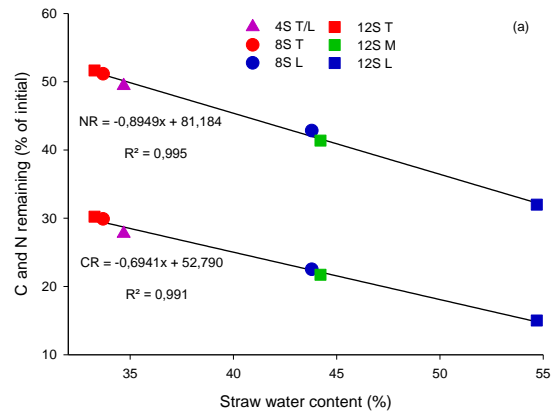


Figure 8. Relationships between straw C or straw N remaining and the average water content of straw layers having different positions in the mulch (L: low, M: medium, T: top) of three treatments (4S: 4Mg, 8S: 8Mg and 12S: 12 Mg DM ha<sup>-1</sup>) during the 360 days of experiment. Values are the mean of treatments with and without N.

### 3.5 - DISCUSSION

#### 3.5.1 - Effect of mulch quantity and thickness on mulch decomposition

A main hypothesis based on previous published work was that increasing mass of residues at the soil surface as a mulch, decreased the rate of decomposition of these mulches due to the reduction of the proportion of the residues in contact with the soil (Findeling et al., 2007). This situation was created in this study with the 3 amounts of sugarcane straw left on the soil surface which increased the thickness of the mulch (12S > 8S > 4S). Nevertheless, we observed that the straw-C and -N dynamics and calculated rates of decomposition of the mulches were similar whatever the initial quantity of straw at the soil surface and the fact that fertilizer N was added or not later on straw in fertilized treatments, suggesting that neither the colonization, nor the N availability or the moisture were limiting factors for the thickest mulches. These results are consistent with several recent studies showing that the decomposition was proportional to the quantity of straw left initially on the soil surface (Acosta et al., 2014; Halde and Entz, 2016; Dietrich et al., 2017). It invalidates the hypothesis of the soil-straw contact and the proportion of the mulch in contact with the soil, as a key drivers of the decomposition, because of their role in providing nutrients and moisture to straw decomposers at the soil surface.

Strikingly, the dynamics of N in mulch differed substantially from those of C. After a rapid net C and N loss at the beginning of decomposition, the N in the mulch remained stable while decomposition continued, and adding N on the mulch in fertilized plots did not modify this dynamics. It suggests an efficient use of straw-N and recycling of microbial N by decomposers growing on the straw, and that availability of N to decomposers was not a limiting factor of decomposition, neither with larger mass and thickness of the mulch, nor by lack of mineral N in soil under the mulches in non-fertilized plots (Pinheiro, 2018). The relative high C:N ratio of sugarcane straw suggests that fungi may be the main group of microorganisms involved in the decomposition, particularly for the upper layers of the mulch as a function of the ability to translocate N from the soil through the hypha network until substrates that are recalcitrant or N-poor (Frey et al., 2000).

The amount of straw on the soil surface not only changes the proportion of mulch in contact with soil, but affects soil temperature and has a substantial effect on the moisture of the soil and straw that forms the mulch. Previous studies with different crop residues as mulch on the surface demonstrated that the mulch affect the wetting and drying cycles, themselves driven by rain and evaporation regime (Peres et al., 2010). There are few studies which evaluated the interaction between different amounts of straw on soil moisture (Pereira et al., 2015; Anjos et al., 2017; Mahdavi et al., 2017). Our results clearly showed an increase in soil moisture with increasing mass of straw on soil surface, mainly in periods with low rainfall, when thicker mulch prevented soil water evaporation more effectively. This is because the straw on the surface acts as a physical barrier to the transfer of heat and water to the atmosphere (Zwirtes et al., 2017). In addition, the water content of the straw layer was higher with thicker mulch (year-round mean moisture = 12S > 8S > 4S). These modifications directly affect the availability of water for growth and activity of microorganisms in soil and mulch. Thus, the rapid loss of water in mulch of low mass and thickness can reduce microbial activity and offset the advantages provided by the high proportion of the mulch in contact with the soil. These results and the underlying assumptions led to an examination of what is happening inside mulches.

