

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

Marta Rodrigues da Rocha

**RETENÇÃO E ARMAZENAMENTO DA ÁGUA DA CHUVA NA
CAMADA EVAPORATIVA DO SOLO COM E SEM RESÍDUOS
VEGETAIS**

Santa Maria, RS.
2016

Marta Rodrigues da Rocha

**RETENÇÃO E ARMAZENAMENTO DA ÁGUA DA CHUVA NA CAMADA
EVAPORATIVA DO SOLO COM E SEM RESÍDUOS VEGETAIS**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de Concentração em Engenharia de Água e Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de **Doutor em Engenharia Agrícola**.

Orientador: Prof. PhD. Reimar Carlesso

Santa Maria, RS.
2016

Marta Rodrigues da Rocha

**RETENÇÃO E ARMAZENAMENTO DA ÁGUA DA CHUVA NA CAMADA
EVAPORATIVA DO SOLO COM E SEM RESÍDUOS VEGETAIS**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de Concentração em Engenharia de Água e Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de **Doutor em Engenharia Agrícola**.

Aprovado em 30 de agosto de 2016:

Reimar Carlesso, PhD. (UFSM)
(Presidente/ Orientador)

Mirta Teresinha Petry, Dr. (UFSM)

Flávio Luiz Foletto Eltz, PhD. (UFSM)

Juliano Dalcin Martins, Dr. (IFRS, Ibirubá)

Cleudson José Michelin, Dr. (IFFar, São Vicente do Sul)

Santa Maria, RS
2016

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Tarso e Marcia, pelo amor incondicional, incentivo e paciência imensurável, dedico.

AGRADECIMENTOS

Ao povo brasileiro, que mantém as instituições públicas de ensino e pesquisa.

À Universidade Federal de Santa Maria, instituição pública, gratuita e de qualidade e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola pela infraestrutura e apoio para o desenvolvimento deste trabalho.

A CAPES, pela concessão da bolsa de estudo.

Aos professores orientadores Mirta Teresinha Petry e Reimar Carlesso, pela confiança, orientação e amizade durante o curso.

Ao professor Luís Santos Pereira e toda a sua equipe da Universidade Técnica de Lisboa, pelos ensinamentos e experiências compartilhadas.

Ao professor Flavio Eltz e Rosangela Eltz, pela amizade e carinho.

Aos professores Cleudson José Michelin e Juliano Dalcin Martins, pelas correções e sugestões no trabalho de pesquisa.

Aos colegas e amigos do grupo de pesquisa do Sistema Irriga: Jonas Hencks, Laudenir Basso, Henrique Fries, Lorenzo Rolin, Rafael Aita, Tiago Grindi, Viviane de Ávila, Junior Kunz, José Nilton Nunes, Geraldo Rodrigues, Maria Soledad Armoa, Gabriel Spolaor e Bernardo Dalmolin, pela colaboração na condução dos experimentos, parceria e amizade.

Aos professores do Colégio Politécnico Cícero Nogueira, Hercules Nogueira e Luciano Pes e ao Departamento de Solos, ambos da UFSM, pelo empréstimo das máquinas agrícolas e demais equipamentos para a realização dos experimentos.

Aos meus pais, Tarso e Marcia da Rocha, e avós, Terezinha de Jesus e Darcy Rodrigues da Rocha, Aura Farias da Rocha (*in memoriam*) e Cyrineu José da Rocha (*in memoriam*), pelos ensinamentos, amor e exemplo de honestidade, determinação e responsabilidade.

Ao meu irmão, Bruno Rodrigues da Rocha, pela colaboração com as atividades de campo, pela paciência e compreensão pelos momentos de ausência.

Aos meus tios e primos pela amizade, cumplicidade e união.

Ao meu namorado, Rafael Rieger Ramos, pelo amor, amizade, compreensão e parceria em todos os momentos.

...o meu sincero muito obrigada!

RESUMO

RETENÇÃO E ARMAZENAMENTO DA ÁGUA DA CHUVA NA CAMADA EVAPORATIVA DO SOLO COM E SEM RESÍDUOS VEGETAIS

AUTORA: MARTA RODRIGUES DA ROCHA
ORIENTADOR: REIMAR CARLESSO

A evaporação da água (E_s) é um dos principais componentes do balanço de água e energia da superfície do solo. Medidas precisas da dinâmica da E_s requerem o entendimento da participação da água e da energia na interface superfície e atmosfera. A E_s acumulada é uma função do tempo, da textura do solo, da presença ou não de resíduos vegetais na superfície do solo, das plantas e estádios de desenvolvimento, da ocorrência de chuvas e irrigações, com forte influência da demanda evaporativa da atmosfera. Assim, o objetivo desse trabalho foi quantificar o efeito do resíduo vegetal do sistema plantio direto nos componentes do balanço hídrico do solo em áreas irrigadas e de sequeiro e avaliar a dinâmica da água retida pela palha após o umedecimento pela chuva ou irrigação. Dois experimentos foram conduzidos, em área experimental do Departamento de Engenharia Rural, da Universidade Federal de Santa Maria. O experimento I foi conduzido entre os anos de 2013 e 2014, sob uma cobertura móvel, em parcelas de 9 m². Utilizou-se um delineamento bi-fatorial, com três repetições, onde o fator A foi constituído de três níveis de cobertura do solo: 0, 2 e 4 t ha⁻¹ de resíduos de aveia preta. O fator B foi constituído de três lâminas de irrigação. Utilizou-se um sistema de micro aspersão, com taxa de aplicação de 8 mm h⁻¹ e pressão de serviço de 100 kPa. Após cada evento de irrigação, uma amostra de 0,09 m² de resíduos vegetais era coletada e pesada, em intervalos de 0, 3, 6 e 24 horas após a irrigação, à fim de medir a água retida pelos resíduos. O conteúdo de água no solo foi monitorado em cada unidade experimental, até a profundidade de 85 cm, utilizando-se um conjunto de sensores FDR. O balanço hídrico do solo foi determinado pela relação entre a lâmina aplicada, subtraída da lâmina infiltrada, a água retida pelo resíduo vegetal e da lâmina evaporada, após cada evento de irrigação. O experimento II foi conduzido no ano agrícola de 2015/2016, utilizando microlisímetros (ML), com dimensões de 10 cm de diâmetro e 10 cm de altura. Utilizou-se os mesmos níveis de cobertura do experimento I, com três repetições. Um conjunto de ML foi instalado em uma área em pousio com chuva natural e um segundo conjunto foi instalado em uma área com soja, também com chuva natural. Os ML foram pesados em balança de precisão, diariamente, às 18 horas, com exceção dos dias onde se registou chuva. A E_s da água nos ML foi determinada pela razão entre a diferença entre a massa dos mesmos num intervalos de 24 horas e a área do ML. Resultados indicaram que o aumento na quantidade de resíduos de 2 para 4 t ha⁻¹ não incrementou a interceptação e armazenamento de água pelos resíduos vegetais. A taxa diária de evaporação foi mais influenciada pela demanda evaporativa da atmosfera do que pela presença de resíduos culturais na superfície do solo, que está relacionado com a quantidade de resíduo. Os resíduos vegetais tem importância quanto ao efeito na disponibilidade de água no solo em todo o ciclo vegetativo.

Palavras-chave: Evaporação. Resíduos culturais. Balanço hídrico do solo. Microlisímetros

ABSTRACT

RETENTION AND RAINWATER STORAGE IN EVAPORATIVE SOIL LAYER WITH AND WITHOUT PLANT RESIDUES

AUTHOR: MARTA RODRIGUES DA ROCHA
ADVISOR: REIMAR CARLESSO

The water evaporation (E_s) is one of the main components of water balance and energy of ground surface. Precise measurements of the E_s dynamics require the understanding of water and energy partition on the interface soil surface and atmosphere. The E_s accumulated is a function of time, soil texture, and presence or absence of crop residues on soil surface, plants and its stage of development, rainfall and irrigation distribution, with strong influence of the atmosphere evaporative demand. This paper aims to quantify the effect of crop residues in no-tillage system on the components of soil water balance on irrigated and non-irrigated areas and evaluate the dynamic of retained water by the straw after the wetting cycles due to rainfall or irrigation events. Two experiments were carried out, on the experimental area of Department of Rural Engineering of Federal University of Santa Maria. The experiment I was carried out from 2013 to 2014, under a mobile rainout shelter, in 9 m² plots. A bi-factorial experimental design was used, with three replications, where the factor A was the three soil covering levels: 0, 2 e 4 t ha⁻¹ of black oat residues. The factor B was the three irrigation levels. It was used a micro sprinkling system with an application rate of 8 mm h⁻¹ and a service pressure of 100 kPa. After every irrigation event, a sample of 0,09 m² of the crop residues was collected and weighted, in a time interval of 0, 3, 6, 24 hours after the irrigation, in order to measure the residues retained water. The soil water content was monitored in all experimental units, to a depth of 85 cm, using a set of FDR sensors. The soil water balance was determined by the relation between irrigation depth applied, subtracted the infiltrated irrigation depth, the water retained by the residues and the evaporated irrigation depth, after every irrigation event. The experiment II was carried out during 2015/2016 crop season, using microlysimeters (ML), with dimensions of 10 cm diameter and 10 cm height. It was used the same treatment levels of the experiment I, with three replications. A set of ML was installed in a fallow area with natural rainfall and a second set was installed in an area with soybean, both submitted to natural rainfall. The MLs were weighted, daily, at 6 p.m., with the exception of the days with rainfalls. The E_s of the ML was determined by the reason of the difference between the mass of ML measured at time intervals of 24h and ML area. The results indicated that the increase on the quantity of residues from 2 to 4 t ha⁻¹ did not improve the water interception and storage by residues. The evaporation daily percentage was more influenced by atmosphere evaporative demand than by the amount of crop residues on soil surface. Crop residues are important to preserve the soil moisture and have direct impact on soil water availability and the soil water balance during the entire crop cycle duration.

Key-words: Evaporation. Crop residues. Soil water balance. Microlysimeter

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

E_s	Evaporação da água do solo
T	Transpiração
ET_o	Evapotranspiração de referência
T_p	Temperatura do ar
WS	Velocidade do vento
RH	Umidade relativa do ar
Z_e	Espessura da camada evaporável
REW	Água prontamente evaporável
TEW	Total de água evaporável
E_1	Evaporação da água do solo no estádio “1”
E_2	Evaporação da água do solo no estádio “2”
IAF	Índice de área foliar
ET_c	Evapotranspiração da cultura
P	Chuva
I	Irrigação
ΔASW	Variação no conteúdo de água no solo
D	Drenagem
R	Escoamento superficial
TDR	Reflectometria de domínio de tempo
FDR	Reflectometria de domínio de frequência
LE	Fluxo de calor latente
R_n	Radiação líquida incidente
G	Fluxo de calor do solo
H	Fluxo de calor sensível
K_c	Coefficiente de cultivo
K_s	Coefficiente de stress (redução do K_c)
K_{cb}	Coefficiente de cultura basal
K_e	Coefficiente de evaporação do solo
K_c dual	Coefficiente de cultura dual
D_e	Lâmina acumulada evaporada
K_r	Coefficiente de redução da evaporação
CC	Capacidade de campo
PMP	Ponto de murcha permanente
f_w	Fração de solo molhado
f_{we}	Fração de solo não coberta pelo resíduo vegetal
f_c	Fração de solo coberto pelo dossel da cultura
MS	Massa seca
CUC	Coefficiente de uniformidade de Christiansen's
ML	Microlisímetro
W_{palha}	Conteúdo de água interceptada pelos resíduos vegetais
W_{solo}	Conteúdo de água no solo
ET_o hourly	Evapotranspiração de referência horária
r_a	Resistência aerodinâmica
r_s	Resistencia do dossel

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Conteúdo de água na capacidade de campo (θ_{CC}) e ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), distribuição granulométrica e classe textural nas diferentes camadas do perfil do solo.	32
Tabela 2 – Lâmina irrigada nos 3 grupos (menor, intermediária e maior) nas respectivas datas de avaliação.	33
Tabela 3 – Evaporação acumulada de água do solo (E_s), evapotranspiração de referência (ET_o) e razão E_s/ET_o , observada durante os diferentes ciclos de secagem do solo na área em pousio, entre Novembro de 2015 e Abril de 2016.	56
Tabela 4 – Evaporação acumulada de água do solo (E_s), evapotranspiração de referência (ET_o), razão E_s/ET_o observada durante os diferentes ciclos de secagem do solo na área cultivada com soja, entre Novembro de 2015 e Abril de 2016.	61

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Função geral para o coeficiente de evaporação da água no solo (K_r), para o modelo linear de dois estádios de evaporação em solos sem cobertura e sem cultivo. (Adaptado de Allen et al., 1998). Onde: CC – capacidade de campo; PMP – ponto de murcha permanente; REW – água prontamente evaporável; TEW – total de água evaporável. 20
- Figura 2 – Croqui do experimento I, com os três níveis de cobertura (0; 2 e 4 t ha⁻¹ de massa seca de aveia preta) sob as três lâminas aplicadas (maior, intermediária e menor). Cada unidade experimental com 9 m² (3 x 3 m). 33
- Figura 3 – Aveia preta em estágio de pleno florescimento (06/09/2013), com 4 t ha⁻¹ (a) e 2 t ha⁻¹ (b) de massa seca. 34
- Figura 4 – Coleta dos resíduos vegetais com auxílio do quadro amostral de 0,30 x 0,30 m (03/12/2013). 35
- Figura 5 – Imagem da cobertura do solo nos tratamentos 2 (a) e 4 (b) t ha⁻¹ de MS 12/12/2013 37
- Figura 6 – Detalhe do microlisímetro, mostrando o tecido fixado com fita adesiva e do copo coletor, em PVC (a), inserido no solo dentro do envelope (b), ML com 4 t ha⁻¹ de resíduo vegetal fixado na superfície (c). 39
- Figura 7 – Variação diária da evapotranspiração de referência (PM-ET_o) e dias com precipitação pluvial durante o período de execução do experimento I, de 14/11/2013 a 14/01/2013 (a) e do experimento II, de 15/11/2015 a 10/04/2016 (b). Santa Maria, RS, 2016. 43
- Figura 8 – Relação entre a radiação solar incidente (R_s) e a evapotranspiração de referência estimada pelo método de Penman-Monteith (PM-ET_o) para os experimentos I, de 14/11/2013 a 14/01/2013 (a) e do experimento II, de 15/11/2015 a 10/04/2016 (b). Santa Maria, RS, 2016. 44
- Figura 9 – Efeito dos resíduos culturais na variação do armazenamento de água no solo (0 - 25 cm) entre 14 de Novembro de 2013 e 14 de Janeiro de 2014, nas diferentes lâminas de irrigação aplicadas: (a) menor, (b) intermediária e (c) maior. A linha contínua representa a lâmina armazenada na capacidade de campo (—) e a linha tracejada é a lâmina armazenada no ponto de murcha permanente (---). 46
- Figura 10 – Efeito de resíduos culturais na superfície do solo na variação da lâmina de água armazenada na camada de 0-10 cm do perfil do solo para o experimento I. A linha horizontal tracejada corresponde à lâmina de água armazenada na Capacidade de Campo (CC). As barras verticais correspondem a evapotranspiração de referência (ET_o) diária para 47

quatro ciclos de secagem.

Figura 11 – Dinâmica da água nos resíduos vegetais em um dia de avaliação, às 9 (antes da irrigação), 10 (logo após a irrigação), 13 e 16 h (3 e 6 h após a irrigação, respectivamente) nos dois manejos de cobertura do solo (2 e 4 t ha⁻¹ de MS) e nas três lâminas irrigadas. As linhas verticais sobre as barras representam o desvio padrão em relação à média das observações. 48

Figura 12 – Relação entre as lâminas irrigadas e a água infiltrada (W_{solo}), retida pelos resíduos (W_{palha}) e evaporada (E_s) para o solo com 2 e 4 t ha⁻¹ de resíduos culturais na superfície do solo (a) e solo descoberto (b). As linhas verticais representam o desvio padrão entre as médias dos tratamentos. 51

Figura 13 – Relação entre a lâmina aplicada e o balanço hídrico do solo, para 2 e 4 t ha⁻¹ de resíduos na superfície. 52

Figura 14 – Evaporação (E_s) diária e acumulada da água do solo nos tratamentos 0; 2 e 4 t ha⁻¹ de resíduos na superfície do solo, para diferentes ciclos de secagem do solo em uma área em pousio e a evapotranspiração de referência (ET_o). 57

Figura 15 – Evaporação (E_s) diária e acumulada da água do solo nos tratamentos 0; 2 e 4 t ha⁻¹ de resíduos na superfície do solo, para diferentes ciclos de secagem do solo em uma área cultivada com soja e a evapotranspiração de referência (ET_o). 60

Figura 16 – Índice de área foliar (IAF) da cultura da soja durante o ciclo de desenvolvimento. 62

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	OBJETIVOS.....	16
2.1	OBJETIVO GERAL.....	16
2.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	16
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
3.1	PRINCÍPIOS FÍSICOS DA EVAPORAÇÃO DA ÁGUA.....	18
3.2	FATORES QUE AFETAM A EVAPORAÇÃO DA ÁGUA DO SOLO.....	21
3.3	DINÂMICA DA ÁGUA NOS RESÍDUOS VEGETAIS.....	23
3.4	DETERMINAÇÃO DA EVAPORAÇÃO.....	25
3.4.1	Método do balanço hídrico do solo.....	25
3.4.2	Razão de Bowen ou método do balanço de energia.....	26
3.4.3	Lisimetria.....	27
3.4.4	Métodos empíricos ou semi-empíricos.....	29
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	33
4.1	EXPERIMENTO I – DINÂMICA DA ÁGUA NOS RESÍDUOS CULTURAIS EM UM SISTEMA IRRIGADO.....	33
4.2	EXPERIMENTO II – EVAPORAÇÃO DA ÁGUA DO SOLO COM MICROLISÍMETROS EM POUSIO E SOB O CULTIVO DE SOJA.....	39
4.3	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	42
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
5.1	CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS (EXPERIMENTOS I E II)	44
5.2	EXPERIMENTO I – DINÂMICA DA ÁGUA NOS RESÍDUOS CULTURAIS EM UM SISTEMA IRRIGADO.....	46
5.2.1	Efeito de resíduos culturais no conteúdo de água no solo.....	46
5.2.2	Efeito de resíduos culturais na interceptação da lâmina irrigada.....	49
5.3	EXPERIMENTO II – EVAPORAÇÃO DA ÁGUA DO SOLO COM MICROLISÍMETROS EM POUSIO E SOB O CULTIVO DE SOJA.....	54
5.3.1	Evaporação da água do solo sem e com resíduos culturais.....	55
5.3.2	Efeito do dossel das plantas na evaporação.....	59
6	CONCLUSÕES.....	65
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	66
	ANEXO A	75
	ANEXO B.....	76
	ANEXO C.....	77
	ANEXO D.....	78

1 INTRODUÇÃO

A água é essencial para manter a produção na agricultura e outros processos de vida no planeta Terra. Porém, sua disponibilidade contínua e com qualidade e quantidade suficiente para a produção de alimentos, fibras e combustível para uma população em contínuo crescimento é incerta. O consumo de água na indústria e em nível doméstico tem crescido, sobretudo devido ao aumento na qualidade de vida da população em geral.

A agricultura irrigada é considerada a maior consumidora de água no mundo, estimada em 70% (UNESCO, 2012). A distribuição irregular das chuvas durante os ciclos de desenvolvimento das culturas anuais, no Sul do Brasil tem estimulado agricultores a instalarem sistemas de irrigação.

Um aumento na conservação da água no solo poderia reduzir os custos com a irrigação, além de disponibilizar mais água para outros usos que não a agricultura, uma vez que a atividade agrícola tem sido pressionada pela sociedade civil, no sentido de melhorar o uso da água e preservar os recursos ambientais.

Aumentar o armazenamento da água no solo deve ser uma das principais preocupações do manejo da agricultura, principalmente em regiões secas ou com distribuição irregular das chuvas. A evaporação da água da camada superficial do solo é um dos fatores que mais impacta o balanço de água do solo próximo à superfície. Estima-se que cerca de 30% de toda a água precipitada sobre a superfície ou derivada via irrigação é perdida por evaporação. De acordo com Jalota e Prihar (1990), muitos estudos foram conduzidos para compreender o processo de evaporação da água do solo. Dentre as alternativas estudadas para a redução da evaporação de solos agrícolas esta a manutenção de resíduos culturais na superfície do solo, sendo considerado como promissor e economicamente viável.