### **3.5.2 - Gradients within the mulch**

The amount of straw on the soil surface not only affected overall soil and straw moisture, but also created a moisture gradient within the mulch. Sampling straw layers in different positions in the mulch showed that the layers in contact with the soil in thicker mulch (8S L and 12S L) were almost always wetter during the year than the more distant

ones (8S T, 12S M and 12S T), which were exposed to solar radiation and wind. These conditions of moisture favor high microbial activities and faster decomposition at the soil-mulch interface. Kinetics of straw C for each position layer and each mulch treatments indicated first that all layers decomposed, even at the top of the mulch as for the 12S T, which the most distant situation from the soil was, and that the decomposition of the layers at the top of the mulches started as quickly as the other layers. This suggests that part of the C loss could be due to leaching of soluble compounds under rain. We observed that the top layers behaved similarly, while the low layers were all the faster as the mulch above was thicker (12S L > 8S L > 4S L). Our conclusion is that the mulch system of various thickness is driven primarily by water dynamics, itself under the control of water retention-evaporation by the straw particles.

This results is also demonstrated by the strong relationships obtained between the amount of straw C or N remaining after 360 days (or with the  $k$  degradation constant) and the mean straw moisture in each layer, irrespective of the layer position and the mulch thickness. The moisture gradient formed in the mulch provided a decomposition gradient and finally defined the decomposition rate of the whole mulch. Thus, these data explain why the overall mulch decomposition did not differ between the mulches of increasing mass and thickness as there was a compensatory effect between layers. In other words, the higher rates of decomposition of lower layers of thick mulches compensated for the lower proportion of straw of these mulches in direct contact with the soil. These results confirm the hypothesis of Dietrich et al. (2017) that there is an antagonistic effect of increasing mulch quantity, with a decreased proportion of straw in direct contact with the soil but improved environmental conditions of decomposition at the soil-mulch interface. Further research is needed however to establish the range of mulch thickness for which these results are valid, and how thicker layers than those explored here and in the literature with sugarcane straw, could modify the conclusions.

The change in chemical composition of mulch over time expressed by the LCI index, occurred in all straw layers whatever their position. It means that the C or N loss of the top layers were not only due to physical transport of straw particles or soluble compounds from a upper to a lower layer during experimental handling, or by rain leaching, but that the remaining particles of each layer underwent decomposition. The LCI corresponds to the relative enrichment of LIG in the mulch (Whittinghill et al., 2012) because structural components such as CEL and HEM are more easily decomposed than LIG (Berg and McLaugherty, 2008). The lower LCI values of the lower layer of the 12S mulch confirm the higher decomposition rate of this straw layer in contact with the soil.

### 3.5.3 - Much conceptual modelling

Much modules developed in several simulation models (i.e. APSIM, Thorburn et al., 2001; PASTIS, Findeling et al., 2007) represented the residue mulch composed of two layers, one layer in contact with the soil undergoing decomposition process with moisture, available N and microbial biomass influenced by the underlying soil layer in contact with the mulch, covered by a layer of undecomposed straw, which "feeds" the lower layer as it empties. Moreover, in the model proposed by Findeling et al. (2007) the water dynamics of mulch is simulated considering that the whole mass of straw that forms the mulch presents the same moisture content. Our results demonstrated that the top of the mulch layers that are not in direct contact with the soil (exposed to air) also decompose, and that there is a gradient of moisture and decomposition (and probably temperature, although we did not measure it) throughout the mulch volume. These findings suggest the need for sophisticating the models dedicated to simulation of the evolution of the mulch, first by considering that the whole straw layer is decomposing, and the absolute requirement for an accurate estimation of water content of the mulch over time, which includes knowledge about water interception, retention and leaching for various physical and chemical properties of crop residues.