O Sul do Brasil possui uma área cultivada com plantio direto, segundo Scoppel et al. (2004), superior a 36 milhões de hectares, isto é, mais de 70% da área cultivada. Os benefícios da manutenção dos resíduos vegetais na superfície do solo foram relativamente bem documentados por Díaz-Zorita et al. (2002), Fabrizzi et al. (2005), Machado e Silva (2001) especialmente pela redução da evaporação, incremento na disponibilidade de água no solo, incremento na ciclagem de

nutrientes e controle da erosão (CARLESSO et al., 2011). A manutenção de resíduos de culturas como cobertura do solo pode ser utilizado para reduzir a evaporação do solo, aumentar a água do solo, diminuir as variações de temperatura do solo diurnas e aumentar a condutividade hidráulica do solo saturado (BRISTOW, CAMPELL, 1986). A disponibilidade de água no solo às plantas está relacionada à fatores ambientais (chuva, evapotranspiração, tipo de solo e topografia), porém, pode ser influenciada por práticas de manejo, como a irrigação, época de semeadura ou, especificamente, através de práticas de conservação da água, como a manutenção de resíduos vegetais na superfície. Entretanto, a conservação da água no solo devido à manutenção dos resíduos vegetais na superfície necessita ser mais entendida, especialmente na relação quantidade de resíduos vegetais na superfície e seu efeito na redução da evaporação da água no solo (KLOCKE et al., 2009). De acordo com Dalmago et al. (2010), a maioria dos estudos que atestaram um aumento na umidade do solo em plantio direto não avaliaram diretamente a evaporação, baseando-se apenas na medição da umidade do solo em momentos pontuais. Jalota e Prihar (1990) salientam que há um padrão de tempo definido no qual a evaporação num solo com resíduos vegetais na superfície é menor, em relação ao solo nu, depois de umedecido, entretanto, à medida que a umidade diminui, a tendência se inverte, ou seja, o benefício da cobertura decresce, pois a água retida pelo resíduo vegetal segue evaporando por horas ou dias, desde que haja energia disponível para a evaporação.

Estudos envolvendo a dinâmica da água retida pelo resíduo vegetal são importantes, porque a água da chuva ou irrigação somente poderá ser contabilizada no balanço hídrico do solo depois de infiltrada. Segundo van Donk et al. (2010), a quantificação do balanço de água no solo resultante da manutenção de resíduos na superfície são, na essência, baseados em cultivos não irrigados, sendo que os resultados podem ser diferentes para sistemas irrigados, principalmente na irrigação por aspersão. Portanto, estudos complementares são necessários para quantificar o efeito dos resíduos vegetais no balanço hídrico do solo, especialmente na agricultura irrigada. Na irrigação por aspersão, a exemplo do pivô central, as irrigações são aplicadas em intervalos de 2 a 10 dias, fato que pode incrementar as perdas por evaporação, inclusive nos solos com resíduos vegetais ou com cobertura vegetal ativa.

A quantidade de água retida pelos resíduos vegetais depende do tipo e quantidade, do grau de decomposição e das condições climáticas após uma chuva ou irrigação que umedeça completamente a superfície do solo. Em solos úmidos e sem cobertura vegetal os fatores meteorológicos são os principais responsáveis pela evaporação da água (RITCHIE, 1972; SULEIMAN, RITCHIE, 2003; ALLEN et al., 1998; van DONK et al., 2010). Em solos com cobertura, ao contrário, os resíduos vegetais protegem o solo contra a radiação solar e o movimento de ar junto à superfície é reduzido. Entretanto, a água retida pelo resíduo vegetal, assim como a umidade presente logo abaixo do resíduo continua evaporando lentamente, até vários dias após o seu umedecimento, fazendo com que as perdas por evaporação em solos com a presença de resíduos vegetais sejam, muitas vezes, maiores que solos descobertos (van DONK et al., 2010; DALMAGO et al., 2010).

Trabalhos publicados envolvendo o efeito do resíduo vegetal no balanço hídrico do solo em áreas irrigadas são relativamente reduzidos e com resultados conflitantes, por terem sido conduzidos com chuvas naturais e não em condição de irrigação, situação que pode proporcionar respostas diferentes. Assim, o objetivo desse trabalho foi o de quantificar o efeito da cobertura do solo por resíduos vegetais nos componentes do balanço hídrico do solo em áreas irrigadas e com chuvas naturais e avaliar a dinâmica da água retida nos resíduos vegetais após o umedecimento pela chuva ou irrigação.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo desse trabalho foi avaliar o efeito de resíduos vegetais na superfície do solo nos componentes do balanço hídrico, particularmente na retenção e evaporação da água de um solo irrigado utilizando diferentes lâminas de irrigação por aspersão e, avaliar evaporação da água na superfície de solos utilizando microlisímetros, com e sem resíduos vegetais.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Quantificar a variação no balanço hídrico da camada superficial do solo e nos resíduos vegetais com e sem resíduo vegetal na superfície do solo;
- Identificar a influência de diferentes lâminas de irrigação na evaporação, armazenamento e infiltração de água em solo com e sem resíduo vegetal na superfície;
- Quantificar evaporação direta da água da camada superficial do solo com microlisímetros em situação de solo em pousio e durante o ciclo de desenvolvimento da cultura da soja.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Um aspecto importante na produção agrícola é determinar a campo as necessidades hídricas de plantas (SANTOS et al., 2000). É fundamental que estudos do balanço hídrico das culturas, onde é quantificada a evaporação no solo, sejam realizados, buscando com isso a aumentar a eficiência do uso da água pelos cultivos (FLUMIGNAN et al., 2012). Ainda, segundo Pereira (2007), o conhecimento do balanço hídrico do solo na zona explorada pelas raízes é importante para uma boa gestão da água em irrigação.

A evapotranspiração é função dos elementos meteorológicos, do solo e da planta (LEMON et al., 1956). A evapotranspiração é a soma da evaporação, que é a perda da água pelo solo, com a transpiração, que é a perda da água pelas plantas; ambos são processos dinâmicos e ocorrem simultaneamente. Quando a cobertura do solo é completa, a evapotranspiração de referência é condicionada principalmente pelos elementos meteorológicos. Dentre esses elementos, a radiação líquida é a que exerce maior influência na taxa de evapotranspiração dos cultivos. (PENMAN, 1956). Separar a ação de cada um desses elementos é difícil, pois os mesmos agem simultaneamente (VILLA NOVA, 1987; VILLA NOVA, REICHARDT 1989); de modo geral, considerando que a umidade do solo não é um fator restritivo, quanto maior a disponibilidade de energia solar, de temperatura do ar e de velocidade do vento e menor a umidade relativa do ar, maior deverá ser a demanda evaporativa da atmosfera, alterando a taxa de evapotranspiração.

A manutenção da palha sobre a superfície do solo, aliada ao não revolvimento do solo, podem modificar as características físicas do mesmo, causando alterações no balanço hídrico (OLIVEIRA, CASTRO, GOLDENFUM, 2010). O efeito da palha em cobertura depende de fatores como da taxa de cobertura, da uniformidade de distribuição da mesma e da quantidade adicionada ao solo, além do tipo e da cor, que variam com a exposição ao ambiente (STEINER, 1989; SAUER et al., 1996; SINGH et al., 1996; FLERCHINGER et al., 2003).

3.1 PRINCÍPIOS FÍSICOS DA EVAPORAÇÃO DA ÁGUA

A evaporação da água da superfície do solo (E_s), de folhas de plantas umedecidas ou reservatórios de água é um processo físico, dependente da disponibilidade de energia. Essa água pode ser considerada como perdida ou improdutivo; a amplitude dessas perdas é dependente do tempo de ocorrência e da disponibilidade de energia. De acordo com Hillel (1981) e Allen et al. (1998), na passagem da fase líquida para vapor, uma grande quantidade de energia é requerida, proveniente principalmente da radiação solar e, em menor importância, da temperatura do ar. Segundo Jalota e Prihar (1990) e Allen et al. (1998), a taxa de evaporação é definida pela: (a) diferença entre a pressão de vapor da superfície evaporativa e a turbulência da atmosfera acima dessa camada e; (b) a resistência do líquido e do fluxo de vapor no sistema, dependendo da natureza do meio onde o fluxo ocorre (resistência ao fluxo, dada pela espessura da camada evaporativa ou pela resistência causada pela turbulência do ar).

A E_s de superfícies úmidas é primariamente influenciada pela energia disponível para a evaporação (calor latente de vaporização). No entanto, à medida que a superfície seca, ou seja, quando o intervalo entre chuvas ou irrigações for maior, a evaporação passa a depender da habilidade do solo em conduzir a água até próximo à superfície. De acordo com Ritchie (1972), Jalota e Prihar (1990), Suleiman e Ritchie (2003), a evaporação da água da superfície do solo pode ser dividida em dois ou três estádios, os quais caracterizam a forma de controle da taxa de evaporação: (1) definido como a “taxa constante”, onde a E_s é limitada unicamente pela suprimento de energia à superfície e (2) “taxa de evaporação em declínio”, no qual o movimento da água para próximo da superfície do solo é controlado pela umidade do solo e propriedades hidráulicas do mesmo. Embora muitos trabalhos experimentais tenham atestado a veracidade dos dois estádios de evaporação (SALVUCCI, 1997; MENZIANI et al., 1999; WYTHERS et al., 1999; SNYDER et al., 2000; WARD, DUNIN, 2001), a taxa constante de evaporação varia não somente com as condições atmosféricas, mas também, com as características da superfície, como coloração e rugosidade (McILROY, 1984), além da umidade da superfície. A duração do estágio “1”, assim como a quantidade evaporada, depende da capacidade de armazenamento de água no solo, propriedades hidráulicas e

demanda evaporativa da atmosfera. Nessa fase, enquanto o solo estiver suficientemente úmido, a taxa de evaporação é, no mínimo, igual à evaporação potencial. No estágio “2” a umidade do solo decresce continuamente no tempo (normalmente proporcional à raiz quadrada do tempo de secagem) até o momento em que a condutividade hidráulica do solo for incapaz de suprir a demanda evaporativa da atmosfera (JENSEN, ALLEN, 2016).

Ocasionalmente, um terceiro estágio (“3”) de evaporação pode ser incorporado, como é o caso de solos que sofrem profundas contrações quando secam, onde a taxa de evaporação é governada por um considerável fluxo ascendente de água no perfil, provocado pela exposição da água devido às rachaduras, sobretudo nas montmorilonitas expansivas (ALLEN et al., 2005a).

Para solos nus e não revolvidos, Jalota e Prihar (1990) apresentam uma equação potencial, que ilustra a taxa potencial de E_s , onde a remoção do vapor de água incrementa com o aumento da temperatura do ar (T_p) e velocidade do vento (WS) e decresce com o incremento da umidade relativa do ar (RH):

$$E_s = 0,006WS^{0,66} \cdot T_p^{1,24**} \cdot RH^{-0,37**} \quad (1)$$

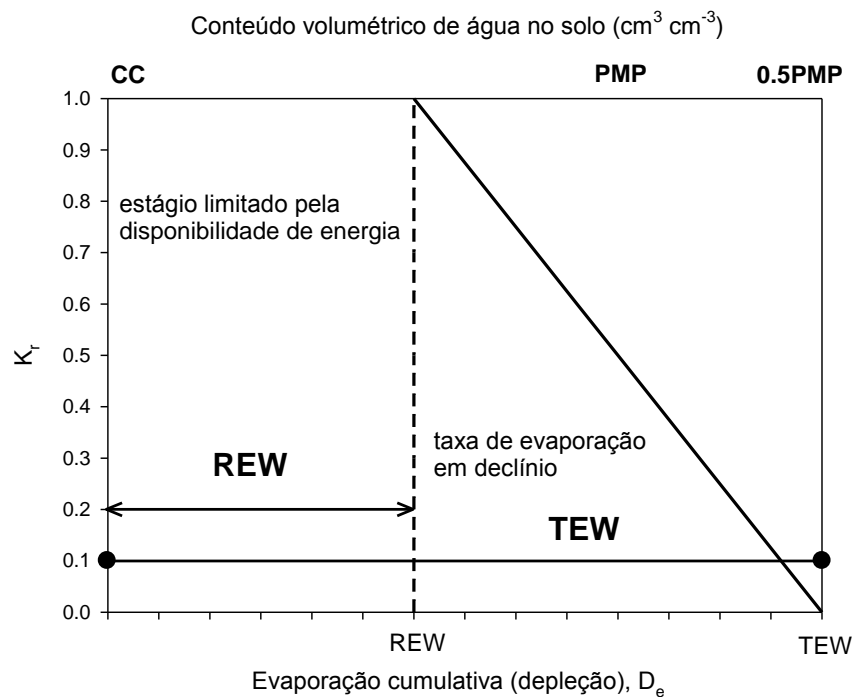
Onde: ** $P \leq 0,01$

Neste caso, o valor de E_s calculado fica muito próximo daquele calculado pela equação de Penman (1956), como sendo a evapotranspiração de referência ou potencial (ET_o).

Na proposta do FAO-56 (ALLEN et al., 1998) e discutida por Allen et al. (2005a), a redução da evaporação no estágio “2” pode ser expressa como uma função linear simples do total de água que evapora da camada evaporável (Z_e). Neste caso, a redução na taxa de evaporação varia com a textura e densidade do solo, o perfil da temperatura do solo, a demanda evaporativa da atmosfera e a espessura da camada evaporável. Em experimentos conduzidos por Jackson (1973), onde foram aplicados ciclos de umedecimento e medições horárias da umidade do solo, os resultados indicaram que ao final de 7 dias, aproximadamente

70% da evaporação ocorreu na camada de 0 - 9 cm de profundidade, indicando que apenas 1/3 da água evaporada provém das camadas abaixo dessa. Uma curva ideal da taxa de evaporação de solos descobertos é apresentada na figura 1, indicando uma drástica redução da evaporação na transição dos estádios “1” e “2”, conforme proposto por Jackson (1973) e adaptado por Jensen e Allen (2016).

Figura 1 - Função geral para o coeficiente de evaporação da água no solo (K_r), para o modelo linear de dois estádios de evaporação em solos sem cobertura e sem cultivo. (Adaptado de Allen et al., 1998). Onde: CC – capacidade de campo; PMP – ponto de murcha permanente; REW – água prontamente evaporável; TEW – total de água evaporável.



Baseado nas recomendações de Ritchie et al. (1989), o procedimento adotado no FAO-56 indica que a taxa de evaporação no estágio “1” é geralmente estimada por um coeficiente ($K_{e \max}$), o qual é dependente da ET_o . Assim, a evaporação potencial pode ser estimada usando a ET_o , representada pela energia potencial de evaporação, como sendo:

$$E_1 = K_{e \max} \cdot ET_o \quad (2)$$

Ritchie (1972) apresentou valores de evaporação acumulada no estágio “1” (ΣE_1) para quatro solos, variando de 6 mm para a areia até 12 mm para um solo franco siltoso.

A evaporação acumulada, por sua vez, é referida como a água prontamente evaporável (REW), onde os parâmetros de evaporação do REW são dependentes da textura do solo. Observações locais para ajustar o REW são recomendadas, uma vez que, a evaporação no estágio “2” é governada pelo fluxo de água através da camada evaporável até próximo à superfície, sendo limitado pelo $K_{e \max}$ e ET_o . Assim, quando o somatório de E_1 exceder o REW, se assume que o E_1 tenha encerrado, dando início ao E_2 . O valor do $K_{e \max}$, para a associação com a ET_o , varia de 1,05 a 1,2 (ALLEN et al., 1998).

3.2 FATORES QUE AFETAM A EVAPORAÇÃO DA ÁGUA DO SOLO

No ambiente natural, a evaporação é um componente básico do ciclo hidrológico, sendo influenciada tanto por fatores micrometeorológicos como aqueles relacionados ao solo. Os elementos micrometeorológicos são, de acordo com Jalota e Prihar (1990) e Jensen e Allen (2016), as condições atmosféricas (R_n , WS, RH e T_p) qual também está inserida a variável tempo de secagem (RITCHIE, 1972). Nos fatores relacionados ao solo, destacam-se a textura, distribuição e tamanho de poros, densidade do solo (GORDIYENKO, KOSTOGRYZ, 1990), além das condições da superfície, como o albedo e a rugosidade (JENSEN, ALLEN, 2016). Uma vez que a temperatura média diária na superfície das folhas e superfície do solo é similar à temperatura média do ar, a pressão de vapor da superfície evaporativa é exponencialmente relacionada à temperatura média do ar. Assim, o gradiente de vapor de água das superfícies evaporantes e do ar dependerá da umidade do ar; o ar mais seco eleva o gradiente de pressão de vapor, sendo afetado também pelo vento, o qual afeta a taxa de evaporação da superfície evaporante.

A maior parte das áreas agricultáveis no mundo é cultivada em sistema de cultivo convencional ou cultivo mínimo, onde a superfície do solo fica parcialmente exposta à ação dos fatores meteorológicos. Referendadas pelo FAO-56, as observações de Ritchie (1972) indicam que, da semeadura até 10% da cobertura do solo pelas plantas, a taxa evapotranspiratória é igual à evaporação potencial. Entre 10 e 75% de cobertura pelas plantas, ou com o índice de área foliar (IAF) próximo a 3,0; a evaporação é mínima, enquanto a ET_c é constante, permanecendo assim até o início da senescência.

Em solos revolvidos, significativas alterações ocorrem no albedo e rugosidade da superfície, expondo a superfície aos fatores atmosféricos, além de permitir uma maior penetração do vento, o que favorece a evaporação (JALOTA, PRIHAR, 1990; DALMAGO, 2004). Por outro lado, o revolvimento do solo interrompe a capilaridade, cessando o fluxo de água das camadas mais profundas para a superfície, além de modificar as características físicas do solo, alterando o balanço hídrico (GORDIYENKO, KOSTOGRYZ, 1990). Uma vez que o albedo decresce quando o solo for revolvido, a taxa inicial de evaporação cresce nos primeiros centímetros da camada superficial, secando essa camada. Essa camada seca passa a funcionar como uma barreira ao fluxo de água e vapor de água do interior do solo para a superfície (JALOTA, PRIHAR, 1990), tendo efeito semelhante ao resíduo vegetal (DALMAGO, 2004).

A E_s pode ser o maior componente do balanço hídrico do solo, uma vez que, a perda de água por evaporação impacta na umidade do solo próximo à superfície. De uma maneira geral, acredita-se que a manutenção de resíduos vegetais sobre o solo auxilia na conservação da água no solo. Entretanto, o total de água que pode ser conservado em função dessa prática necessita ser quantificado (KLOCKE et al., 2009), uma vez que os efeitos benéficos do não revolvimento e da manutenção de resíduos culturais na superfície são controversos (DALMAGO, 2004 e DALMAGO et al., 2010). O resíduo vegetal altera as perdas de água na superfície por diminuir a influência dos parâmetros meteorológicos (AYDIN et al., 2005; CHEN et al., 2007).

A E_s é um importante fator de perda dentro do ciclo hidrológico podendo, em certos casos, responder por cerca de metade da perda por evapotranspiração; 30 a 60 % na cultura do trigo (COOPER et al., 1983). É a via dominante para a

circulação de água para a atmosfera no início do estágio de crescimento da cultura (YUNUSA et al., 1993, BALWINDER-SINGHA et al., 2011). Deste modo, a identificação adequada dos fatores que mais a influenciam é do interesse da hidrologia, da agronomia, da meteorologia e de áreas correlatas.

3.3 DINÂMICA DA ÁGUA NOS RESÍDUOS VEGETAIS

A chuva é um dos componentes mais importantes do ciclo hidrológico. Após a ocorrência de uma chuva, a primeira parte do ciclo ocorre na superfície do solo, onde parte da água é interceptada pela vegetação ou pela superfície do solo (no caso da chuva ou irrigação por aspersão) e o restante infiltra-se na zona insaturada ou escoia superficialmente (GERRITS, SAVENIJE, 2011). A parte da água que é interceptada evapora sucessivamente a partir do armazenamento da água no solo. Este primeiro ponto de separação do ciclo hídrico nem sempre é considerado; isto se deve em parte às dificuldades técnicas inerentes às medidas de interceptação (LUNDBERG et al., 1997; LLORENS, GALLART, 2000), mas também é geralmente considerado um fluxo menor, embora estudos anteriores nos dizem que a interceptação pode chegar de 10 a 50% da chuva, de acordo com o tipo de vegetação (KLAASSEN et al., 1998).

Muitos estudos foram conduzidos ao longo dos anos para avaliar o impacto de resíduos de plantas na superfície do solo na interceptação da chuva e/ou irrigação (STEINER, 1989; SAVABI, STOTT, 1994; COOK et al., 2006; BALWINDER-SINGHA et al., 2011), na maioria das vezes utilizando simuladores de chuva. Apesar da importância do tipo e da espessura da camada do resíduo, as características da chuva e/ou irrigação (quantidade, duração e intensidade) parece ser o fator mais importante na quantidade de água retida. Savabi e Scott (1994) encontraram que, para uma mesma quantidade de massa seca, o resíduo vegetal de trigo interceptou significativamente mais água que resíduos de milho e soja, sendo que o milho e a soja interceptaram a mesma quantidade de água. Price e Black (1989) reportaram que, em condições de clima temperado, uma cobertura de resíduo vegetal interceptou a chuva em taxas de até $2,4 \text{ mm dia}^{-1}$, embora o efeito

líquido do resíduo vegetal na interceptação tenha sido pequeno, devido a redução gradual do fluxo de calor.

A presença de uma camada de resíduos na superfície aumenta a conservação da água no solo pela supressão da E_s . Entretanto, estudos de laboratório desenvolvidos por Jalota e Prihar (1990) indicaram que, para um ciclo de secagem em laboratório, a evaporação inicial em solos com resíduo vegetal pode ser menor, porém, a evaporação acumulada ao final do ciclo foi similar ou excedeu àquela observada em solos sem resíduo vegetal, o que também foi observado por Dalmago et al. (2010) em situações de campo. Em condições de campo, quando sucessivos ciclos de umedecimento e secagem ocorrem devido às chuvas e irrigações, mais interações entre o resíduo vegetal e o solo podem ocorrer, com influencia na E_s . Consequentemente, em estudos que envolvem os efeitos do resíduo vegetal e outros componentes do balanço hídrico, todos os componentes do balanço hídrico devem ser medidos ao longo de todo o ciclo das culturas.