### 3.6 - CONCLUSIONS

Increasing the amount of straw on the soil surface, which reduces the proportion of straw in contact with the soil, does not reduce the rate of decomposition and does not change the dynamics of C and N in the mulch. Our study has shown that layers of the thick mulch located closer to the soil have higher moisture content than the more distant ones, which are exposed to the action of solar radiation and wind. We show clearly that more humid layers present a higher rate of decomposition and smaller amounts of C and N remaining after one year. Therefore, the moisture gradient formed in the mulch provides a decomposition gradient and finally defines the decomposition rate of the whole mulch. The slightest contact with the soil with the thicker mulches appears to be compensated by a better conservation of the moisture of the mulch, which accelerates the decomposition of the lower layer of the mulch. These results suggest that the dynamics of the mulch is primarily driven by the dynamics of water, driven itself by the rain regime, evaporation, and the mulch characteristics.

### 3.7 – REFERENCES

- ACOSTA, J. A. de A. et al. Decomposição da fitomassa de plantas de cobertura e liberação de nitrogênio em função da quantidade de resíduos aportada ao solo sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v.44, p.801-809, 2014.
- ANGERS, D. A.; RECOUS, S Decomposition of wheat straw and rye residues as affected by particle size. **Plant and Soil**. v.189, p. 197-203, 1997.
- ANJOS, J. C. R dos. et al. Water storage in a Plinthaqualf cultivated with sugarcane under straw levels. **Pesqui. Agropecu. Bras.** v.52, p.464-473, 2017.
- BERG, B.; MCCLAUGHERTY, C. Plant litter: decomposition, humus formation, carbon sequestration, 2nd edn. Springer, New York. 2008.
- COPPENS F. et al. Soil moisture, carbon and nitrogen dynamics following incorporation and surface application of labeled crop residues in soil columns, **Eur. J. Soil Sci.** v.57, p.894-905. 2006.
- CURTIN, D.; FRANCIS, G. S.; MCCALLUM, F. M. Decomposition rate of cereal straw as affected by soil placement. **Aust. J. Soil Res.** v.46: p.152-160, 2008.
- DIETRICH, G. et al. Sugarcane mulch C and N dynamics during decomposition under different rates of trash removal. **Agriculture, Ecosystems and Environment.** v.243, p.123-131, 2017.
- DOUGLAS Jr. C. L. et al. Wheat straw composition and placement effects on decomposition in dryland agriculture of the Pacific Northwest. **Soil Science Society of America Journal.** v.44, p.833-837, 1980.
- FINDELING, A., P. et al. Modelling water, carbon and nitrogen dynamics in soil covered with decomposing mulch. **Eur. J. Soil Sci.** v.58, p.196-206, 2007.
- FREY, S. D., et al. Fungal translocation as a mechanism for soil nitrogen inputs to surface residue decomposition in a no-tillage agroecosystem. **Soil Biol. Biochem.** v.32, p.689-698, 2000.
- GUZMAN, J.; AL-KAISI, M.; PARKIN, T. Greenhouse gas emissions dynamics as influenced by corn residue removal in continuous corn system. **Soil Science Society of America Journal.** v.13, p.612-625, 2015.
- HALDE, C.; ENTZ, M.H. Plant species and mulch application rate affected decomposition of cover crop mulches used in organic rotational no-till systems. **Can. J. Plant Sci.** v.96, p.59-71, 2016.
- IQBAL, A. et al. Rain regime and soil type affect the C and N dynamics in soil columns that are covered with mixed-species mulches. **Plant Soil.** v.393, p. 319-334, 2015.
- IQBAL, A. et al. Tissue density determines the water storage characteristics of crop residues. **Plant Soil.** v.367, p. 285-299, 2013.

JENNY, H.; GESSEL, S. P.; BINGHAM, F. T. Comparative study of decomposition rates of organic matter in temperate and tropical regions. **Soil. Sci.** v.68: p.419-432, 1949.