O efeito das características do solo (textura, porosidade, condutividade hidráulica, fertilidade, etc) pode ser um componente a ser estudado, devido ao seu efeito na duração dos resíduos sobre a superfície. Para Cook et al. (2006), uma mescla entre métodos de campo e laboratório é necessária para melhorar as estimativas, uma vez que, a espessura da camada de resíduo parece ter mais influencia na redução da evaporação que o tipo de resíduo em si.

O efeito dos resíduos vegetais na superfície do solo na evaporação ainda não está sendo incorporado de forma generalizada aos modelos de balanço hídrico e estimativas da ET_c , devido a quantidade de detalhamento exigido por esses modelos. Os modelos de simulação do crescimento de plantas também não incluem os efeitos do resíduo vegetal (STEINER, 1989; ODHIAMBO, IRMAK, 2012). Em função de haver evidências empíricas do efeito combinado do resíduo vegetal e do dossel das plantas na interceptação de água da chuva e irrigação, há a necessidade de mensurar esse componente individualmente e com precisão, em condições de campo, a fim de melhorar os modelos de balanço hídrico e a estimativa da ET_c .

3.4 DETERMINAÇÃO DA EVAPORAÇÃO

Como visto anteriormente, é praticamente consenso na literatura de que os resíduos vegetais na superfície do solo reduzem a evaporação. Entretanto, a maior parte dos trabalhos realizados com resíduo vegetal e sua influência na redução da evaporação em áreas de plantio direto (DERPSCH et al., 1985; BRAGAGNOLO, MIELNICZUK, 1990; SALTON, MIELNICZUK, 1995), não avaliaram diretamente a evaporação e não foram realizadas em áreas irrigadas. A evaporação é um processo que ocorre simultaneamente à redistribuição da água no perfil, fato que, de acordo com Hillel (1971), pode levar a resultados imprecisos. Segundo Allen et al. (2011), muitos dos erros das superestimativas reportados na literatura violam a lei da conservação de massa e energia, os quais governam os processos combinados da evaporação e transpiração.

Devido a dificuldade em se medir diretamente a taxa de evaporação da superfície dos solos, a exceção do uso de lisímetros (EVETT et al., 1995), as opções para a determinação da evaporação se limitam aos métodos indiretos, como a razão de Bowen (método do balanço de energia), a *eddy covariance*, o balanço de água no solo, combinação dos métodos do balanço de água com o balanço de energia, além dos métodos empíricos e semi-empíricos (BURT et al., 2005).

3.4.1 Método do balanço hídrico do solo

A equação geral do balanço hídrico para determinar as perdas por evaporação da superfície do solo, folhas, retida pelo resíduo vegetal, assim como da transpiração pode ser descrita como:

$$E + T = P + I + \Delta SW - D - R \quad (3)$$

Onde: E é a evaporação, T é a transpiração, P é a chuva, I é a irrigação, ΔSW é a variação do conteúdo de água no meio de interesse, D e R são as perdas por drenagem e escoamento superficial respectivamente. Todas as unidades são dadas em lâmina por unidade de tempo (mm dia^{-1}).

A determinação da ET_c ou da E_s através da medição da variação do conteúdo de água no perfil do solo tem sido usada a mais de um século, iniciando como o método gravimétrico antes dos anos 60, passando pela sonda de nêutrons entre 1960 e 1980, até os dispositivos eletromagnéticos, baseados na constante dielétrica e capacitância, a exemplo dos dispositivos TDR (reflectometria de domínio de tempo) e FDR (reflectometria de domínio de frequência) atualmente utilizados. Embora os dispositivos eletromagnéticos e o método da moderação de nêutrons tenham reconhecida precisão na medição do conteúdo de água no solo (EVETT et al., 2006; MITTERLBACH et al., 2012), uma fonte potencial de erro nesse tipo de medida é, segundo Allen et al. (2011), a incerteza sobre o movimento ascendente ou descendente da água no perfil, uma vez que, a redistribuição da água no perfil após uma chuva ou irrigação ocorre simultaneamente aos processos de evaporação e consumo de água pelas plantas. Outra fonte de erro é a falta de precisão na medição da chuva e/ou irrigação adicionada ao solo.

Ciclos de umedecimento e secagem, com medição automática do conteúdo de água no perfil do solo são geralmente utilizados para medir a ET_c ou separadamente a E_s . Almeida (2011), trabalhando com ciclos de umedecimento e secagem em lisímetros de drenagem, encontrou uma redução de 47% na evaporação num Latossolo (57% de argila) e Argissolo (15% de argila) no primeiro dia após o umedecimento completo, comparando 4 Mg ha^{-1} de resíduo vegetal na superfície com solos nus.

3.4.2 Razão de Bowen ou método do balanço de energia

A equação geral do balanço de energia na superfície é dada por:

$$LE = ET = R_n - G - H \quad (4)$$

Onde: LE é o fluxo de calor latente da evaporação ou transpiração resultante da vaporização e do movimento da água, R_n é a radiação líquida incidente, G é o fluxo de calor do solo ou para o solo e, H é o fluxo de calor sensível acima da superfície do solo. As unidades de medida normalmente são em $W m^2$, podendo ser convertidas para mm (assumindo que $1 \text{ mm dia}^{-1} = 28,36 \text{ W m}^2$).

Os componentes da equação podem ser medidos remotamente, utilizando a tecnologia do sensoriamento remoto ou na superfície usando a razão de Bowen ou através de equipamentos de medida de fluxos turbulentos (*eddy covariance*). Por princípio, a equação do balanço de energia por ser resolvida simplesmente medindo-se o gradiente de temperatura do ar e a pressão de vapor na camada próximo à superfície evaporante. Significa que o método funciona melhor quando a água no solo não é limitante à evaporação, acumulando erros significativos quando a superfície seca e a razão de Bowen aumenta (ANGUS, WATTS, 1984).

Embora seja um método não destrutivo simples, obtido a partir da medição da temperatura do ar e da pressão de vapor de água em duas alturas diferentes (superfície e acima do dossel das culturas, por exemplo), alguns cuidados devem ser levados em consideração, como uma bordadura adequada e acurácia na medição da R_n e G (ALLEN et al., 2011; BURT et al., 2005). Ultimamente, o método modificado de Penman e Penman-Monteith tem sido usados para medir o balanço de energia, por utilizarem os componentes meteorológicos na estimativa da ET_o .

3.4.3 Lisimetria

Os lisímetros são extensivamente utilizados para fornecer informações básicas para o desenvolvimento, calibração e validação de métodos de evapotranspiração (DOORENBOS, PRUITT, 1977; WRIGHT, 1982; JENSEN et al., 1990). Entretanto, são extremamente sensíveis às variações nos fatores ambientais, muitos dos quais normalmente são mal entendidos ou ignorados, levando a erros

grosseiros nas interpretações. Para medições da evapotranspiração, lisímetros de pesagem ou de drenagem são normalmente utilizados. A quantidade de água perdida por evaporação e/ou transpiração são baseadas na variação da massa dos lisímetros, provendo uma medida direta da E_s ou da evapotranspiração, de referência ou da cultura neles cultivada (HOWELL et al., 1985).

Um dos problemas associados à lisimetria é a falta de representatividade desses em relação à área circundante (ALLEN et al., 2011), principalmente quando as condições do solo dentro dos lisímetros difere daquele da bordadura.

Quando se deseja medir somente a evaporação, micro ou mini-lisímetros (sem plantas) são os mais indicados (BURT et al., 2005). Embora sejam bastante efetivos na medição da E_s (KLOCKE et al., 1990), uma das limitações dos microlisímetros é a ausência de movimento ascendente e descendente de água, assim como diferenças no perfil da temperatura do solo em relação ao solo circundante (TODD et al., 1991), fazendo com o solo nos microlisímetros seja mais úmido. Mesmo assim, medições diárias da E_s por esse método são bastante úteis.

Em geral, um lisímetro consiste em um recipiente cheio de solo inserido em outro recipiente externo ou parede de contenção, bem como dispositivos especiais para medir percolação e mudanças do conteúdo de água do solo. Não existe um lisímetro “padrão internacional universal” para medir a evapotranspiração; a área superficial dos lisímetros pode variar de 0,05 a 100 m² e a sua profundidade de 0,1 a 5 m (WMO, 2008).

Os micro-lisímetros caracterizam-se por serem equipamentos simples, sendo facilmente instalados e de baixo custo (WMO, 2008). Normalmente são pesados manualmente todos os dias, fornecendo valores de evaporação diária em função da diferença de massa entre os dias anterior e posterior, que são informações úteis no manejo de irrigação, por exemplo.

3.4.4 Métodos empíricos ou semi-empíricos

Inúmeros métodos empíricos ou semi-empíricos foram desenvolvidos para determinar a E_s porém, muitos deles são específicos a certos locais e aplicáveis apenas para locais sem cobertura vegetal. Grande parte dos modelos criados são derivados dos dois estádios de evaporação apresentados por Ritchie (1972), encontrando boa relação semi-empírica entre a evaporação cumulativa de um solo descoberto e a evapotranspiração de referência acumulada.

O Boletim FAO-56 (ALLEN et al., 1998) fornece um adequado resumo de como os coeficientes de cultivo (K_c), em conjunto com a ET_o , são usados para estimar a evapotranspiração da cultura (ET_c), estimando separadamente a E_s e a transpiração. Por esse procedimento, o K_c é substituído como um coeficiente de cultura dual, a fim de particionar a E_s da T , como segue:

$$K_c = K_s \cdot K_{cb} + K_e \quad (5)$$

Onde: K_s é a redução do K_c para culturas em stress, K_{cb} é o coeficiente de cultura basal e K_e é o coeficiente diário de E_s . Assim, a evaporação diária para a estágio "1" de evaporação é calculada multiplicando o K_e pela ET_o , conforme a equação 2. Quando há plantas, a ET_c diária é calculada do procedimento do K_c dual (FAO-56) a partir do sombreamento do solo pela vegetação em questão.

O estágio "1" de evaporação perdura até que a lâmina acumulada de evaporação (D_e) desde o último evento de molhamento é tal que as propriedades hidráulicas da camada superficial venham a ser limitantes e a água não pode ser transportada até a camada evaporante para atender a demanda evaporativa da atmosfera. Nesse momento, segundo Allen et al (2005b), $D_e = REW$. Valores de REW variam de 5 a 12 mm (ANEXO 1), sendo que os maiores valores são característicos de solos de textura mais fina (RICHTIE, 1972; RICHTIE et al., 1989).

Durante o estágio "2" ocorre uma redução na evaporação, a qual é impulsionada por fatores hidráulicos dos solos. De acordo com o FAO-56, nessa

fase um fator adimensional de redução da evaporação (K_r) é associado ao K_e , o qual é dependente do total de água evaporada na camada superficial (evaporável). Assim, de acordo com a equação proposta, o K_r inicia quando o D_e excede ao valor de REW, conforme segue:

$$K_r = \frac{TEW - D_e}{TEW - REW} \quad (6)$$

Onde: TEW é o total de água (máximo) que pode evaporar da superfície do solo depois que essa camada tiver sido completamente umedecida, enquanto o REW é a água prontamente evaporável (ANEXO 1).

De acordo com Allen et al. (2005a) e Allen et al. (1998), presumivelmente, a superfície de um solo é capaz de secar até um ponto próximo a um solo seco ao ar, que é um ponto intermediário entre a capacidade de campo (CC) e 50% do ponto de murcha permanente (PMP). Assim, a equação que expressa o máximo de água potencialmente perdido por evaporação (TEW_{max}) é dada por:

$$TEW_{max} = 1000 (\theta_{CC} - 0,5 \cdot \theta_{PMP}) \cdot Z_e \quad (7)$$

Assim, quando a camada superficial tiver sido umedecida até a CC, o $TEW = TEW_{max}$. Os valores de CC e PMP são dados em volume de água por volume de solo ($m^3 m^{-3}$) e Z_e em metros. Baseado nas pressuposições de Ritchie (1972) e Wright (1982), o boletim FAO-56 recomenda valores de Z_e de 0,10 m para solos de textura grosseira e 0,15 m para solos de textura fina.

Para REW, Ritchie et al. (1989) sugerem as equações a seguir para estimar a água potencialmente evaporável, em solos descobertos, de acordo com a textura do solo:

$$REW_{max} = 20 - 0,15 (areia) \text{ para Areia} \geq 80 \quad (8a)$$

$$REW_{max} = 11 - 0,06 (argila) \text{ para Argila} \geq 50 \quad (8b)$$

$$REW_{max} = 8 + 0,08 (argila) \text{ para Areia} < 80 \text{ e Argila} < 50 \quad (8c)$$

Conforme já foi explicado anteriormente, quando a superfície do solo está completamente umedecida, a E_s é igual ou superior à ET_o (Equação 2). O balanço hídrico na camada superficial é modificado com a existência de resíduos culturais ou plantas crescendo nesse solo, devido a redução na E_s . Neste caso, a estimativa da evaporação deve levar em consideração a porcentagem da área umedecida (f_w), fator que depende do sistema de irrigação adotado e da porcentagem de cobertura proporcionada pelo resíduo vegetal (f_{we}) ou do dossel das plantas (f_c) (ALLEN et al., 1998).

4 MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho é composto de dois experimentos, ambos conduzidos na área experimental do Sistema Irriga® em épocas e com metodologias distintas. A área experimental é pertencente ao Departamento de Engenharia Rural e está localizada no campus da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS, situada em Latitude de 29°41'24"S e Longitude de 53°48'42"W. O clima da região é do tipo "Cfa" subtropical úmido, sem estação seca definida e com verões secos, segundo classificação de Köppen (KOTTEK et al., 2006). A precipitação pluvial média anual é de 1.711 mm; a temperatura média anual varia de 9,9°C, no mês de junho, a 30,7 °C em janeiro (MARTINS et al., 2013; ANEXO 2)

O solo é classificado como Argissolo Vermelho Distrófico arênico (EMBRAPA, 2006), com uma camada superficial de textura franca e um horizonte Bt, de textura argilosa. Os Argissolos caracterizam-se por serem solos profundos, avermelhados, textura superficial franco-arenosa, friável e bem drenado, são ácidos, com saturação de bases baixa a média, pobres em matéria orgânica e na maioria dos nutrientes. Streck et al. (2008) os descrevem como solos que apresentam tipicamente um perfil com gradiente textural, onde o horizonte B é significativamente mais argiloso do que os horizontes A e E.

A caracterização físico hídrica do solo na área experimental é apresentada na tabela 1. A distribuição do tamanho de partículas e a respectiva classe textural foram determinadas por Zwirttes (2013). O conteúdo de água na capacidade de campo (θ_{CC}) foi determinado 12 horas após a saturação do solo, utilizando a média das leituras registradas pelos sensores FDR instalados em cada uma das profundidades, em 33 parcelas experimentais. O conteúdo de água no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) foi determinado em laboratório, utilizando o psicrômetro do ponto de orvalho, conforme descrito por Martins et al. (2013).

Os dois experimentos foram conduzidos em áreas vizinhas (distante 50 m, aproximadamente), nos anos de 2013/14 (Experimento I) e 2015/16 (Experimento II), cuja caracterização será descrita a seguir:

Tabela 1 - Conteúdo de água na capacidade de campo (θ_{CC}) e ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), distribuição granulométrica e classe textural nas diferentes camadas do perfil solo.

Camada	θ_{CC}	θ_{PMP}	Areia	Silte	Argila	Classe Textural
M	cm ³ cm ⁻³		g Kg ⁻¹			
0 – 0,10	0,281	0,119*	352	440	208	Franco
0,10 – 0,25	0,285	0,112	367	475	176	Franco
0,25 – 0,55	0,321	0,117	355	453	191	Franco
0,55 – 0,85	0,433	0,191	196	320	484	Argila

*Potencial de 1500 kPa.

4.1 EXPERIMENTO I – DINÂMICA DA ÁGUA NOS RESÍDUOS CULTURAIS EM UM SISTEMA IRRIGADO

O Experimento I foi conduzido no interior de uma cobertura móvel (“*Rainout Shelter*”) estruturada sobre uma armação metálica, fechada no teto e nas laterais com zinco, com acionamento eletromecânico. O uso desta estrutura permite o controle das chuvas e possibilita a análise de diferentes níveis de irrigação sem a interferência das mesmas (OLIVEIRA, 2011).

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, em esquema de distribuição bi-fatorial, com três repetições (Figura 2). O fator A foi constituído de três níveis de cobertura do solo: 0, 2 e 4 t ha⁻¹ de resíduo vegetal de aveia seca e o fator B de diferentes lâminas de irrigação: menor, intermediária e maior; as lâminas brutas são apresentadas na tabela 2 e foram quantificadas por 4 pluviômetros distribuídos aleatoriamente em cada unidade experimental. As parcelas experimentais tinham dimensões de 3 x 3 m (9 m²). O sistema de irrigação utilizado foi microaspersão, com aspersores tipo bailarina. A pressão de serviço dos microaspersores foi de 100 kPa, resultando em um diâmetro molhado de 5,20 m. Após a superposição em função dos ventos, o espaçamento final entre os microaspersores foi de 3 m, resultando em taxa de aplicação de 8 mm h⁻¹.

Figura 2 – Croqui do experimento I, com os três níveis de cobertura (0; 2 e 4 t ha⁻¹ de massa seca de aveia preta) sob as três lâminas aplicadas (maior, intermediária e menor). Cada unidade experimental com 9 m² (3 x 3 m).

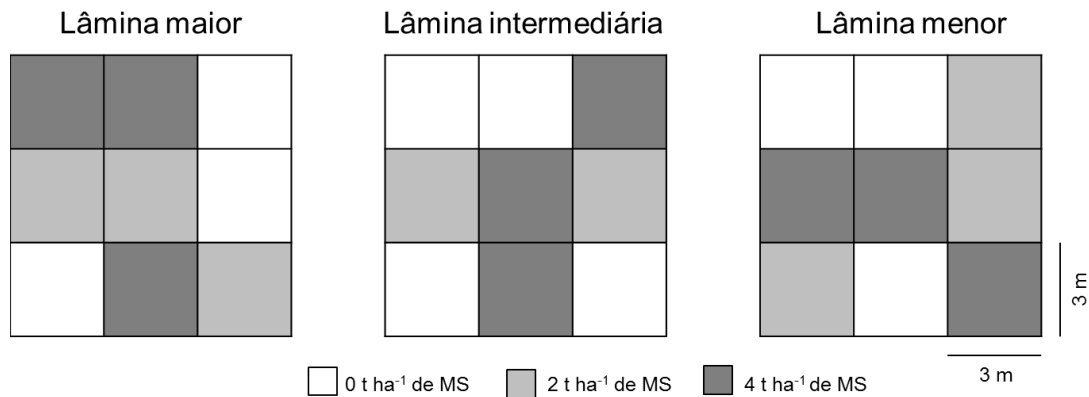
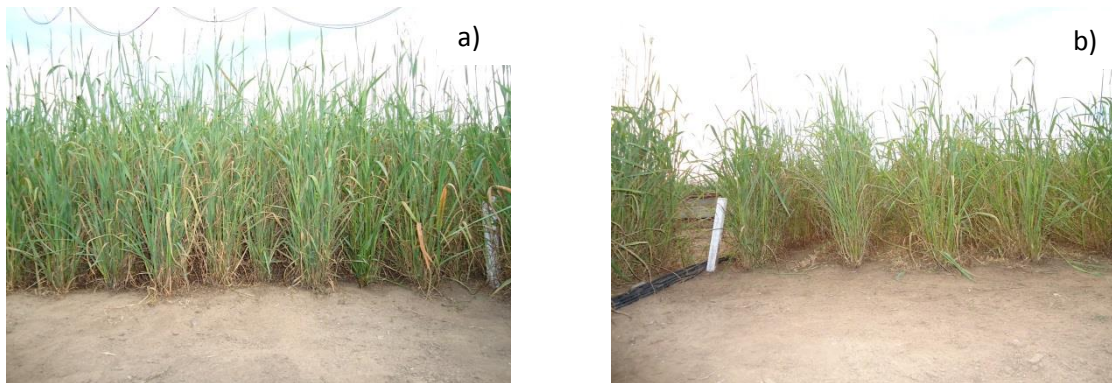


Tabela 2 - Lâmina média irrigada e desvio padrão da média nos 3 grupos (menor, intermediária e maior) nas respectivas datas de avaliação.

Data de avaliação	Lâmina menor	Lâmina intermediária	Lâmina maior
	(mm)		
1° 14/11/2013	4,5 (± 1,006)	6,5 (± 1,185)	13,3 (± 3,840)
2° 23/11/2013	3 (± 0,785)	5 (± 0,974)	11,2 (± 3,231)
3° 03/12/2013	3 (± 0,969)	5,9 (± 1,505)	11,6 (± 3,555)
4° 12/12/2013	3,1 (± 1,178)	6,1 (± 1,398)	11,3 (± 3,096)
5° 19/12/2013	3,1 (± 1,370)	4,8 (± 1,463)	10,9 (± 2,976)
6° 26/12/2013	3,8 (± 1,154)	6,4 (± 1,702)	12,2 (± 3,722)
7° 02/01/2014	3,5 (± 1,324)	6,1 (± 1,402)	12,2 (± 3,780)
8° 06/01/2014	3,2 (± 0,829)	5,6 (± 1,127)	12,9 (± 3,181)
9° 14/01/2014	4 (± 1,257)	5,5 (± 0,888)	12,7 (± 3,217)

A aveia preta foi cultivada entre Maio e Outubro de 2013. A semeadura foi realizada em linha, com espaçamento de 0,17 m; na densidade de 80 kg ha⁻¹ de semente. A produção total de massa seca foi de ± 4 t ha⁻¹, quando a cultura de aveia atingiu o estágio de floração plena, foi realizado o desbaste nas parcelas no tratamento ± 2 t ha⁻¹ de MS, retirando-se linhas de semeadura de forma alternada (as plantas foram cortadas rente ao solo, utilizando-se tesoura de poda), para que as unidades experimentais desse tratamento ficassem com 50% da produção de massa seca (Figura 3).

Figura 3 - Aveia preta em estágio de pleno florescimento (06/09/2013), com $\pm 4 \text{ t ha}^{-1}$ (a) e $\pm 2 \text{ t ha}^{-1}$ (b) de massa seca (após o desbaste).



Após o manejo do tratamento 2 t ha^{-1} , as plantas foram dessecadas e o resíduo rolado sobre a superfície do solo. No tratamento sem resíduo vegetal não houve cultivo de plantas nesse período. Antes da implantação da aveia, a área experimental foi irrigada até a saturação do solo e, posteriormente, todos os resíduos culturais de culturas anteriores foram removidos manualmente mediante o uso de um ancinho, com o objetivo de retirar qualquer parte e/ou resíduo de cultura de cultivos em anos anteriores.

O conteúdo volumétrico de água no solo foi mensurado de Novembro de 2013 a Janeiro de 2014 utilizando um conjunto de sensores FDR, modelo CS 615, conectados a multiplexadores AM16/32 e, as informações automaticamente armazenadas em um *datalogger* CR-1000 (Campbell Scientific, Inc.), de 15 em 15 minutos, totalizando 96 registros diários. Em cada unidade experimental, 4 sensores foram instalados nas profundidades de 0 - 0,10; 0,10 - 0,25; 0,25 - 0,55 e 0,55 - 0,85 m. A metodologia de instalação e disposição dos sensores foi descrita por Martins (2010) e Knies (2010). A lâmina de água armazenada em cada camada e no perfil do solo foi calculada pelo produto do conteúdo volumétrico de água no solo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e a espessura da camada considerada (mm). Para estimativa do balanço hídrico (Equação 9) foi utilizado o conteúdo de água no solo da camada 0 - 0,25 m (0 - 0,10), pois os sensores das camadas mais profundas apresentavam variações aleatórias, não correspondendo às irrigações.

A interceptação (lâmina retida pelos resíduos vegetais, W_{palha}) foi determinada pela diferença entre a umidade presente nos resíduos antes e depois da irrigação (0;

3; 6 e 24 h após as irrigações). As coletas de resíduo foram feitas aleatoriamente nas unidades experimentais, com o auxílio de um quadro amostral de 0,30 X 0,30 m, recolhendo-se o resíduo disposto sobre o solo contido no quadro (Figura 4), similar ao método descrito por Shaw, Pittenger e McMaster (2005). Após, as amostras foram pesadas e secas em estufa de ventilação forçada com temperatura de 60°C por 48 h, sendo novamente pesadas (para determinar a MS) e devolvidas às respectivas parcelas experimentais.

Figura 4 - Coleta dos resíduos vegetais com o quadro amostral (0,30 x 0,30 m).



O balanço hídrico solo (BH, mm), calculado pela diferença entre as entradas e saídas de água no sistema, foi calculado pela seguinte expressão:

$$BH = I - (E_s + W_{solo} + W_{palha}) \quad (9)$$

Onde: I corresponde à lâmina bruta irrigada (mm); E_s é a evaporação da água do solo (mm); W_{solo} é a variação no conteúdo de água no solo na camada de 0 – 0,25 m em um dia de avaliação (mm); W_{palha} é a conteúdo de água retido pelos resíduos vegetais nos tratamentos 2 e 4 t ha⁻¹ (mm).

A E_s foi calculada a partir da aproximação do FAO-56 (ALLEN et al., 1998), que é similar às proposições de Ritchie (1972), no qual a E_s é máxima quando o solo

está úmido. Assim, para um solo sem plantas e sem resíduos na superfície, a E_s foi estimada a partir da expressão:

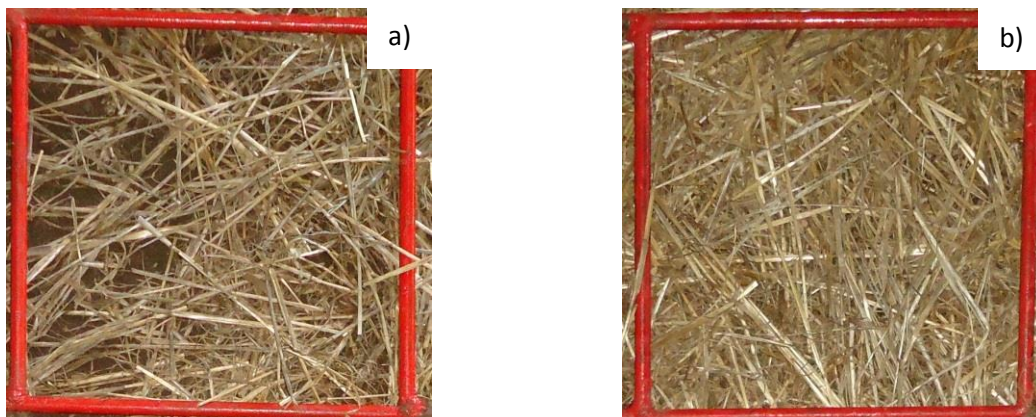
$$E_s = 1,15 \cdot ET_o \quad (10)$$

Onde: E_s é a evaporação do solo, ET_o é a evapotranspiração de referência, em mm dia^{-1} . Para os tratamentos com resíduo vegetal, a E_s diária foi calculada a partir da expressão:

$$E_s = K_e \cdot ET_o \cdot f_{ew} \quad (11)$$

Onde: K_e é coeficiente de evaporação da superfície do solo (nesse caso, para o primeiro dia após o umedecimento, o K_e utilizado foi igual a 1,0); f_{ew} é a fração de solo umedecida e exposta (30 e 20% para os tratamentos $\pm 2 \text{ t ha}^{-1}$ e $\pm 4 \text{ t ha}^{-1}$, respectivamente – Figura 5).

Figura 5 – Imagem da cobertura do solo nos tratamentos 2 (a) e 4 (b) t ha^{-1} de MS 12/12/2013



A f_{ew} foi estimada através de imagens, obtidas com câmera digital comum, instalada a uma altura fixa do solo com o auxílio de um tripé, sobre as unidades experimentais. Estas imagens foram processadas com o *software* SIARCS, que é

uma ferramenta para análise da cobertura sobre o solo ou sistema radicular que utiliza técnicas de classificação e processamento de imagens digitais para quantificar alterações. Este software possui licença gratuita de utilização e está disponível na página da Embrapa Instrumentação Agropecuária.

A evapotranspiração de referência horária ($ET_{o \text{ hourly}}$) foi calculada, utilizando-se a equação FAO-56 Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998), seguindo os procedimentos descritos por Snyder (2000). Os dados característicos de entrada para o cálculo foram: latitude (“-“ para o hemisfério Sul), longitude (“+” para longitude Oeste), elevação ao nível do mar (m), meridiano local (para o cálculo do fuso horário, a partir da longitude; data, ano, dia Juliano e hora). A hora corresponde aos dados medidos durante o intervalo anterior de 60 minutos, ou seja, o horário da 01:00 hora correspondia aos dados medidos entre 24:00 e 01:00 AM. Os dados meteorológicos incluídos foram: radiação solar horária ($\text{Watts m}^2 \text{ h}^{-1}$), temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$), velocidade média do vento (m s^{-1}) e temperatura do ponto de orvalho ($^{\circ}\text{C}$). Esses dados foram obtidos de uma estação meteorológica automática pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada a 200 m da área experimental.

A resistência aerodinâmica (r_a), dada em s m^{-1} , é uma função da velocidade do vento (WS), ou seja, $r_a = 208/WS$. Quando a velocidade do vento for menor que $0,5 \text{ m s}^{-1}$, a mesma é setada em 0,5. Seguindo a recomendação de Snyder (2000), para uma superfície gramada com 0,12 m de altura, durante o dia (quando $R_n > 0$) a resistência do dossel (r_s) por padrão é de 50 s m^{-1} . Durante a noite (quando $R_n \leq 0$) a resistência do dossel é igual a 200 s m^{-1} .

O ET_o diária foi obtida pela soma da $ET_{o \text{ hourly}}$ desde a hora de início das irrigações, até o final do mesmo dia. No cálculo do balanço hídrico, foi considerado a $ET_{o \text{ hourly}}$ das 10 às 13 h, ou seja, 3 h após o final das irrigações.

A W_{solo} após cada evento de irrigação foi calculada pela diferença entre o conteúdo de água no solo no momento anterior ao início da irrigação e o conteúdo de água registrado ao final do dia, nas camadas superficiais do solo. A lâmina de água foi calculada multiplicando-se o conteúdo de água ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) pela espessura da camada (0-25 cm). A W_{palha} foi determinada pela diferença entre a umidade do resíduo vegetal antes da irrigação, coletando-se uma amostra de $0,09 \text{ m}^2$ e a água

retida pelo resíduo nas 3, 6 e 24 horas após cada irrigação, considerando o mesmo tamanho de amostragem (Equação 12). A umidade medida em gramas (g) foi transformada para lâmina assumindo-se que 1 g de água equivale a 1 cm³ de água, à temperatura de 20°C.

$$W_{palha}(mm) = \frac{W_{palha}(cm^3)}{\text{Área amostral}(cm^2)} \quad (12)$$

A E_s diária foi determinada em ciclos de secagem do solo, que é o intervalo de entrada de água no solo, ou seja, entre as avaliações. A E_s acumulada é a soma das E_s diárias de um ciclo de secagem.

As avaliações foram iniciadas sempre no mesmo horário, às 8:30h, começando com a coleta de resíduos vegetais para determinação do conteúdo de água retido nos resíduos antes das irrigações e coleta (captura) das imagens da cobertura do solo. Às 9:00 eram iniciadas as irrigações e na sequência eram realizadas as coletas de resíduo logo após as irrigações, 3; 6 e 24 h.

4.2 EXPERIMENTO II - EVAPORAÇÃO DA ÁGUA DO SOLO COM MICROLISÍMETROS EM POUSIO E SOB O CULTIVO DE SOJA

No Experimento II a E_s foi determinada de maneira direta, com o uso de microlisímetros (ML), no período entre 15/11/2015 a 10/04/2016. Foram testados três níveis de cobertura do solo: 0, 2 e 4 t ha⁻¹ MS de aveia preta, com três repetições, distribuídos aleatoriamente em duas áreas, uma área em pousio (sem o cultivo de plantas) e outra na entrelinha de uma área cultivada com soja, com espaçamento de 45 cm, semeada no dia 01/12/15. A área circundante de cada ML é de aproximadamente 1 m².

Os ML foram confeccionados em tubos de PVC de 100 mm de diâmetro e com 100 mm de profundidade, inseridos perpendicularmente à superfície do solo,

com o auxílio de uma marreta de borracha, de forma que a estrutura do solo fosse preservada. Na base dos ML foi fixada uma tela de nylon com malha fina (com fita adesiva, na face externa), para impedir a perda de solo e facilitar a drenagem da água (FLUMIGNAN et al., 2012; FLUMIGNAN et al., 2011; DALMAGO et al., 2010), que foi coletada por um copo de PVC (tampão), colocado abaixo do ML (Figura 6a). Os ML foram coletados na bordadura da área onde foram instalados.

Figura 6 – Microlisímetro, com o tecido fixado com fita adesiva e do copo coletor, em PVC (a), inserido no solo dentro do envelope (b), ML com 4 t ha⁻¹ de resíduo vegetal fixado (costurado) na superfície do microlisímetro (c).



Os ML foram instalados de maneira que a borda desses instrumentos ficasse ao nível da superfície do solo, dentro de uma estrutura também de PVC, com diâmetro superior ao ML, fixada no solo de forma a formar um envelope (Figura 6b). A massa seca de aveia preta foi pesada e fixada sobre o solo nas unidades dos tratamentos com resíduos (costurada com linha sintética, Figura 6c). A aveia preta utilizada foi cultivada na área experimental no inverno de 2015.

A evaporação da água do solo (mm) foi obtida pela diferença de massa diária dos ML, pesados às 18 h, exceto nos dias em que ocorreram chuvas. A diferença entre o dia n-1 e o dia atual (n) representa a evaporação do dia n. A evaporação da água no solo foi calculada pela equação abaixo, citada por Dalmago (2004):

$$E_s = \frac{M_{n-1} - M_n}{\pi r^2} \quad (13)$$

Em que, E_s (mm dia^{-1}) é a evaporação da água do solo, M (g) é a massa do ML dos dias “n-1” e “n” respectivamente, e r (m) é o raio do ML.

O manejo fitossanitário na lavoura de soja foi realizado seguindo as recomendações técnicas para a cultura, conforme a necessidade e incidência de pragas, doenças e invasoras. A área foliar (AF) foi quantificada aos 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100 dias após a semeadura, utilizando a metodologia descrita por Richter et al. (2014), de medição indireta e não destrutiva, com as medidas de largura (L) e comprimento (C) da folha central de cada trifólio da planta e utilizando a equação geral (Equação 14), onde AF é a estimativa da área foliar do trifólio, C é o comprimento e L a largura do folíolo central. O índice de área foliar (IAF) das plantas foi obtido pela razão entre a área foliar fotossinteticamente ativa e a área superficial de solo ocupada pela planta (RICHTER et al., 2014).

$$AF = 2,0185.(C.L) \quad (14)$$

A E_s diária e acumulada foi determinada em ciclos de secagem do solo, que é o intervalo entre chuvas, já que o experimento II foi realizado sob condições naturais de precipitação e radiação solar.

Segundo Allen et al. (1998, 2005a), assumindo que a evaporação que ocorre abaixo do dossel vegetativo está incluído no valor do K_{cb} , pois não se pode quantificar de maneira direta, o cálculo da evaporação se concentra totalmente na porção exposta e umedecida da camada superficial do solo. O componente diário da evaporação se define pelo produto $K_e E_{To}$, portanto:

$$K_e = \frac{E_s}{E_{To}} \quad (15)$$

Onde, E_s é a evaporação do solo determinada com o uso dos microlisímetros sem cobertura de resíduo vegetal e em área de pousio (sem o cultivo de plantas) e a E_{To} foi estimada pela equação FAO-56 Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998), com os parâmetros meteorológicos obtidos pela estação do INMET.

4.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise estatística do experimento I foi feita de acordo com o delineamento experimental, aplicando-se o teste F em nível de 5% de probabilidade de erro. Quando significativos, utilizou-se a análise de regressão e correlação entre as variáveis (níveis de cobertura para o fator A e lâminas de irrigação para o fator D), e a interação entre os fatores A e D.

Aplicou-se o teste de Shapiro-Wilk para verificar a normalidade dos dados da água armazenada no solo e retida pela palha, em nível de 5% de probabilidade de erro. Todas as análises foram feitas utilizando-se o pacote estatístico R (R DEVELOPMENT CORE TEAM).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS (EXPERIMENTOS I E II)

A ET_o diária e a precipitação pluvial ocorrida nos dois períodos de execução dos experimentos é apresentada na figura 6. Embora às épocas de realização dos experimentos sejam coincidentes, dentro de cada ano, com um período maior de observação para o experimento II, a média da ET_o diária foi maior no Experimento I ($5,08 \text{ mm dia}^{-1}$), que no experimento II ($3,70 \text{ mm dia}^{-1}$). A menor ET_o diária observada no segundo período está relacionada ao maior número de dias com chuva e um total maior de chuva (296 e 951 mm, para os experimento I e II, respectivamente).

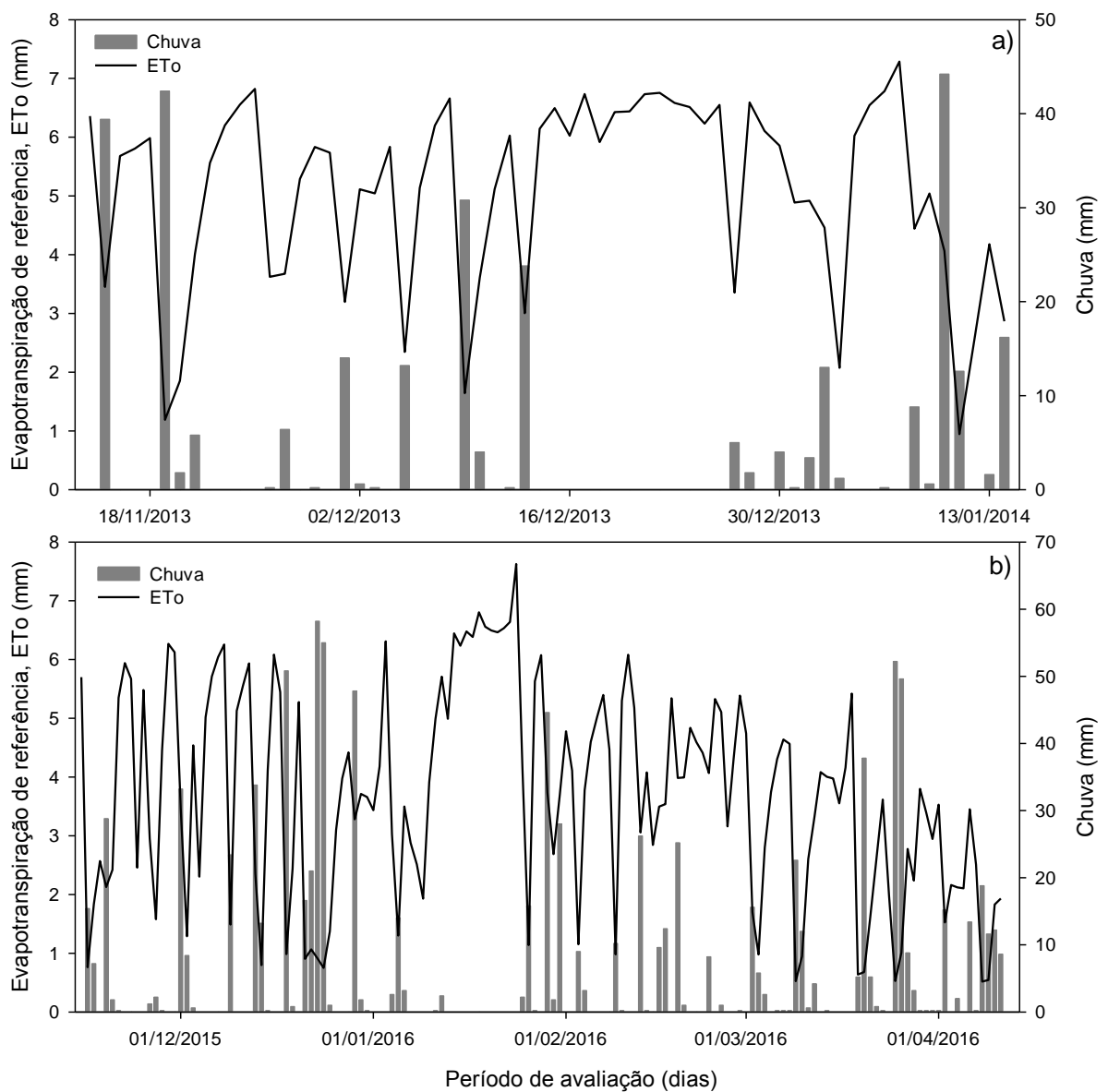
As médias normais de precipitação para Santa Maria para os meses de Novembro, Dezembro e Janeiro são 120, 134 e 148 mm, respectivamente, considerando um período climático de 1969 – 2005 (MARTINS et al., 2013, ANEXO 2). Durante o ano de 2013/14 (Figura 7a), no período de execução do experimento I, as chuvas ficaram abaixo das médias climatológicas normais para os meses de primavera-verão, fato que explica a ET_o mais elevada que a normal climatológica para esse mesmo período ($3,9 \text{ mm dia}^{-1}$).

Analisando a variação diária da ET_o , percebe-se que esta foi menor em dias com chuva e maior nos dias sem chuva e de maior radiação solar incidente, conferindo com os dados meteorológicos registrados pela estação meteorológica automática. No experimento I, conduzido sob condições controladas, não se permitiu o ingresso de chuvas na área experimental, com exceção de parte das chuvas ocorridas nos dias 09 e 13 de Dezembro de 2013 (devido a problemas de operacionalização da estrutura metálica que cobre o experimento).