LYNCH, M. J. et al. Decomposition, nitrogen and carbon mineralization from food and cover crop residues in the central plateau of Haiti. **Springerplus**, v.5, p.973-981, 2016.

MAHDAVI, S. M. et al. Coupled heat and moisture transfer and evaporation in mulched soils. **Catena**, v.151. p. 34-48, 2017.

PEREIRA, F. F. S. et al. Retenção de água em níveis de cobertura morta no feijoeiro irrigado em sistema de plantio direto. **Irriga.** v.20, p.557-569, 2015.

PERES, J. G.; SOUZA, C. F.; LAVORENTI, N. A. Avaliação dos efeitos da cobertura de palha de cana-de-açúcar na umidade e na perda de água do solo. **Engenharia Agrícola.** v.30, p.875-886, 2010.

PINHEIRO, P. L. **Interação entre remoção de palha e adubação nitrogenada sobre a volatilização de NH<sub>3</sub> e emissão de N<sub>2</sub>O na cultura da cana-de-açúcar.** 2018. 81p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2018.

RAMOS, N. P et al. Decomposição de palha de cana-de-açúcar recolhida em diferentes níveis após a colheita mecânica. **Pesq. Agropec. Bras.** v.51, p.1492-1500, 2016.

REDIN, M. et al. How the chemical composition and heterogeneity of crop residue mixtures decomposing at the soil surface affects C and N mineralization. **Soil Biol. Biochem.** v.78, p.65-75, 2014.

SANTOS, T. E. M.; SILVA, D. D.; MONTENEGRO, A. A. A. Temporal variability of soil water content under different surface conditions in the semiarid region of the Pernambuco state. **Brazilian Journal of Soil Science.** v.34, p.1733-1741, 2010.

SCHMATZ, R. et. al. Crop residue quality and soil type influence the priming effect but not the fate of crop residue C. **Plant Soil.** v.414, p.229–245, 2017.

SCHOMBERG, H. H.; J. L. STEINER AND P. W. UNGER. Decomposition and nitrogen dynamics of crop residues: residue quality and water effects. **Soil Science Society of America Journal** v.58: p.372–381, 1994.

SOIL SURVEY STAFF (2010). Keys to Soil Taxonomy, 11th ed. USDA, NRCS. Washington DC, United States Govt Printing Office. p. 346.

SOUSA Jr, J. G. de A. et al. Sugar cane straw left in the field during harvest: decomposition dynamics and composition changes. **Soil Res.** 2017.

THORBURN, P. J.; PROBERT, M. E.; ROBERTSON, F. A. Modelling decomposition of sugarcane surface residues with APSIM-Residue. **Field Crops Res.** v.70, p.223-232, 2001.

VARGAS, V. P. et al. Sugarcane crop residue increases N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> emissions under high soil moisture conditions, **Sugar Tech.** 16 (2) (2014) 174-179.

VASCONCELOS, A. L. S. et al. Greenhouse gas emission responses to sugarcane straw removal. **Biomass and Bioenergy**. v.113, p.15–21, 2018.

WHITTINGHILL, K. A. et al. Anthropogenic N Deposition Increases Soil C Storage by Decreasing the Extent of Litter Decay: Analysis of Field Observations with an Ecosystem Model. **Ecosystems**. v.15, p. 450–461, 2012.

WILLIAMS, A. et al. Establishing the relationship of soil nitrogen immobilization to cereal rye residues in a mulched system **Plant Soil**. v.426, p.95-107, 2018.

ZWIRTES, A. L. et al. Temperature changes in soil covered by black oat straw. **Pesq. agropec. bras.** v.52, p.1127-1130, 2017.