No experimento II (Figura 7b) a ET_o diária foi menor em comparação com a do Experimento I e também em relação à normal climatológica para Santa Maria para o período primavera-verão. Isso se deve, principalmente, a maior ocorrência de chuvas, as quais ficaram acima da média mensal histórica, com exceção de Janeiro

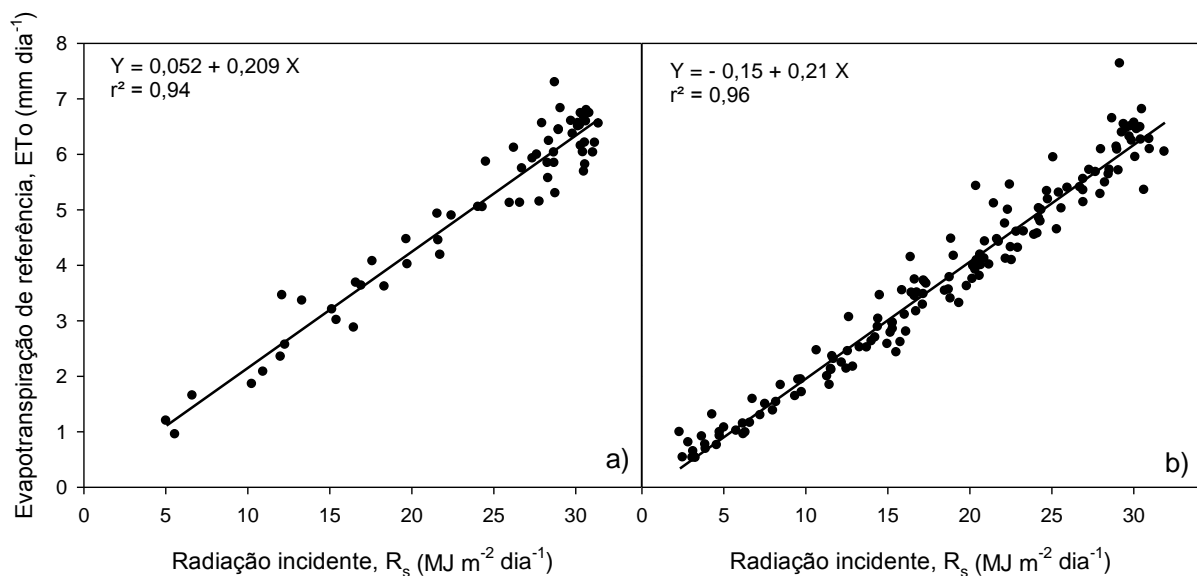
e Fevereiro. O número total de dias com chuvas também foi acima do normal, o que é característico de anos de El-Niño (STRECK et al., 2008), como foi o caso do ano de 2015/16.

Figura 7 - Variação diária da evapotranspiração de referência (ET_0) e dias com ocorrência de chuva pluvial durante o período de execução do experimento I, de 14/11/2013 a 14/01/2013 (a) e durante o experimento II, de 15/11/2015 a 10/04/2016 (b). Santa Maria, RS, 2016.



A relação da ET_o e a radiação solar (R_s) para os Experimento I e II é apresentada na figura 8 a e b. De acordo com Allen et al. (1998) e Jensen e Allen (2016), a ET_o é primariamente influenciada por fatores meteorológicos, principalmente a R_s , por ser a fonte de energia para a evaporação da água. Para evaporar 1 mm de água num período de 24 horas são necessários $2,45 \text{ MJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$ de R_s . Assim, quanto maior a R_s , maior é a ET_o . No período entre Novembro/2013 e Janeiro/2014 (Figura 7a), a R_s incidente foi sensivelmente maior ($24,01 \text{ MJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$) que no segundo experimento II ($18,30 \text{ MJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$), o que contribuiu para uma ET_o menor no período entre Novembro/15 e Abril/2016.

Figura 8 - Relação entre a radiação solar incidente (R_s) e a evapotranspiração de referência (ET_o) para os experimentos I, de 14/11/2013 a 14/01/2013 (a) e do experimento II, de 15/11/2015 a 10/04/2016 (b). Santa Maria, RS, 2016.



Valores discrepantes de ET_o em relação à R_s foram devidos à elevada velocidade do vento e umidade relativa do ar baixa, observada principalmente em dias de vento norte, com velocidades superiores a 3 m s^{-1} . Não se observou tendência de sub ou superestimação da ET_o durante os 62 e 148 dias de duração do experimento I e II (valores de R^2 variando de 0,94 a 0,96; para o experimento I e II, respectivamente), pelo método de Penman-Monteith (FAO 56).

5.2 EXPERIMENTO I – DINÂMICA DA ÁGUA NOS RESÍDUOS CULTURAIS EM UM SISTEMA IRRIGADO

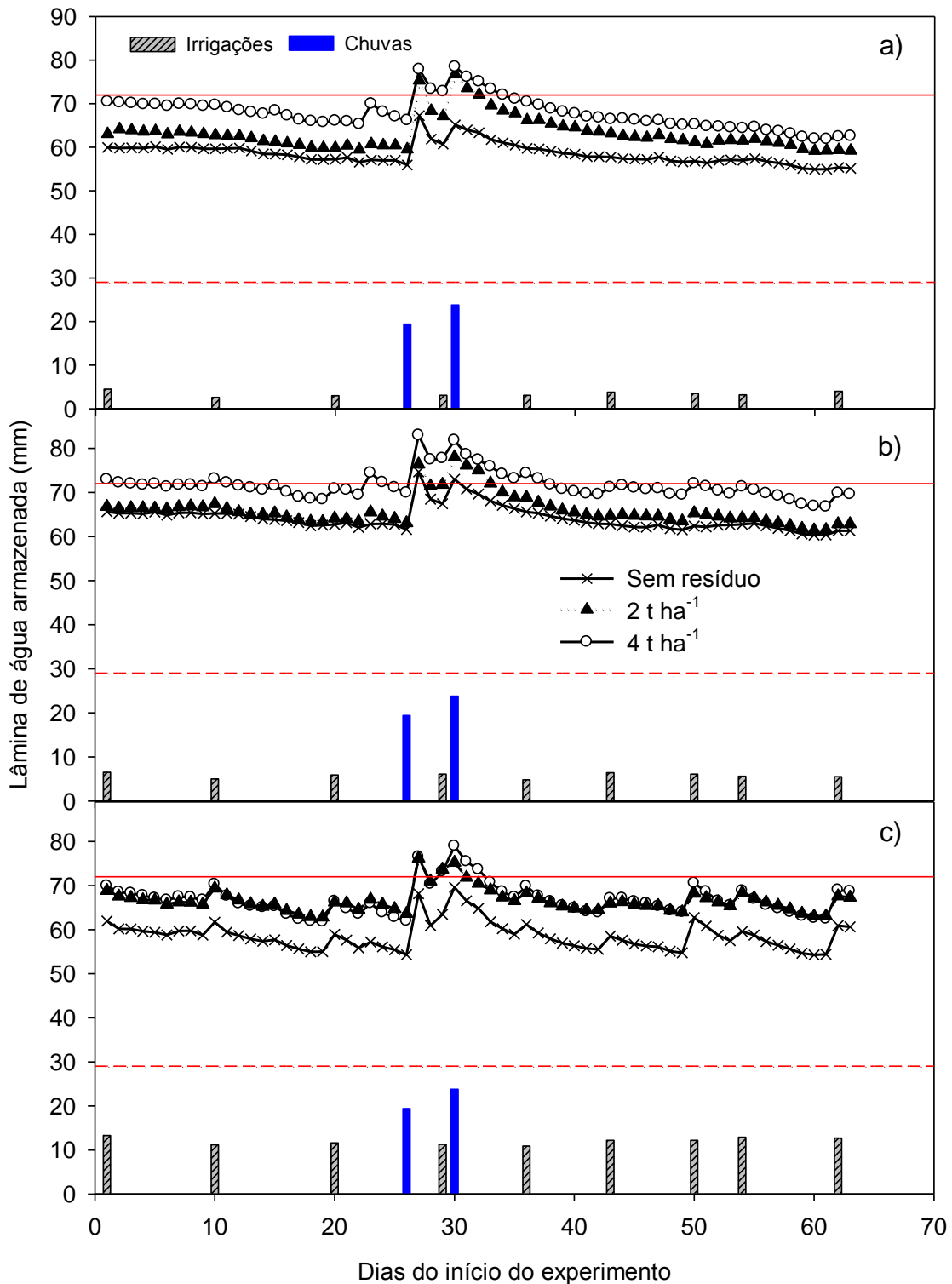
5.2.1 Efeito de resíduos culturais no conteúdo de água no solo

A variação do armazenamento de água no solo para a camada de 0-25 cm, nos diferentes níveis de resíduos e lâminas de irrigação aplicadas está apresentada na figura 9. A lâmina diária armazenada representa a média de três repetições, para sensores colocados nas profundidades de 0-10 e 10-25 cm. Esse experimento foi conduzido em condições controladas, evitando-se a entrada de água da chuva, de forma a avaliar a influência da irrigação por aspersão na retenção e armazenamento de água pelos resíduos culturais. Por isso, apenas duas chuvas foram registradas na área experimental, aos 26 (09/12) e 30 (13/12) dias do início do experimento, respectivamente. As duas chuvas foram muito intensas e acompanhadas de ventos muito fortes, o que dificultou o acionamento mecânico da estrutura metálica que cobre a área do experimento.

Observa-se ao longo de todo o período de avaliação que o solo sem a presença de resíduos culturais na superfície apresentou menor lâmina de água armazenada, em comparação aos tratamentos com 2 e 4 t ha⁻¹ de resíduos. O solo com 4 t ha⁻¹ de resíduos na superfície apresentou maior lâmina de água armazenada, durante todo o período de execução do experimento. Como não houve consumo de água devido à ausência de plantas, a variação na lâmina de água foi devido às perdas por evaporação e redistribuição interna no perfil.

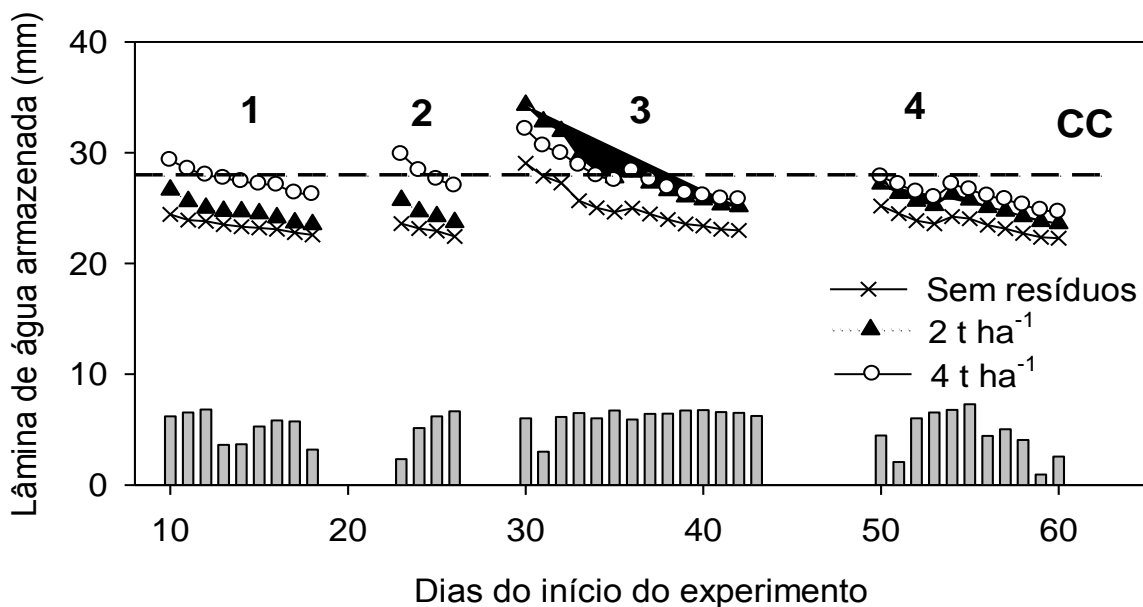
A lâmina de água armazenada se manteve próximo da lâmina na CC, durante a maior parte do período. Maior variação no armazenamento foi observada quando foram aplicadas lâminas maiores de irrigação (12,3 mm; Figura 9c), em relação às lâminas menores (3,4 mm; Figura 9a) e intermediárias (5,8 mm; Figura 9b). Maior declínio nas lâminas armazenadas, em todos os tratamentos, foram observadas na fase final do experimento, especialmente no tratamento onde a lâmina irrigada foi menor, em função da maior demanda evaporativa e da decomposição dos resíduos, deixando o solo mais exposto aos fatores meteorológicos.

Figura 9 – Efeito dos resíduos culturais na variação do armazenamento de água no solo (0-25 cm) entre 14 de Novembro de 2013 e 14 de Janeiro de 2014, nas diferentes lâminas de irrigação aplicadas: (a) menor, (b) intermediária e (c) maior. A linha contínua representa a lâmina armazenada na capacidade de campo (—) e a linha tracejada é a lâmina armazenada no ponto de murcha permanente (---).



Observando separadamente alguns ciclos de secagem durante o período de execução do experimento, percebe-se que a maior variação ocorre nos primeiros dias após o umedecimento que elevou a umidade para a capacidade de campo ou acima dessa (Figura 10).

Figura 10 - Efeito de resíduos culturais na superfície do solo na variação da lâmina de água armazenada na camada de 0-10 cm do perfil do solo para o experimento I. A linha horizontal tracejada corresponde à lâmina de água armazenada na Capacidade de Campo (CC). As barras verticais correspondem a evapotranspiração de referencia (ET_0) diária para quatros ciclos de secagem.



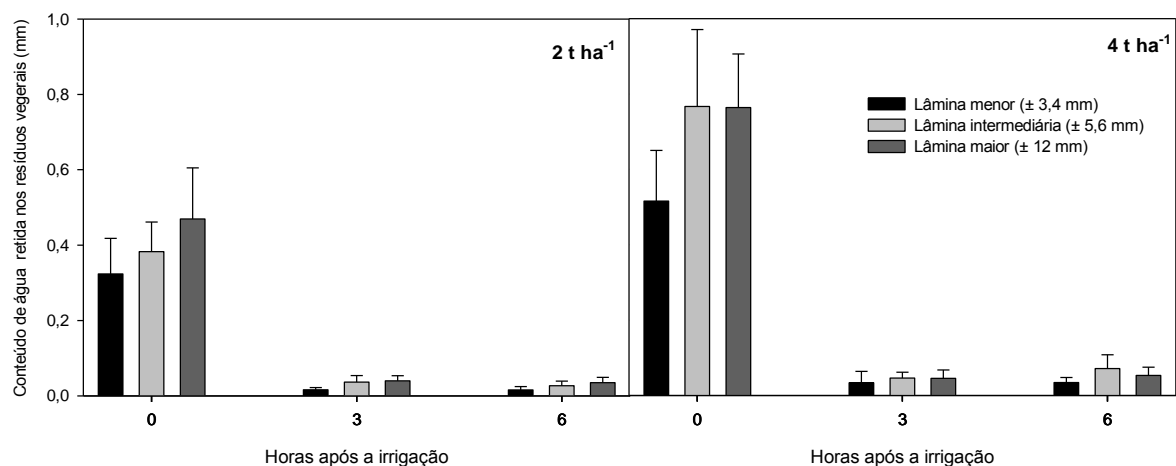
Quando a superfície do solo está úmida e a energia disponível para a evaporação não é limitante, as perdas de água por evaporação em solos descobertos superam a ET_0 diária (RITCHIE, 1972). No tratamento mantido com 4 t ha⁻¹ de resíduos culturais em superfície, nos ciclos de secagem 1 (23/11 a 01/12) e 2 (23 a 26/12), maior lâmina de água ficou armazenada na camada superficial do solo (0-10 cm), indicando que a camada mais espessa de resíduos pode ter contribuído mais efetivamente na redução do transporte de vapor de água do solo para a atmosfera. Resultados semelhantes foram encontrados por McMiller (2013) e Baumhardt e Jones (2002), no qual o solo descoberto perdeu mais da metade do conteúdo de água na camada superficial após três dias de secagem, enquanto o

solo mantido com uma camada de resíduos perdeu apenas 20%. No primeiro e segundo ciclos de secagem (Figura 10), o conteúdo de água no solo sob 4 t ha⁻¹ de resíduos ficou entre 16 e 20% acima da conteúdo de água no solo descoberto, sendo que a maior diferença ocorreu no primeiro dia após o umedecimento por irrigação. Nos ciclos 3 (13 a 25/12) e 4 (03 a 12/01/2016), essa diferença decresceu para 10%.

5.2.2 Efeito de resíduos culturais na interceptação da lâmina irrigada

Na figura 11 é apresentada a dinâmica da água nos resíduos vegetais durante um dia de avaliação, para os tratamentos mantidos com 2 e 4 t ha⁻¹ de resíduo em superfície e diferentes lâminas de irrigação aplicadas.

Figura 11 - Dinâmica da água nos resíduos vegetais em um dia de avaliação: logo após a irrigação (0 h), 3 e 6 h após a irrigação, nos dois manejos de cobertura do solo (2 e 4 t ha⁻¹ de MS) e nas três lâminas irrigadas. As linhas verticais sobre as barras representam o desvio padrão em relação à média das observações.



Observou-se maior retenção de água pelos resíduos imediatamente após o encerramento das irrigações no tratamento com 4 t ha⁻¹ de resíduos, comparado ao tratamento com 2 t ha⁻¹. Esses resultados diferem daqueles relatados por Price et al.

(1998), no qual resíduos culturais de trigo interceptaram $2,4 \text{ mm dia}^{-1}$, o que correspondeu a 44% da chuva aplicada artificialmente usando um simulador de chuva. O trabalho de Price et al. (1998) foi conduzido em ambiente temperado, cujas condições diferem das desse experimento.

Aproximadamente 3 horas após o término da irrigação, o conteúdo de água na palha apresentava valores semelhantes àqueles observados antes da irrigação, atestando a influência significativa dos fatores meteorológicos na dinâmica da água na superfície de solos (descobertos e/ou a lâmina interceptada pelos resíduos).

Para Klocke (2004a), a taxa de evaporação de água do solo é tanto maior quanto mais úmida estiver sua superfície. Aplicando a equação 8c, a partir dos dados da Tabela 1, a REW_{\max} na camada evaporável (0,15 m de espessura) resultou em 9,6 mm. No estágio “1” de evaporação, limitado pela disponibilidade de energia e na condição de solo próximo à CC (ciclo 1, Figura 10), a E_s potencial é 15% superior a ET_o (RITCHIE et al., 1989; ALLEN et al., 1998). A ET_o hourly acumulada nesse intervalo foi de aproximadamente 1,9 mm (considerando o intervalo entre 10 e 13 horas); ou seja, mais da metade da menor lâmina aplicada foi perdida devido a evaporação da água na superfície do solo. A água retida pelos resíduos culturais provavelmente também foi perdida por evaporação, uma vez que, não se verificou um incremento na lâmina de água infiltrada na primeira camada do solo em períodos superiores a 60 minutos após a irrigação. A W_{palha} coletada 24h após as irrigações foram influenciadas pela formação de orvalho na superfície do resíduo, e não pela irrigação do dia anterior.