## SUPPLEMENTARY DATA

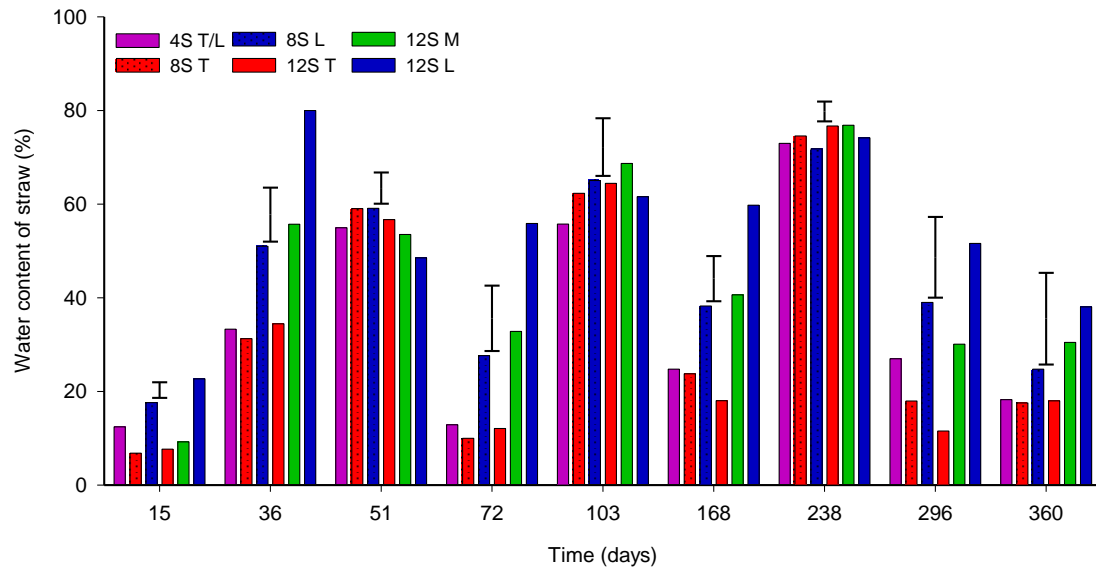


Fig. S1. Water content in the mulch straw layers (L: low, M: medium, T: top) (a) during the 360 days of experiment. The vertical bars on each evaluation date indicate the minimum significant difference between treatments (Tukey at  $P < 0.05$ ).