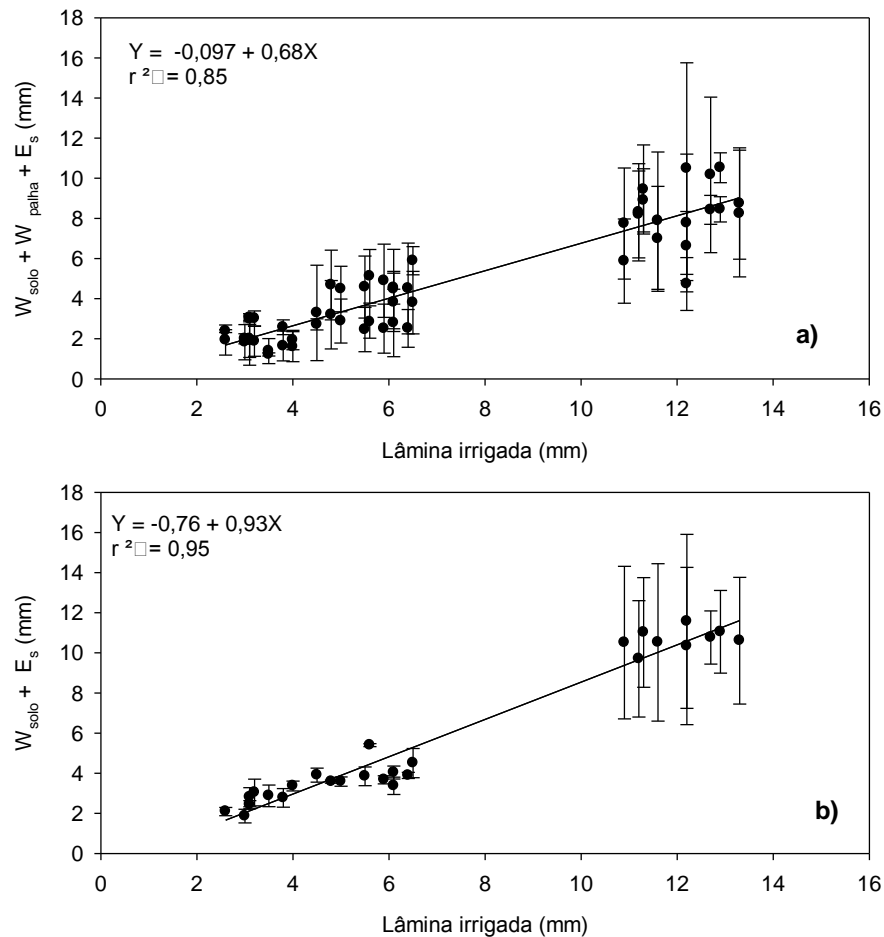
À medida que a REW_{\max} se esgota, durante os primeiros 2 a 3 dias após a irrigação e/ou chuva, inicia-se o estágio “2” de evaporação, o qual é limitado pela disponibilidade de água no solo, condutividade hidráulica do solo e estrutura e continuidade dos poros. Aplicando a equação 7 nos dados do anexo 1 e da tabela 1, observa-se que, para essa classe textural, a TEW_{\max} é de 22 mm. Significa que toda a variação da umidade do solo na camada superficial do solo (Figuras 9 e 10) ocorreu devido à evaporação. Observando a variação da lâmina armazenada em função do tempo de secagem, percebe-se que, a maior influência da presença de uma camada de resíduos vegetais na superfície do solo é na redução da REW. Entretanto, tanto a água interceptada pela palha como a infiltrada continua

evaporando ao longo do tempo, fazendo com que a evaporação acumulada ao final do período seja semelhante entre o solo descoberto e o com resíduos. Resultados semelhantes foram observados por Dalmago et al. (2010), comparando o sistema plantio direto e convencional. No caso desse experimento, o solo sem resíduos não foi cultivado ou revolvido, de forma que, a característica dos poros não foi alterada, fazendo com que o fluxo ascendente de água persistisse ao longo do tempo, sob influência dos fatores meteorológicos, aumentando a evaporação acumulada. Fuchs e Hadas (2011) encontraram que, quanto maior o índice de cobertura proporcionado pela camada de resíduos, maior será a resistência aos fatores convectivos e ao fluxo de vapor de água do solo. Entretanto, essas observações necessitam ser aferidas para as condições meteorológicas na primavera-verão no Sul do Brasil, através da medição do albedo e espessura dos resíduos, para poder calcular a resistência efetiva ao fluxo de vapor imposto pelos resíduos.

O aumento da lâmina de irrigação de 3,4 (menor lâmina) para 12 mm (maior lâmina, incrementou linearmente a interceptação de água no tratamento com 2 t ha⁻¹ de resíduos na superfície, imediatamente após a irrigação. No tratamento mantido com 4 t ha⁻¹ de resíduos, aproximadamente 14% da lâmina menor e intermediária foram retidos pelos resíduos, enquanto que, para a maior lâmina, a percentagem de lâmina interceptada foi reduzida para 6%, indicando que, a eficiência da irrigação por aspersão pode ser aumentada quando se incrementa a lâmina aplicada.

A relação entre a lâmina de irrigação aplicada e a soma da água infiltrada (W_{solo}), interceptada pelos resíduos (W_{palha}) e evaporada (E_s) é apresentada na figura 11. Observou-se uma relação linear positiva entre a lâmina aplicada e os diferentes componentes do balanço hídrico (Figura 12a), para 2 e 4 t ha⁻¹ de resíduo na superfície do solo. Como poderia ser esperado, quanto menor a lâmina aplicada, menor é a infiltração da água e maior é a contribuição da E_s no balanço hídrico da camada superficial do solo. A aplicação de uma lâmina de irrigação próxima de 12 mm (maior lâmina) resultou em maior variabilidade entre os componentes do balanço hídrico do solo (infiltrado + retido no resíduo + evaporado). Essa menor lâmina infiltrada observada pode ter sido devido ao fato de ser utilizada somente a camada superficial do solo (0-25 cm), uma vez que, para a lâmina menor (média de 3,4 mm) e intermediária (5,8 mm), não se observou infiltração para camadas abaixo dessa.

Figura 12 – Relação entre as lâminas irrigadas e a água infiltrada (W_{solo}), retida pelos resíduos (W_{palha}) e evaporada (E_s) para o solo com 2 e 4 t ha⁻¹ de resíduos culturais na superfície do solo (a) e solo descoberto (b). As linhas verticais representam o desvio padrão entre as médias dos tratamentos.

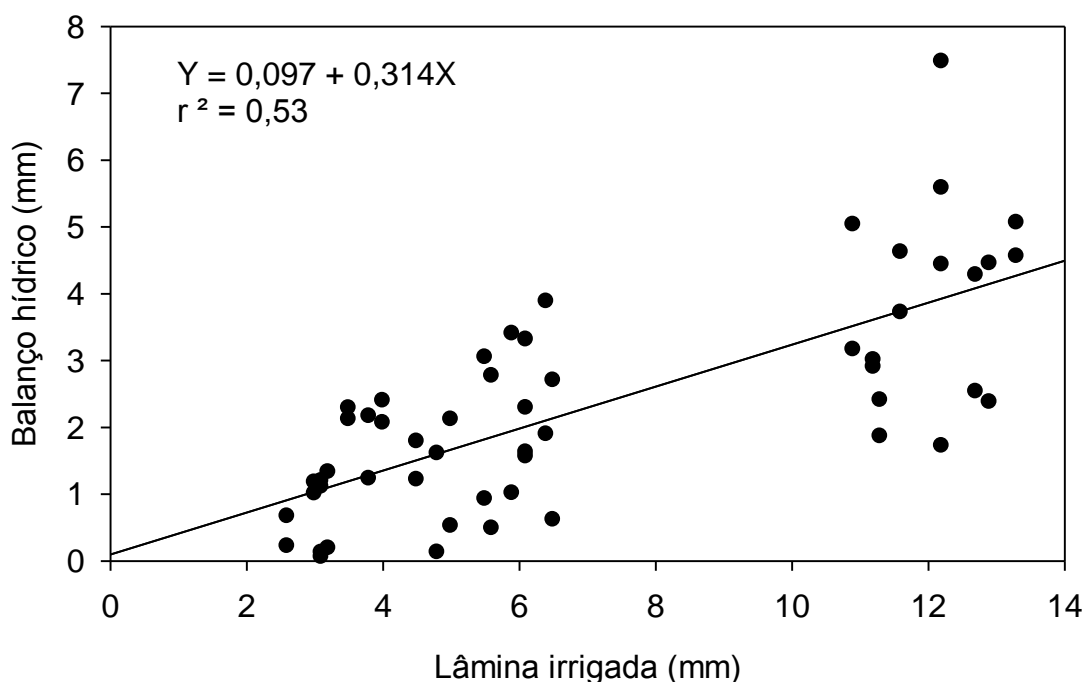


Embora as relações entre a lâmina irrigada e os componentes do balanço hídrico tenham apresentado um bom ajuste para o modelo linear (R^2 variando entre 0,85 e 0,95; para os tratamentos com resíduos e sem resíduos, respectivamente), aproximadamente 35% da água aplicada não foi computada no balanço hídrico e podem ser classificadas como erro experimental. A água não computada pode estar tanto na E_s , ou seja, uma maior porcentagem deve ser atribuída à E_s , mesmo com a presença de resíduos na superfície e, eventualmente, à equívocos na mensuração da lâmina bruta que efetivamente atingiu o solo em cada parcela experimental, precisamente na área de abrangência dos sensores FDR.

Na figura 12b é apresentada a relação entre a lâmina irrigada e os componentes do balanço hídrico (infiltrado + evaporado) para o solo sem resíduos na superfície. Obteve-se um melhor ajuste para o modelo linear ($R^2 = 0,95$) em relação aos tratamentos com resíduos. Durante todo o período de avaliação, aproximadamente 50% da água computada no balanço hídrico foi devido às perdas por E_s , o que era esperado, uma vez que, devido à exposição contínua da superfície à ação dos elementos micrometeorológicos, sobretudo a R_s . Em solos descobertos e com umedecimento frequente pela irrigação, Klocke et al. (2009) encontraram resultados semelhantes, para um solo franco siltoso, no Texas.

Uma melhor compreensão da relação entre a lâmina irrigada e o balanço hídrico do solo (equação 9) pode ser visualizada observando a figura 13, onde estão computadas as perdas, ou seja, a parte da lâmina irrigada que não foi incorporada ao solo, não foi retida pela palha ou evaporada. Não se obteve um bom ajuste para o modelo linear ($R^2 = 0,53$). Grande parte dessa variação é possivelmente causada pela impossibilidade de detectar corretamente a dinâmica da água quando se aplicou lâminas maiores de irrigação.

Figura 13 – Relação entre a lâmina aplicada e o balanço hídrico do solo, para 2 e 4 t ha^{-1} de resíduos na superfície.



De acordo com Pereira (1999), melhorar o desempenho dos sistemas de irrigação passa obrigatoriamente pelo conhecimento de fatores ligados ao sistema hidráulico, do solo (infiltração de água) e da uniformidade de aplicação em toda a área. No caso da microaspersão, Keller e Bliesner (1990) relatam que, a eficiência da aplicação da lâmina por esse sistema requer a combinação de fatores como, pressão de serviço uniforme, diâmetro molhado dos aspersores, diâmetro da gota e espaçamento adotado em função das condições meteorológicas (velocidade do vento e umidade relativa do ar). Na prática, a pressão de serviço não deveria variar mais de 20% entre os aspersores, de forma a evitar que a variação da vazão seja menor que 10%. Entretanto, essas condições são difíceis de serem obtidas em nível de campo.

Maiores discrepâncias no balanço hídrico foram observadas para as lâminas maiores (média de 12,3 mm), embora as perdas totais observadas tenham sido maiores quando se aplicou lâminas menores. A lâmina aplicada em cada evento de irrigação deve ser tal que não provoque perdas por escoamento superficial ou percolação profunda, e que atenda adequadamente o requerimento hídrico das plantas na profundidade do perfil do solo influenciado pela distribuição do sistema radicular.

O balanço hídrico considerado ideal é quando o fluxo de entradas e saídas no sistema é nulo. Para Yamanaka et al. (2004), pouca atenção tem sido dada aos mecanismos que induzem a redução da evaporação em solos com resíduos culturais na superfície. Estes autores relatam ainda que, o aumento de resistência ao vapor de água é a função mais importante do uso de uma cobertura, no entanto, em uma condição de solo descoberto, durante o processo de secagem do solo, ocorre a formação de uma camada superficial seca, em que a água se move apenas na fase de vapor. Esta camada atua como cobertura isolante natural.

Turmel et al. (2015) destacam que, embora a maioria dos estudos encontraram efeitos positivos da retenção de água pelos resíduos culturais, os efeitos negativos tem sido relatados em alguns ambientes: a imobilização do nitrogênio, reduzindo a disponibilidade para as culturas; a manutenção dos resíduos na superfície resulta na diminuição da temperatura do solo, causando dificuldade de germinação de sementes e desenvolvimento das culturas, especialmente em regiões

de clima frio. Em regiões com altos volumes de chuva, a retenção de água pelos resíduos podem causar problemas com encharcamento e, por outro lado, em regiões semi-áridas, com pequenos e frequentes eventos de chuva, os resíduos podem interceptar a água e aumentar a evaporação (KOZAK et al., 2007; COOK et al., 2006)

A redução da evaporação do solo é essencial para aumentar a eficiência do uso da água nos cultivos agrícolas. O uso de cobertura sobre o solo é uma maneira eficiente para reduzir a troca de vapor de água entre a superfície do solo e a atmosfera. Por tanto, a evaporação de água a partir de um solo com cobertura (resíduos vegetais) diminui em relação a um solo descoberto e aumenta a água disponível para a transpiração da cultura (SARKAR et al, 2007; HOU et al., 2010; ZRIBI, et al. 2015). O tipo, quantidade, ou a espessura do material de cobertura, e a demanda evaporativa da atmosfera determinam a taxa de secagem do solo (TOLK et al., 1999).

5.2 EXPERIMENTO II - EVAPORAÇÃO DA ÁGUA DO SOLO COM MICROLISÍMETROS EM POUSSO E SOB O CULTIVO DE SOJA

Conforme discutido previamente (Figuras 7b e 8b), o experimento II foi conduzido em ano de El-Niño, resultando em um acumulado de precipitações pluviiais superior às médias climatológicas históricas para Santa Maria e uma ET_0 inferior às médias mensais para o período no qual o experimento foi conduzido. Durante os 148 dias de experimentação (15 de novembro de 2015 a 10 de abril de 2016), foram registrados um total acumulado de 951 mm de chuva.

As temperaturas máximas observadas foram ligeiramente inferiores ($27,9^{\circ}\text{C}$) à média histórica do período ($28,6^{\circ}\text{C}$), enquanto que as temperaturas mínimas foram superiores ($18,9^{\circ}\text{C}$) à média histórica ($17,8^{\circ}\text{C}$) para esse período. Os fatores que mais influenciam a transpiração dos vegetais e a evaporação são a radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa do ar. Embora a velocidade do vento não tenha sido alterada pela ocorrência do fenômeno El-Niño, em relação às médias do período, a umidade relativa do ar foi superior (84%) em relação à média

climatológica histórica (74%). A elevada umidade relativa do ar e a reduzida radiação solar incidente, associado ao grande número de dias com chuva e nebulosidade elevada, afetou significativamente a ET_o , a qual ficou abaixo esperado para o período (Figura 7b).

O uso de resíduos vegetais como cobertura do solo pode reduzir a evaporação do solo, a variação de temperatura, a germinação e crescimento de plantas daninhas, além de ser fonte de nutrientes às plantas cultivadas. Muitos estudos têm avaliado o conteúdo de água no solo e a variação de temperatura em profundidade em função do uso de diferentes resíduos e quantidades; outros tantos têm avaliado a cobertura do solo no controle de plantas daninhas, bem como a emergência destas em diferentes densidades de cobertura. No entanto, pouca informação tem sido gerada no que diz respeito de perdas por evaporação em função da interceptação ou capacidade de retenção de água dos próprios resíduos vegetais utilizados na cobertura do solo. Diante da necessidade de uma determinação precisa e eficiente na gestão dos recursos hídricos, especialmente no manejo da irrigação, esta informação tem grande importância.

É usualmente documentado na literatura que a maior importância da manutenção de resíduos na cobertura do solo é no início do ciclo de crescimento das culturas. Entretanto, a combinação do uso de resíduos com sombreamento do dossel obteve os maiores valores de conteúdo de água no ML em todo o ciclo da cultura, representado pelo tratamento 4 t ha^{-1} de resíduo sob o cultivo de soja. Ainda, pode-se observar que as perdas por E_s no tratamento sem resíduos sob cultivo de soja foram similares as observadas na área em pousio com 4 t ha^{-1} ; entretanto, estatisticamente, não houve diferença significativa entre os tratamentos nos diferentes ciclos de evaporação, que estão apresentados na sequência do trabalho:

5.2.1 Evaporação da água do solo sem e com resíduos culturais

Na figura 14 e na tabela 3 são apresentadas a E_s diária e acumulada da água do solo em diferentes ciclos de secagem, para os tratamentos com 0; 2 e 4 t ha^{-1} de resíduos vegetais em uma área em pousio, determinada em ML. Observa-se que,

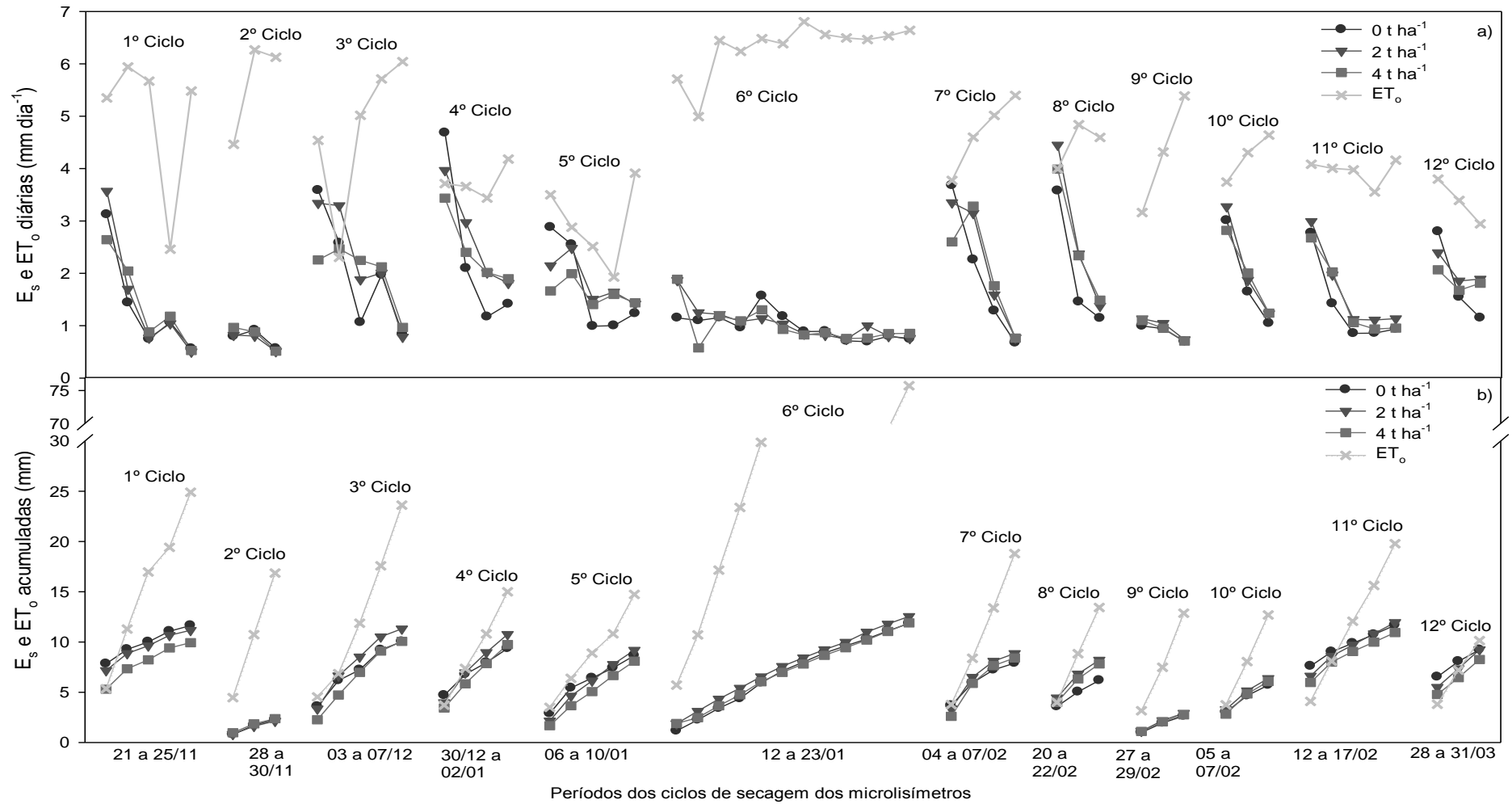
em todos os ciclos de secagem, a ET_o foi sempre superior a E_s , nos tratamentos com e sem resíduos na superfície. Não observou-se diferença significativa na E_s para os diferentes tratamentos (níveis de cobertura do solo). Ao todo foram observados 12 ciclos de secagem, com duração mínima de cada ciclo de 3 dias (Tabela 3, Figura 14).

Tabela 3 – Evapotranspiração de referência (média, ET_o), evaporação de água do solo acumulada (E_s) e razão E_s/ET_o , observada durante o período dos respectivos ciclos de secagem do solo na área em pousio nos diferentes níveis de cobertura do solo (0; 2 e 4 t ha⁻¹), entre Novembro de 2015 e Abril de 2016.

Ciclo de secagem	Período	ET_o (mm dia ⁻¹)	E_s acumulada (mm)			E_s/ET_o		
			0 t ha ⁻¹	2 t ha ⁻¹	4 t ha ⁻¹	0 t ha ⁻¹	2 t ha ⁻¹	4 t ha ⁻¹
1º ciclo	20 a 25/11	4,98	11,6	11,2	9,9	0,30	0,32	0,31
2º ciclo	28 a 30/11	5,62	2,3	2,1	2,4	0,14	0,13	0,15
3º ciclo	03 a 07/12	4,72	10,0	11,3	10,1	0,52	0,60	0,51
4º ciclo	30/12 a 02/01	3,75	9,4	10,8	9,8	0,63	0,72	0,66
5º ciclo	06 a 10/01	2,95	8,6	9,2	8,1	0,59	0,66	0,58
6º ciclo	12 a 23/01	6,31	11,8	12,5	11,9	0,16	0,17	0,16
7º ciclo	04 a 07/02	4,70	7,9	8,8	8,4	0,46	0,51	0,47
8º ciclo	20 a 22/02	4,48	6,2	8,2	7,8	0,48	0,63	0,60
9º ciclo	27 a 29/02	4,29	2,6	2,9	2,8	0,22	0,25	0,23
10º ciclo	05 a 07/03	4,23	5,7	6,4	6,1	0,47	0,52	0,50
11º ciclo	12 a 17/03	3,95	11,7	11,9	10,9	0,34	0,42	0,38
12º ciclo	28 a 31/03	3,38	9,2	9,2	8,3	0,53	0,61	0,55

Maior relação E_s/ET_o foi observada para o tratamento com 2 t ha⁻¹ de MS na maioria dos ciclos de secagem, indicando que, além da quantidade de resíduos presentes na superfície ou a espessura da camada, a distribuição dessa sobre a superfície pode influenciar significativamente a E_s . Klocke et al (2009) observaram que o incremento em massa seca de resíduo nem sempre apresenta correlação positiva com o índice ou fração de cobertura. Uma das razões para a menor E_s observada no solo descoberto (0 t ha⁻¹ de MS) pode estar relacionada ao tamanho da parcela (aproximadamente 1 m² de área ao redor do ML), fazendo com que os fatores advectivos tivessem importância minimizada no processo de evaporação.