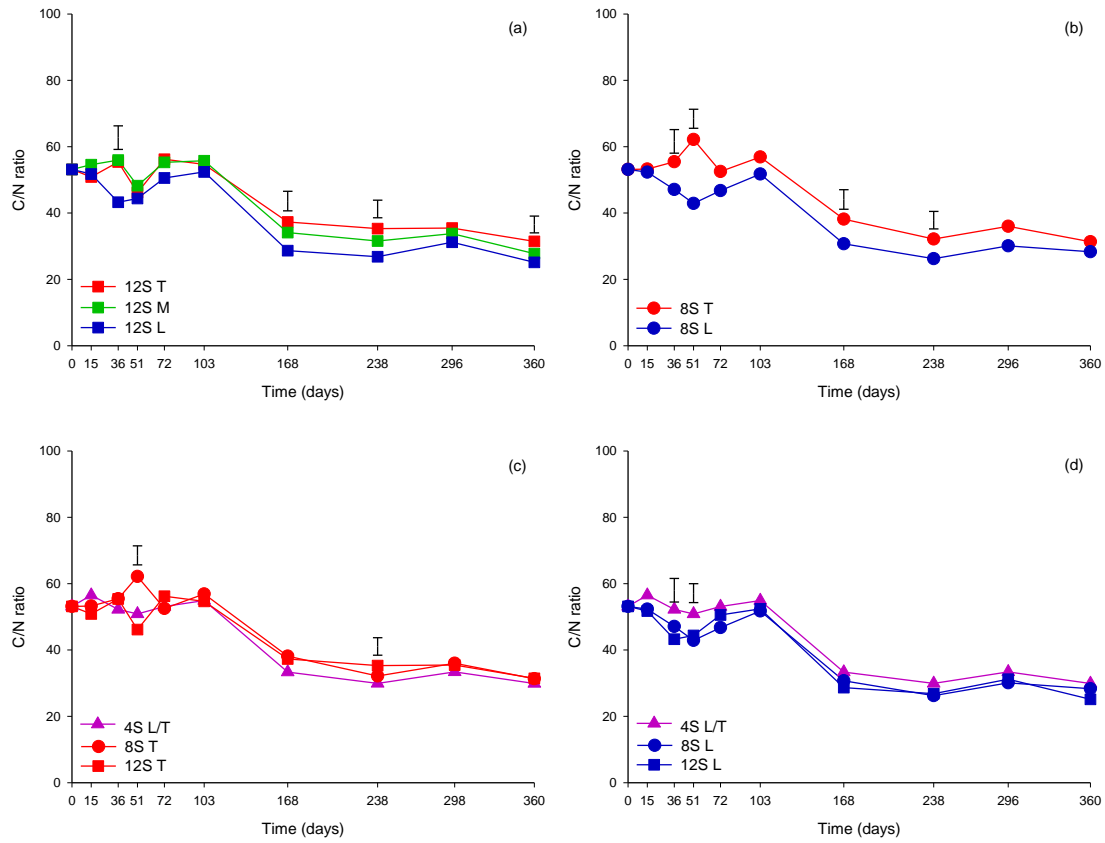


Fig. S2. C/N ratio of the mulch straw layers (L: low, M: medium, T: top) of 12 Mg ha<sup>-1</sup> (a) and 8 Mg ha<sup>-1</sup> (b) treatments and of the top (c) and low (d) mulch straw layers of the three treatments (4, 8 e 12 Mg ha<sup>-1</sup>) during the 360 days of experiment. The vertical bars in the graph indicate the minimum significant difference between treatments (Tukey at  $P < 0.05$ ).

Table S1. Results of analysis of variance (ANOVA) for the measured variables in mulch and soil.

Variables	Factors							
	Q <sup>a</sup>	N <sup>b</sup>	T <sup>c</sup>	Q x N	Q x T	N x T	Q x N x T	CV (%)
<b>Mulch</b>								
C remaining (% of initial)	0.3464 <sup>f</sup>	0.6711	<0.001	0.6739	0.3806	0.9877	0.8096	8,3
N remaining (% of initial)	0.6993	0.9940	<0.001	0.4343	0.0502	0.0247	0.9748	11,1
Water-soluble C remaining (% of initial)	<0.001	0.9378	<0.001	0.6704	0.0014	0.8727	0.9740	19,5
Water-soluble N remaining (% of initial)	<0.001	0.5869	<0.001	0.7383	0.8561	0.6045	0.9468	25.8
Thickness (cm)	<0.001	0.2470	<0.001	0.8388	<0.001	0.8303	0.9871	8,1
Water content (%)	<0.001	0.0113	<0.001	0.6908	<0.001	<0.001	0.9999	15,7
Soluble fraction remaining (% of initial)	0.2815	0.5541	<0.001	0.6283	0.6423	0.9924	0.7267	9.8
Cellulose remaining (% of initial)	0.4582	0.7573	<0.001	0.9292	0.6293	0.9686	0.9998	8.3
Hemicellulose remaining (% of initial)	<0.001	0.2983	<0.001	0.4462	0.0272	0.9343	0.9955	8.6
Lignin remaining (% of initial)	0.5469	0.9584	<0.001	0.4832	0.4843	0.9992	0.9510	9.8
LCI	<0.001	0.6231	<0.001	0.1874	0.2079	0.9895	0.8350	10.3
C <sub>0</sub> (Mg ha <sup>-1</sup> )	<0.001	0.9527		0.2785				1,9
k (dias <sup>-1</sup> )	0.4149	0.6592		0.7547				11,3
t ½ (dias <sup>-1</sup> )	0.3178	0.8552		0.8527				11,4
	Q	D <sup>d</sup>	I <sup>e</sup>	Q x D	Q x I	D x I	Q x D x I	CV (%)
<b>Soil</b>								
Water content (g cm <sup>-3</sup> )	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.0831	0.9997	5.4
Temperature (°C)	<0.001	<0.001	<0.001	0.5074	<0.001	0.0194	1.0000	2.3

<sup>a</sup> Q: trash initial quantity (4, 8 or 12 Mg DM ha<sup>-1</sup>). <sup>b</sup> N: nitrogen fertilization (0 and 100 kg N ha<sup>-1</sup>). <sup>c</sup> T: time of decomposition (between 0 and 360 days). <sup>d</sup> D: Soil water content (2.5 and 7.5 cm) and temperature (surface, 2.5 and 7.5 cm). <sup>e</sup> I: mean of collection intervals (0-15, 16-36, 37-51, 52-72, 73-103, 104-168, 169-238, 239-296 and 297-360 days). <sup>f</sup> The factors and their interactions are considered significant in *P*-values <0.05.

Table S2. Results of analysis of variance (ANOVA) for the measured variables in mulch straw layers.

Variables	Factors							CV (%)
	L <sup>a</sup>	N <sup>b</sup>	T <sup>c</sup>	L x N	L x T	N x T	L x N x T	
C remaining (% of initial)	<0.001 <sup>d</sup>	0.9132	<0.001	0.8909	<0.001	0.9642	0.9795	10,1
N remaining (% of initial)	<0.001	0.5225	<0.001	0.6078	<0.001	0.0020	0.9935	12,6
C/N ratio	<0.001	0.5841	<0.001	0.0340	<0.001	<0.001	0.3955	11,5
Water-soluble C remaining (% of initial)	<0.001	0.8874	<0.001	0.9467	<0.001	0.9059	0.9991	23,5
Water-soluble N remaining (% of initial)	<0.001	0.3506	<0.001	0.5988	0.2595	0.7939	0.9803	30,9
Water content (%)	<0.001	0.0297	<0.001	0.9592	<0.001	0.0027	1.0000	21,6
Soluble fraction remaining (% of initial)	0.0019	0.6946	<0.001	0.9335	<0.001	0.9981	0.9621	11.9
Cellulose remaining (% of initial)	<0.001	0.8723	<0.001	0.8513	<0.001	0.9563	0.9966	9.6
Hemicellulose remaining (% of initial)	<0.001	0.5606	<0.001	0.6141	0.0020	0.9964	0.9987	10.5
Lignin remaining (% of initial)	0.0996	0.8527	<0.001	0.8243	<0.001	0.9999	0.9980	13.1
LCI	<0.001	0.8062	<0.001	0.5678	0.0226	0.9997	0.9668	12.4
C <sub>0</sub> (Mg ha <sup>-1</sup> )	0.0010	0.9760		0.6823				2.85
k (dias <sup>-1</sup> )	<0.001	0.8245		0.7319				12.58
t ½ (dias <sup>-1</sup> )	<0.001	0.9530		0.9511				12.20

<sup>a</sup> L: mulch trash layers (4, 8T, 8L, 12T, 12M and 12L). <sup>b</sup> N: nitrogen fertilization (0 and 100 kg N ha<sup>-1</sup>). <sup>c</sup> T: time of decomposition (between 0 and 360 days). <sup>d</sup> The factors and their interactions are considered significant in *P*

#### 4 - DISCUSSÃO GERAL

Os resultados deste estudo demonstram que a adubação nitrogenada e a quantidade de palha presente na superfície do solo, que determina a espessura do *mulch*, não afetam a decomposição, liberação de carbono e nitrogênio e degradação dos carboidratos estruturais (celulose, hemicelulose e lignina) da palha. Esse resultado permite inferir que a readequação da adubação nitrogenada em relação à espessura do *mulch* não é necessária. Nota-se também que existe um gradiente vertical de decomposição de acordo com a localização da camada de palha no interior do *mulch*. Dessa forma, compreende-se que os processos acima mencionados não ocorrem de forma homogênea no interior do *mulch* e são regidos principalmente pelo comportamento da água na palha.