Figura 14 – Evapotranspiração de referência (ET_o) evaporação de água no solo (E_s) diárias e acumuladas nos tratamentos 0; 2 e 4 $t\ ha^{-1}$ de resíduos na superfície do solo, nos diferentes ciclos de secagem do solo em uma área em posouso.



A E_s é mais expressiva no estágio “1” de evaporação, quando os fatores meteorológicos atuando sobre a superfície úmida, com maior conteúdo de água no solo, potencializam as perdas por evaporação (Figura 14a). Entretanto, como a E_s foi semelhante entre os tratamentos, parece ter havido uma contribuição significativa do fator solo na evaporação acumulada do estágio “2”, principalmente nos tratamentos com resíduos na superfície, indicando que a quantidade de resíduos não foi eficiente em reduzir a E_s . Esses dados são semelhantes aos encontrados por Dalmago (2010), onde o solo com resíduos teve uma evaporação acumulada maior ao final do ciclo do milho, em comparação ao sistema de cultivo convencional.

A razão entre E_s/ET_o foi maior nos primeiros dias após o umedecimento do solo, com exceção dos 3º e 5º ciclos de secagem (Anexo 3), quando a maior E_s ocorreu no segundo dia. Essa reduzida E_s ocorreu em função da menor demanda evaporativa (ET_o baixa). Não se observou diferenças na taxa diária de E_s entre os tratamentos com 0 a 4 t ha⁻¹ de resíduos, indicando que a quantidade de massa seca não influenciou a E_s .

Uma maior E_s em relação à ET_o era esperada, em função do grande número de eventos que umedeceram a superfície do solo (chuva). Entretanto, o excesso de chuva também reduziu a ET_o diária, afetando também os demais fatores meteorológicos responsáveis pela perda de água para a atmosfera. Embora a relação E_s/ET_o tenha variado ao longo de todo o período de avaliação, dentro do mesmo ciclo de secagem (Anexo 3) a razão se mostrou muito semelhante. Klocke et al. (2009) avaliaram a efetividade de resíduos culturais de trigo e milho, e encontram que, num ano, os resíduos de trigo foram 100% mais eficientes em reduzir a E_s do que os resíduos de milho, enquanto que essa eficiência foi menor. Os autores atribuíram a maior eficiência dos restos culturais de trigo na redução da evaporação à maior rugosidade superficial da palhada de trigo, em relação à de milho, a qual se apresenta mais achatada. Para Aiken et al. (2003), os caules de trigo, quando em pé, reduzem mais efetivamente os componentes convectivos da evaporação, comparado aos resíduos espalhados ou achatados.

Maiores valores de evaporação foram observados no primeiro dia após a ocorrência de uma chuva (Figura 14a). A E_s medida não apresentou uma boa correlação com a ET_o (dados não apresentados), ao contrário dos resultados

encontrados por Flumignan et al. (2011), que encontraram coeficientes de correlação satisfatórios quando relacionaram a E_s medida em lavoura da café irrigada por aspersão ($R^2 = 0,57$) e gotejamento ($R^2 = 0,65$), usando regressões lineares forçadas à origem. A regressão linear forçada à origem representa um excelente modo gráfico de obter o coeficiente de evaporação (K_e), possibilitando a predição da E_s com uma precisão igual ao R^2 . Ajustes não satisfatórios entre a ET_o e a E_s normalmente são devidos às variações no conteúdo de água no solo, assim como a variação na ET_o , indicando que a medição da umidade do solo simultaneamente às pesagens dos ML melhora significativamente a medida da E_s . Entretanto, analisando a relação entre E_s do tratamento solo descoberto e ET_o acumulados em cada ciclo de secagem obtém-se um R^2 superior a 0,91; sendo que em 8 ciclos de secagem o R^2 foi igual ou superior a 0,98 (Anexo 4); indicando uma boa correlação entre os dados acumulados em cada ciclo.

5.2.2 Efeito do dossel das plantas na evaporação

A evaporação acumulada para os tratamentos com 0; 2 e 4 t ha⁻¹ de resíduos na superfície em área cultivada com a cultura da soja em 6 ciclos de secagem é apresentada na figura 15. Tanto a taxa de E_s diária como a acumulada decresceram com o aumento do dossel vegetativo da soja. Assim, a relação E_s/ET_o também foi reduzida na mesma proporção (Tabela 4).

Durante os estádios iniciais do ciclo de desenvolvimento da soja observou-se maior E_s no tratamento mantido sem resíduos, enquanto que, nos tratamentos mantidos com 2 a 4 t ha⁻¹ de resíduos, a E_s foi semelhante. A maior relação E_s/ET_o foi observada nos primeiros ciclos de secagem (1° e 2°), para o tratamento solo descoberto (0 t ha⁻¹), próximo dos 30 dias após a semeadura da soja, quando esta ainda não sombreava completamente a superfície do solo e no período de alta demanda evaporativa da atmosfera, como indicada pela relação E_s/ET_o no primeiro ciclo de secagem.

Figura 15 – Evaporação (E_s) diária (a) e acumulada (b) da água do solo nos diferentes tratamentos 0; 2 e 4 t ha⁻¹ de MS superfície do solo, nos diferentes ciclos de secagem do solo em uma área cultivada com soja e a evapotranspiração de referência (ET_0).

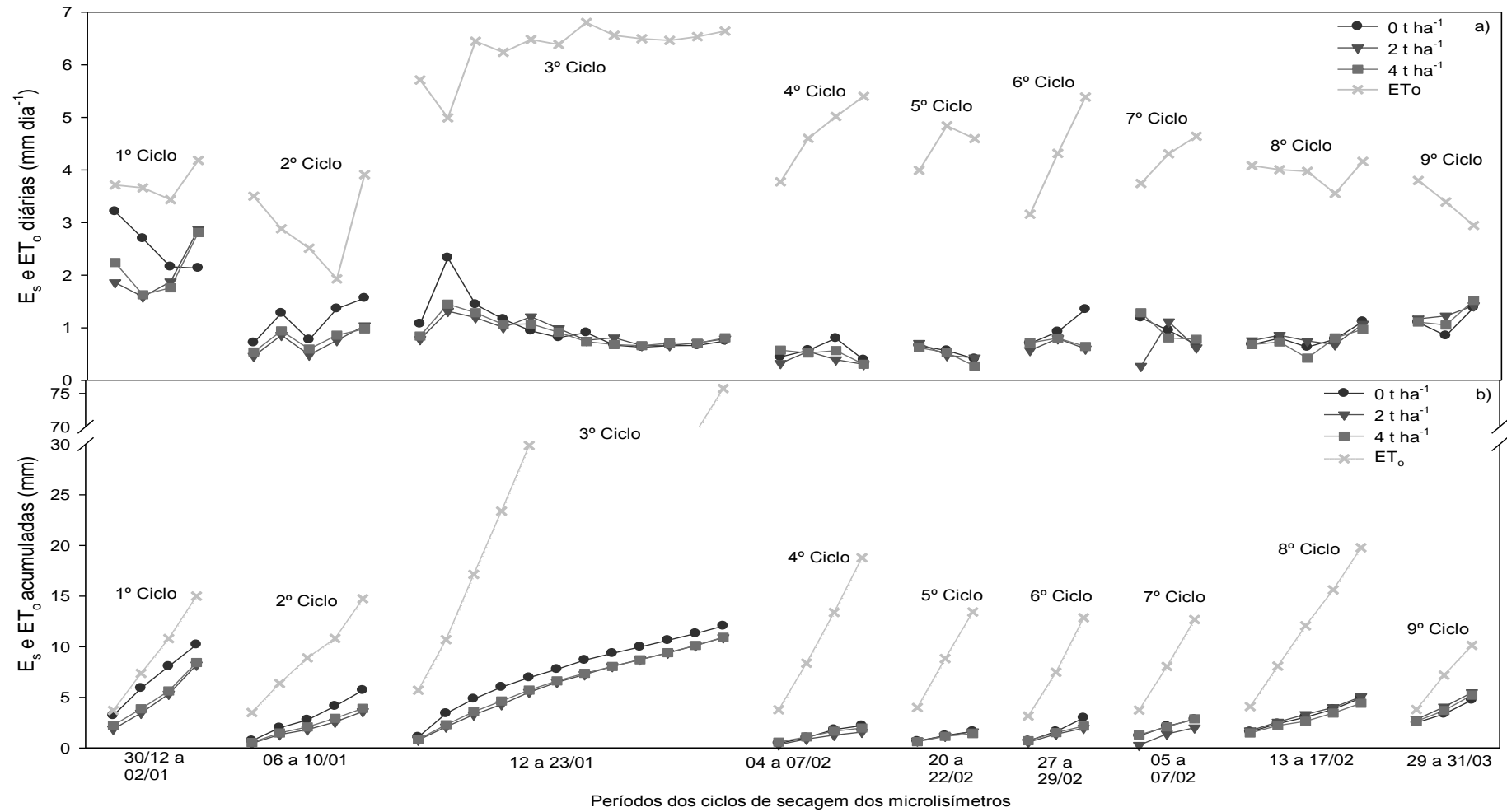


Tabela 4 – Evaporação acumulada de água do solo (E_s), evapotranspiração de referência (ET_o), razão E_s/ET_o observada durante os diferentes ciclos de secagem do solo na área cultivada com soja, entre Novembro de 2015 e Abril de 2016.

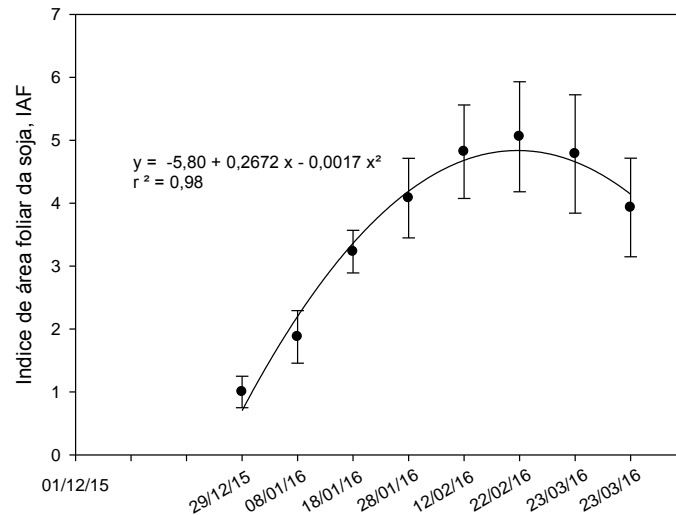
Ciclo de secagem	Período	ET_o (mm dia ⁻¹)	E_s (mm)			E_s/ET_o		
			0 t ha ⁻¹	2 t ha ⁻¹	4 t ha ⁻¹	0 t ha ⁻¹	2 t ha ⁻¹	4 t ha ⁻¹
1º ciclo	30/12 a 02/01	3,75	10,2	8,2	8,4	0,69	0,54	0,56
2º ciclo	06 a 10/01	2,95	5,7	3,6	3,9	0,41	0,26	0,28
3º ciclo	12 a 23/01	6,31	12,1	10,9	11	0,17	0,15	0,15
4º ciclo	04 a 07/02	4,70	2,2	1,6	2	0,12	0,09	0,11
5º ciclo	20 a 22/02	4,48	1,6	1,6	1,4	0,12	0,12	0,11
6º ciclo	27 a 29/02	4,29	3	2	2,2	0,23	0,16	0,18
7º ciclo	05 a 07/03	4,23	2,82	2	2,9	0,23	0,15	0,23
8º ciclo	13 a 17/03	3,95	4,94	5,1	4,4	0,20	0,21	0,18
9º ciclo	29 a 31/03	3,4	4,7	5,5	5,2	0,34	0,38	0,37

Ritchie e Burnett (1971) desenvolveram uma primeira aproximação visando separar a contribuição dos fatores meteorológicos e do dossel vegetativo das plantas no processo de evaporação. Segundo esses autores, quando o IAF for menor que 2,7; a E_s é fortemente influenciada pela demanda evaporativa da atmosfera. À medida que a superfície do solo é sombreada pelas plantas, a razão E_s/ET_o se relaciona com o IAF pela seguinte equação: $E_s/ET_o = -0,21 + 0,70 \text{ IAF}^{1/2}$.

O momento a partir do qual o dossel vegetativo é completo depende do espaçamento entre as linhas de plantas. Menores taxas de E_s foram observados no final do período vegetativo e durante o estágio reprodutivo, período em que a cultura estava com o IAF máximo (Figura 16). Esses resultados corroboram os de Odhiambo e Imak (2012) e Klocke et al. (2009), que encontraram maior contribuição da E_s em relação a ET_c e ET_o nos estádios iniciais e finais, da soja e milho, respectivamente.

A extração de água pelas raízes é normalmente desconsiderada com o uso dos ML, resultando em um maior teor de água no solo no ML em relação à área circundante, no final de um ciclo de secagem sob um dossel de cultura; por tanto, as medidas de evaporação diária podem estar superestimando a E_s (WEI et al., 2015; ZHAO et al., 2013; KLOCKE et al., 1990). Todd et al. (1991) concluíram que o uso de resíduos vegetais como cobertura morta no cultivo de milho reduziu a evaporação em comparação com o solo descoberto e esta redução foi menor em áreas de sequeiro do que em áreas irrigadas, com maior disponibilidade de água

Figura 16 – Índice de área foliar (IAF) da cultura da soja durante o ciclo de desenvolvimento.



Por outro lado, Zribi et al. (2015) avaliando o efeito de três diferentes coberturas do solo (solo descoberto, geotêxtil e 10 cm de casca de pinheiro) sobre a E_s com ML obtiveram relação linear positiva entre E_s e conteúdo de água no solo nos três tratamentos. Os autores justificam que essas relações são lineares porque a maioria das observações referem-se a queda da taxa de evaporação, pois o conteúdo de água no ML foi o fator limitante de evaporação. Quando o conteúdo de água aumentou, as taxas de evaporação foram maiores no solo descoberto, intermediário no tratamento com casca de pinheiro e menor no geotêxtil. Para os ciclos de secagem longos e conteúdo de água no solo relativamente baixo, as diferenças de E_s entre os tratamentos foram pequenos, resultados semelhantes foram obtidos por Unger e Parker (1976) e Xie et al. (2006), com E_s quase idêntica em todos os tratamentos de cobertura testados por longos períodos de evaporação e de secagem subsequente dos solos.

Para uma maior eficiência da água de irrigação, aproveitando as propriedades isolantes dos resíduos vegetais na cobertura do solo e minimizando as perdas por evaporação em função da interceptação da água, os resultados obtidos neste trabalho indicam que o manejo de irrigação (em sistema de aspersão) deve ser realizado em horários de menor demanda atmosférica, priorizando a aplicação de maiores volumes e menores frequências de irrigação, além de ser compensada a

lâmina que fica retida no resíduo, considerando a quantidade de massa seca na superfície do solo. Segundo Shaw et al. (2005), a economia de água pode ser alcançada através do aumento do intervalo entre as irrigações; considerando o tipo e a distribuição da massa seca (porcentagem de cobertura) e a uniformidade da irrigação.

No ambiente, nota-se que a manutenção dos resíduos sobre o solo pode modificar o movimento da água aplicada por aspersores ou chuva. Segundo descrevem Shaw et al. (2005) em uma pesquisa de campo, parte da água aplicada por sistema de aspersão não chegou até o solo, foi interceptada pelos resíduos e sendo posteriormente evaporada, embora o manejo de irrigação tenha sido realizado de forma adequada, com aplicações frequentes, resultou em sub-irrigação levando a morte das plantas.

6 CONCLUSÕES

- A presença dos resíduos vegetais na superfície mantém o solo mais úmido. A maior influência desta camada de resíduos na superfície do solo é na redução da evaporação de água no solo no início do ciclo de desenvolvimento das culturas.
- A eficiência da água na irrigação por aspersão pode ser aumentada quando se incrementa a lâmina aplicada. Quanto menor a lâmina aplicada, menor é a infiltração da água e maior é a contribuição da E_s no balanço hídrico da camada superficial do solo.
- A lâmina de água retida pelos resíduos vegetais depositados na superfície do solo relaciona-se melhor com a quantidade de resíduo mantido na superfície do solo do que com a lâmina de água de chuva ou da irrigação por aspersão.
- A evaporação da água do solo é fortemente influenciada pela demanda evaporativa da atmosfera e relaciona-se com a cobertura do solo (com resíduos vegetais) e com o índice de área foliar das culturas. Após o sombreamento parcial da superfície do solo pelo dossel vegetativo das plantas e a manutenção de 4 t ha^{-1} de resíduos vegetais resultou em menor evaporação e conseqüentemente maior disponibilidade de água no solo às plantas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIKEN, R. M.; NIELSEN, D. C.; ABUJA, R. Scaling effects of standing crop residues on the wind profile. **Agronomy Journal**. 95, 4. 1041-1046. 2003.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. (Paper, 56). Roma: **FAO - Irrigation and drainage**, p.301. 1998.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA L.S.; SMITH, M.; RAES, D.; WRIGHT, J.L. FAO-56 Dual Crop Coefficient Method for Estimating Evaporation from Soil and Application Extensions. **J. Irrig. Drain. Engng**. 131(1): 2-13. 3. 2005a.
- ALLEN, R.G.; PRUITT, W.O.; RAES, D.; SMITH, M.; PEREIRA L.S.. Estimating Evaporation from Bare Soil and the Crop Coefficient for the Initial Period Using Common Soils Information. **J. Irrig. Drain. Engng**. 131(1): 14-23. 2005b.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; HOWELL, T.A.; JENSEN, M.E. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. **Agricultural Water Management**. 98 (6), 899–920. 2011.
- ALMEIDA, R. E. **Evaporação e temperatura em solos mantidos com diferentes quantidades de resíduos em superfície**. 2011.Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2009.
- ANGUS D. E.; WATTS P. J. Evapotranspiration—how good is the Bowen ratio method? **Agricultural Water Management**. 8, 133-50. 1984.
- AYDIN, M.; YANG, S. L.; KURT, N.; YANO, T. Test of a simple model for estimating evaporation from bare soils in different environments. **Ecological Modeling**, v.182, p.91-105, 2005.
- BALWINDER-SINGHA; EBERBACHA, P. L.; HUMPHREYSB, E; KUKALC, S. S. The effect of rice straw mulch on evapotranspiration, transpiration and soil evaporation of irrigated wheat in Punjab, India. **Agricultural Water Management**. 98 1847– 1855, 2011. DOI:10.1016/j.agwat.2011.07.002.
- BAUMHARDT, R. L.; JONES, O. R. Residue management and tillage effects on soil-water storage and grain yield of dryland wheat and sorghum, for a clay loam in Texas. **Soil Tillage Res**. 68, 71–82. 2002.
- BRAGAGNOLO, L.; MIELNICZUK, J. Cobertura do solo por palha de trigo e seu relacionamento com a temperatura e umidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Campinas, v. 14, p. 369 – 374.1990.
- BRISTOW, K.I., CAMPPELL, G.S. Simulation of heat and moisture transfer through a surface residue–soil system. **Agric. Forest Meteorol**. 36, 193–214. 1986.

BURT, C.; MUTZIGER, A.; ALLEN, R.; HOWELL, T. Evaporation Research: Review and Interpretation. **J. Irrig. Drain Eng.** 37-58. 2005.

DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2005\)131:1\(37\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:1(37))

CARLESSO, R.; SPOHR R. B.; ELTZ, F. L. F.; FLORES, C. H. Runoff estimation in southern Brazil based on Smith's modified model and the Curve Number method. **Agricultural Water Management.** 98(6), 1020–1026. 2011.

CHEN, S. Y.; ZHANG, X. Y.; PEI, D.; SUN, H. Y.; CHEN, S. L. Effects of straw mulching on soil temperature, evaporation and yield of winter wheat: field experiments on the North China Plain. **Annals of Applied Biology**, v.150, p.261-268, 2007. ISSN 0003-4746.

COOK, H. F.; VALDES, G. S. B.; LEE, H. C. Mulch effects on rainfall interception, soil physical characteristics and temperature under *Zea mays* L. **Soil & Tillage Research.** 91 227–235, 2006. DOI:10.1016/j.still.2005.12.007.

COOPER, P.J.M.; KEATINGE, J.D.H.; HUGHES, G., Crop evapotranspiration – a technique for calculation of its components by field measurements. **Field Crops Res.** 7, 299–312. 1983.