A umidade média dos *mulches* aumenta conforme a espessura e é maior na camada inferior, além de diminuir conforme a distância da camada de palha do solo. Logo, a maior umidade das camadas inferiores dos *mulches* mais espessos não limita a decomposição. Por outro lado, a menor umidade das camadas superiores destes *mulches* limita a decomposição. Portanto, há uma compensação entre as camadas inferiores e superiores dos *mulches*, o que torna semelhante à decomposição em diferentes espessuras de *mulch*. Tal resultado indica que as condições edafoclimáticas locais podem fornecer informações importantes que podem auxiliar na indicação da quantidade de palha a ser retirada da superfície do solo.

Concluindo, como forma de aprimorar o conhecimento sobre essa nova técnica, se faz necessário estudar o contato solo/*mulch* e o impacto da condição climática local no gradiente vertical de decomposição do *mulch* de diferentes espessuras, bem como, identificar os organismos que atuam na decomposição em cada condição no interior do *mulch*. Além disso, é importante conhecer o efeito de diferentes formas de adubação nitrogenada na disponibilidade de nitrogênio em cada camada de palha do *mulch*, e como esse nitrogênio pode acelerar a atividade microbiana e alterar a taxa de decomposição da respectiva camada e do *mulch*.

## 5 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANGERS, D. A.; RECOUS, S Decomposition of wheat straw and rye residues as affected by particle size. **Plant and Soil**. v.189, p. 197-203, 1997.
- CARVALHO, J. L. N. et al. Agronomic and environmental implications of sugarcane straw removal: a major review. **Global Change Biology Bioenergy**.
- CHERUBIN, M. R. et al. Crop residue harvest for bioenergy production and its implications on soil functioning and plant growth: a review. **Scientia Agricola**. *In press*. 2017.
- CONAB, 2018. **1º Levantamento de Safra 2018/19**. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar/item/7703-1-levantamento-safra-2018-19> > Acesso em 12 de junho de 2018.
- DIETRICH, G. et al. Sugarcane mulch C and N dynamics during decomposition under different rates of trash removal. **Agriculture, Ecosystems and Environment**. v.243, p. 123-131, 2017.
- GASPARIN, E. et al. Temperatura no perfil do solo utilizando duas densidades de cobertura e solo nu. **Acta Scientiarum. Agronomy**. v.27, p. 107-117, 2005.
- GOLDEMBERG J, et al. Meeting the global demand for biofuels in 2021 through sustainable land use change policy. **Energy Policy**. v. 69, p.14–18, 2014.
- HADAS, A. et al. Rates of decomposition of plant residues and available nitrogen in soil, related to residue composition through simulation of carbon and nitrogen turnover. **Soil Biol. Biochem**. v.36, p. 255-266, 2004.
- IQBAL, A. et al. Tissue density determines the water storage characteristics of crop residues. **Plant Soil**. v.367, p. 285-299, 2013.
- LEAL, M. R. L. V. et al. Sugarcane straw availability, quality, recovery and energy use: A literature review. **Biomass and Bioenergy**. v.53, p. 11-19, 2013.
- NUNES, R. M. et al. Resíduos agroindustriais: potencial de produção do etanol de segunda geração no Brasil. **Revista Liberato**. v.14, p. 113-238, 2013.
- PERES, J. G.; SOUZA, C. F.; LAVORENTI, N. A. Avaliação dos efeitos da cobertura de palha de cana-de-açúcar na umidade e na perda de água do solo. **Engenharia Agrícola**. v.30, p.875-886, 2010.
- RAMOS, N. P et al. Decomposição de palha de cana-de-açúcar recolhida em diferentes níveis após a colheita mecânica. **Pesq. Agropec. Bras**. v.51, p.1492-1500, 2016.
- THORBURN, P. J.; PROBERT, M. E.; ROBERTSON, F. A. Modelling decomposition of sugar cane surface residues with APSIM-Residue. **Field Crops Research**, v.70, p.

223-232, 2001.

VASCONCELOS, A. L. S. et al. Greenhouse gas emission responses to sugarcane straw removal. **Biomass and Bioenergy**. v.113, p.15-21, 2018.

YAMAGUCHI, C. S. et al. Sugarcane straw decomposition and carbon balance as a function of initial biomass and vinasse addition to soil surface. **Bragantia**, v.76, p. 135-144, 2017.