DALMAGO, G. A. **Dinâmica da água no solo em cultivos de milho sob plantio direto e preparo convencional.** 2004. Tese. (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 245p. Porto Alegre, RS. 2004.

DALMAGO, G. A.; BERGAMASCHI, H.; KRÜGER, C. A. M. B.; BERGONCI, J. I.; COMIRAN, F.; HECKLER, B. M. M. Evaporação da água na superfície do solo em sistemas de plantio direto e preparo convencional. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.45, n.8, p.780-790, ago. 2010.

DERPSCH, R.; SIDIRAS, N.; HEINZMANN, F.X. Manejo do solo com coberturas verdes de inverno. **Pesq. Agropec. Bras.** 20:671-773, 1985.

DÍAZ-ZORITA, M.; DUARTE, G. A.; GROVE, J. H. A review of no-till systems and soil management for sustainable crop production in the subhumid and semiarid Pampas of Argentina. **Soil and Tillage Research**, 65(1), 1–18. 2002.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. Crop water requirements. **Irrigation and Drainage Paper.** No. 24 (rev.). FAO, Rome, Italy, 144 pp. 1977.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos.** 2.ed. 306p. Rio de Janeiro, RJ. 2006.

EVETT, S. R.; TOLK, J. A.; HOWELL, T. A. Soil profile water content determination: sensor accuracy, axial response, calibration, temperature dependence, and precision. **Vadose Zone Journal**, v.5, p.894-907, 2006. ISSN 1539-1663

EVETT, S. R.; WARRICK, A. W.; MATHIAS, A. D. Wall material and capping effects on microlysimeter temperatures and evaporation. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 59, 329–336. 1995.

FABRIZZI, K. P.; GARCÍA, F. O.; COSTA, J. L.; PICONE, L. I. Soil water dynamics, physical properties and corn and wheat responses to minimum and no-tillage systems in the southern Pampas of Argentina. **Soil and Tillage Research**, 81(1), 57–69. 2005.

FLERCHINGER, G. N.; SAUERB, T. J.; AIKENC, R. A. Effects of crop residue cover and architecture on heat and water transfer at the soil surface. **Geoderma**. v. 116, p. 217–233, 2003.

FLUMIGNAN, D. L.; FARIA, R. T.; PRETE, C. E. C. Evapotranspiration components and dual crop coefficients of coffee trees during crop production. **Agricultural Water Management**. 98. 791–800. 2011. DOI: 10.1016/j.agwat.2010.12.002

FLUMIGNAN, D. L.; FARIA, R.T.; LENA, B. P. Test of a microlysimeter for measurement of soil evaporation. **Eng. Agríc.** vol.32, n.1, pp. 80-90, 2012. ISSN 0100-6916. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162012000100009>

FUCHS, M.; HADAS, A. Mulch resistance to water vapor transport. **Agricultural Water Management**. v. 98, 990–998. 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2011.01.008>

GERRITS, A. M. J.; SAVENIJE H. H. G. Interception. In: **The Science of Hydrology** UHLENBROOK, S. Department of Water Engineering, DA Delft, The Netherlands. 89–99, 2011. Disponível em: <http://202.121.48.120/Download/418f02d2-6b49-4121-980f-f17764888764.pdf>. Consultado em: 20/02/2014

GORDIYENKO, V. P.; KOSTOGRYZ, P. V. Patterns of moisture evaporation at variable bulk densities of the upper soil layer. **Soviet Soil Science**, New York, v. 22, n. 8, p. 111-122, 1990.

HILLEL, D. **Applications of soil physics**. Academic Press. New York.1981.

HILLEL, D. **Soil and water. Physical Principles and Processes**, academic Press, New York, 288 pp.1971.

HOU, X. Y.; WANG, F. X.; HAN, J. J.; KANG, S. Z.; FENA, S. H. Duration of plastic mulch for potato growth under drip irrigation in an arid region of northwest China. **Agric. For. Meteorol.** 150, 115–121. 2010.

HOWELL, T. A.; McCORMICK, R. L.; PHENE, C.J. Design and installation of large weighing lysimeters. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.28, n.117,p.106-112, January-February. 1985.

- JACKSON, R. D. Diurnal changes in soil water content during drying. In: R.R. Bruce et al., editors, Field water regime. SSSA Spec. Publ. 5. SSSA, Madison, WI. p. 37–55. 1973.
- JALOTA, S. K., PRIHAR, S. S., Effect of straw mulch on evaporation reduction in relation to rates of mulching and evaporativity. **J. Indian Soc. Soil Sci.** 38, 728–730. 1990.
- JENSE, M. E.; ALLEN, R. G. Evaporation, evapotranspiration, and irrigation water requirements. **ASCE Manuals and Reports Engineering Practice**, American Society of Civil Engineers, nº70, 2nd edition. 769 pp. 2016
- JENSEN, M. E.; BURMAN, R. D.; ALLEN, R. G. Evapotranspiration and irrigation water requirements. 1990. **ASCE Manual and Reports** No. 70, ASCE, New York.
- KELLER, J.; BLIESNER, R. D. Sprinkle and trickle irrigation. Van Nostrand Reinold, New York, 1990. 652p.
- KLAASSEN, W.; BOSVELD, F.; WATER, E. Water storage and evaporation as constituents of rainfall interception. **Journal of Hydrology.** 212–213: 36-50. 1998.
- KLOCKE, N. L. Crop Residue and Soil Water Evaporation. **Water Resources Engineering.** Kansas State University. Garden City, Kansas. 2004a. Disponível em: <https://www.ksre.k-state.edu/irrigate/reports/Klocke.pdf>. Consultado em: 20/05/2014.
- KLOCKE, N. L. Water savings from crop residue in irrigated corn. 2004b. In Proceedings. **Central Plains Irrigation Conference.** Kearney, NE. Feb. 17-18, 133-141. 2004.
- KLOCKE, N. L.; CURRIE, R. S.; AIKEN, R. M. Soil water evaporation and crop residues. **American Society of Agricultural and Biological Engineers.** Trans. ASABE 52(1): 103-110, St. Joseph, Michigan www.asabe.org. 2009.
- KLOCKE, N.; MARTIN, D.; TODD, R.; DEHAAN, D.; POLYMEÑOPOULOS, A. Evaporation measurements and predictions from soils under crop canopies. **Trans. ASAE** 3(2), 1590–1596. 1990.
- KNIES, A. E. **Temperatura e umidade de um solo franco arenoso cultivado com milho.** 2010. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2010.
- KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorol. Z.**, 15, 259-263, 2006.
- KOZAK, J. A.; AHUJA, L. R.; GREEN, T. R.; MA, L. Modelling crop canopy and residue rainfall interception effects on soil hydrological components for semi-arid agriculture. **Hydrol. Process.** 21, 229–241. 2007.
- LEMON, E. R. The potentialities for decreasing soil moisture evaporation loss. **Soil Science Society of America Journal**, v.20, p.120-125, 1956.

LLORENS, P.; GALLART, F. A simplified method for forest water storage capacity measurement. **Journal of Hydrology**. 240: 131-144. 2000.

LUNDBERG, A.; ERIKSSON, M.; HALLDIN, S.; KELLNER E; SEIBERT, J. New approach to the measurement of interception evaporation. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**. 14: 1023-1035. 1997.

MACHADO, P. L. O. A.; SILVA, C. A. Soil management under no-tillage systems in the tropics with special reference to Brazil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, 61, 119-130. 2001.

MARTINS, J. D. **Modificações morfofisiológicas em plantas de milho submetidas a déficit hídrico**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2010.

MARTINS, J. D.; RODRIGUES, G. C.; PAREDES, P.; CARLESSO, R.; OLIVEIRA, Z. B.; KNIES, A.; PETRY, M. T.; PEREIRA, L. S. Dual crop coefficients for full and deficit irrigated maize in southern Brazil: model calibration and validation for sprinkler and drip irrigation and mulched soil. **Biosyst. Eng.** 115 (3), 291–310. 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.03.016>

MCILROY, I. C. Terminology and concepts in natural evaporation. In **“Evapotranspiration from Plant Communities”**. ed. M. L. Sharma, pp.77-98; Elsevier, Amsterdam. 1984.

MCMILLEN, M. **The effect of mulch type and thickness on the soil surface evaporation rate**. Horticulture and Crop Science Department. California Polytechnic State University. San Luis Obispo. 2013.

MENZIANI, M.; PUGNAGHI, S.; PILAN, L.; SANTAGELO, R.; VINCENZI, S.; Field experiments to study evaporation from a saturated bare soil. **Physics and Chemistry of the Earth, Part B – Hydrology, Oceans and Atmosphere**. 1999. 24 (7), 813–818

MITTELBAACH, H; LEHNER, I.; SENEVIRATNE, S.I. Comparison of four soil moisture sensor types under field conditions in Switzerland. **J. Hydrol** .430–431:39–49. 2012.

MITTELBAACH, H. et al. Comparison of four soil moisture sensor types under field conditions in Switzerland. **J. Hydrol**. 2012: 430-431, 39-40.

ODHIAMBO, L. O.; IRMAK, S. Evaluation of the impact of surface cover on single and dual crop coefficient for estimating soybean actual evapotranspiration. **Agric. Water Manage.** 104, 221-234, 2012.

OLIVEIRA, N. T.; CASTRO, N. M. R.; GOLDENFUM, J. A. Influência da Palha no Balanço Hídrico em Lisímetros. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. 93-103. v. 15, n. 2 Abr/Jun. 2010.

OLIVEIRA, Z. O. **Perdas de água e variações na temperatura de um argissolo vermelho em função de diferentes quantidades de resíduos vegetais na superfície e espaçamentos entre linhas do feijoeiro**. 2011. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS, 2011.

PENMAN, H. L. Evaporation: Introduction survey. **Netherlands Journal of Agricultural Science**, Wageningen, v.4, n.1, p.9-29, 1956.

PEREIRA, L. S. Higher performance through combined improvements in irrigation methods and scheduling: a discussion. **Agricultural Water Management**, 40, p. 153- 169, 1999.

PEREIRA, L. S. **Necessidades de água em regadio**. In “ Taller e Mini-Curso sobre Técnicas de Riego y Fertirriego”. Herramientas Computacionales para Diseño y Manejo, CYTED y Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador, 24-27 de Julho de 2007. Disponível em: http://ceer.isa.utl.pt/cyted/2007/ecuador2007/2_Pereira.pdf Consultado em: 11/08/2015.

PRICE, D. T.; BLACK, T. A. Estimation of forest transpiration and CO₂ uptake using the Penman-Monteith equation and a physiological photosynthesis model. In: BLACK, T.A.; SPITTLEHOUSE, D.A.; NOVAK, M.D.; PRICE, D.T. (Eds.), **Estimation of Areal Evapotranspiration**, IAHS Publisher n. 177, pp. 213–227. 1989.

PRICE, J. J., ROCHEFORT, L., QUINTY, F., Energy and moisture considerations on cutover peatlands: surface micro topography, mulch cover and Sphagnum regeneration. 1998. *Ecol. Eng.* 10, 293–312.

RICHTER, G. L.; ZANON JÚNIOR, A.; STRECK, N. A.; GUEDES, J. V. C.; KRÄULICH, B.; ROCHA, T. S. M.; WINCK, J. E. M.; CERA, J. C. Estimativa da área de folhas de cultivares antigas e modernas de soja por método não destrutivo. *Bragantia*. 2014, vol.73, n.4, pp.416-425. ISSN 1678-4499. <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4499.0179>.

RITCHIE, J. T. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. **Water Resour. Res.**, 8, 1204–1213. 1972.

RITCHIE, J. T.; GODWIN, D. C.; SINGH, U. **Soil and weather inputs for the IBSNAT crop models**. Proc., IBSNAT Symp.: Decision Support System for Agrotechnology Transfer: Part I., IBSNAT, Dept. Agronomy and Soil Science, College of Tropical Agriculture and Human Resources, Univ. of Hawaii, Honolulu, 31–45. 1989.

RITCHIE, J. T; BURNETT, E. Dryland evaporative flux en subhumid climate, II Plants influences, **Agron. J.**, 63:56-62. 1971

SALTON, J.C.; MIELNICZUK, J. Relações entre sistemas de preparo, temperatura e umidade de um Podzólico Vermelho-Escuro de Eldorado do Sul, RS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 19:313-319, 1995.

- SALVUCCI, G.D. Soil and moisture independent estimation of stage two evaporation from potential evaporation and albedo or surface temperature. **Water Resour. Res.** 33:111–122. 1997. DOI: 10.1029/96WR02858
- SANTOS, A. O.; BERGAMASCHI, H.; ROSA, L. M. G.; BERGONCI, J. I. Calibrated heat-pulse method for the assessment of maize water uptake. **Scientia Agricola**. 2000, vol.57, n.1, pp. 27-31. ISSN 0103-9016. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162000000100006>.
- SARKAR, S.; PRAMANIK, M.; GOSWAMI, S.B. Soil temperature, water use and yield of yellow sarson (*Brassica napus*, var glauca) in relation to tillage intensity and mulch management under rainfed lowland ecosystem in eastern India. **Soil Tillage Res.** 93, 94–101. 2007.
- SAUER, T. J.; HATFIELD, J. L.; PRUEGER, J. H. Corn residue age and placements effects evaporation and soil thermal regime. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.60, p.1558- 1564, 1996.
- SAVABI, M. R.; STOTT, D. E. Plant residue impact on rainfall interception. **Trans. ASAE** 37, 1093–1098. 1994.
- SCOPPEL, E.; SILVA, F.A.M. DA.; CORBEELS, M.; AFFHOLDER, F.; MARAUX, F. Modelling crop residue mulching effects on water use and production of maize under semi-arid and humid tropical conditions. **Agronomie**, 24, 383-395, 2004.
- SHAW, D. A.; PITTINGER, D. R.; MCMASTER, M. Water Retention and Evaporative Properties of Landscape Mulches. 2005. Proc. 26th Annl. Irrigation Show, Phoenix, AZ, Nov. 6-8, **Irrigation Assoc.**, Falls Church, VA. 2005.
- SINGH, B.; CHANASYK, D. S.; MCGILL, W. B. Soil hydraulic properties of an Orthic Black Chernozem under long-term tillage and residue management. **Can. J. Soil Sci.**, 76. 1996, pp. 63–71
- SNYDER, R. L.; BALI, K.; VENTURA, F.; GOMEZ-MACPHERSON, H. Estimating evaporation from bare or nearly bare soil. **Jornal of Irrigation. Drain. Eng.** 126:399–403. 2000. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9437(2000)126:6(399)
- STEINER, J.L. Tillage and surface residue effects on evaporation from soils. **SoilSci. Soc. Am. J.** 53, 911–916. 1989.
- STRECK, E. V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. Porto Alegre: EMATER/RS - ASCAR, p 38. 2008.
- STRECK, N. A.; ROSA, H. T.; WALTER, L. C.; BOSCO, L. C.; LAGO, I.; HELDWEIN, A. B. O fenômeno El Niño oscilação sul e a variabilidade interanual da evaporação do tanque classe A e da umidade relativa do ar em Santa Maria, RS. **Ci. Rural**, 38:1452-1455. Santa Maria, RS., 2008.
- SULEIMAN, A. A.; RITCHIE, J. T. Modeling soil water redistribution during second-stage evaporation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 67, n. 2, p. 377-386, 2003.

TODD, R. W.; KLOCKE, N. L.; HERGERT, G. W.; PARKHURST, A. M. Evaporation from soil influenced by crop shading, crop residue and wetting regime. **Trans. of the ASAE**. 34:2:461-466. 1991.

TOLK, J. A.; HOWELL, T. A.; EVETT, S. R. Effect of mulch, irrigation and soil type on water use and yield of maize. **Soil Tillage Res.** 50, 137–147. 1999.

TURMEL, M. S.; SPERATTI, A.; BAUDRON, F.; VERHULST, N. GOVAERTS, B. Crop residue management and soil health: A systems analysis. **Agricultural Systems** 134, 6–16, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agry.2014.05.009>

UNESCO 2012. Os recursos hídricos do planeta estão sob pressão do crescimento rápido das demandas por água e das mudanças climáticas, diz novo Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos.

Disponível em:

http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/Brasilia/pdf/WWDR4%20Background%20Briefing%20Note_pt_2012.pdf. Consultado em: 03/04/2013

UNGER P. W.; PARKER, J. J. Evaporation reduction from soil with wheat, sorghum, and cotton residues. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v.40, p.938-48, 1976.

VALENTE, F.; DAVID A. J. S.; GASH, J. H. C. Modelling interception loss for two sparse eucalypt and pine forests in central Portugal using reformulated Rutter and Gash analytical models. **Journal of Hydrology**. 190. 141-162.1997.

VAN DONK, S. J.; MARTIN, D. L.; IRMAK, S.; MELVIN, S. R.; PETERSEN, J. L.; DAVISON, R. Crop residue cover effects on evaporation, soil water content, and yield of deficit-irrigated corn in west-central Nebraska. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**. Transaction of the ASABE. Vol. 53(6): 1787-1797. 2010. ISSN 2151-0032

VILLA NOVA, N. A. **Principais métodos de estimativa de aplicação de água de irrigação**. Piracicaba: Departamento de Física e Meteorologia, ESALQ/USP, 1987. 22 p

VILLA NOVA, N. A.; REICHARDT, K. Evaporação/ evapotranspiração de um ecossistema e suas relações com o meio ambiente. **Engenharia hidrológica**, ABRH, v.2, p.145-197, 1989.

WARD, P. R.; DUNIN, F. X. Growing season evapotranspiration from duplex soils in south-western Australia. **Agric. Water Management**. 50:141–159. 2001.

WEI, Z.; PAREDES, P.; LIU, Y.; CHIA, W. W.; PEREIRA, L. S. Modelling transpiration, soil evaporation and yield prediction of soybean in North China Plain. **Agricultural Water Management**. 147. 43–53. 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2014.05.004>

WMO (World Meteorological Organization). **Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation** - No. 8. Part I. Measurement of meteorological

VARIABLES CHAPTER 10. MEASUREMENT OF EVAPORATION. Geneva, Switzerland. 2008. ISBN 978-92-63-10008-5. Disponível em: https://www.wmo.int/pages/prog/qcos/documents/gruanmanuals/CIMO/CIMO_Guide-7th_Edition-2008.pdf. Consultado em: 10/10/2015.

WRIGHT, J. L. New evapotranspiration crop coefficients. **J Irrig Drain. E-ASCE** 108: 57-74. 1982.

WYTHERS, K. R.; LAUENROTH, W. K.; PARUELO, J. M. Bare-soil evaporation under semiarid field conditions. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 63:1341–1349. 1999.

XIE, Z.; WANG, Y.; JIANG, Y.; WEI, X. Evaporation and evapotranspiration in a watermelon field mulched with gravel of different sizes in northwest China. **Agric. Water Manage.** 81, 173–184. 2006.

YAMANAKA, T.; INOUE, M.; KAIHOTSU, I. Effects of gravel mulch on water vapor transfer above and below the soil surface. **Agricultural Water Management.** 67. 145–155. 2004. DOI: 10.1016/j.agwat.2004.01.002

YUNUSA, I. A. M.; BELFORD, R. K.; TENNANT, D.; SEDGLEY, R. H. Row spacing fails to modify soil evaporation and grain-yield in spring wheat in a dry Mediterranean environment. **J. Agric. Res. Aust.** 44, 661–676. 1993.

ZHAO, N.; LIU, Y.; CAI, J.; PAREDE, P.; ROSA, R. D; PEREIRA, L. S. Dual crop coefficient modelling applied to the winter wheat–summer maize crop sequence in North China Plain: Basal crop coefficients and soil evaporation component. **Agricultural Water Management.** 117. 93 – 105. 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2012.11.008>

ZRIBI W.; ARAGÜÉS R.; MEDINA, E.; FACI, J.M. Efficiency of inorganic and organic mulching materials for soil evaporation control. **Soil & Tillage Research.** 148. 40–45. 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2014.12.003>

ZWIRTES, A. L. **Características morfofisiológicas e produtividade de plantas de sorgo submetidas à irrigação deficitária.** 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS, 2013.

ANEXO A

Tabela A - Água prontamente evaporável (REW_{max}) e total de água evaporável (TEW_{max}) para as diferentes classes de solos, considerando $Z_e = 0,10$ m.

Textura do solo	Valores médios de umidade		Distribuição do tamanho de partículas			Parâmetros de evaporação	
	θ_{CC} ($m^3 m^{-3}$)	θ_{PMP} ($m^3 m^{-3}$)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	$REW_{eq\ 8}$ (mm)	$TEW_{max\ eq\ 7}$ (mm)
Areia	0,12	0,04	92	4	4	6,2	10
Areia franca	0,14	0,06	84	6	10	7,4	11
Franco arenoso	0,23	0,10	65	25	10	10,4	18
Franco	0,26	0,12	40	40	20	9,8	20
Franco siltoso	0,30	0,15	20	65	15	10,1	22,5
Siltoso	0,32	0,15	7	88	5	10,7	24,5
Franco argilo siltoso	0,34	0,19	10	55	35	8,9	24,5
Argilo siltoso	0,36	0,21	8	47	45	8,3	25,5
Argila	0,36	0,21	22	20	58	3,4	25,5

Fonte: Adaptado de Allen et al. (2005a).

ANEXO B

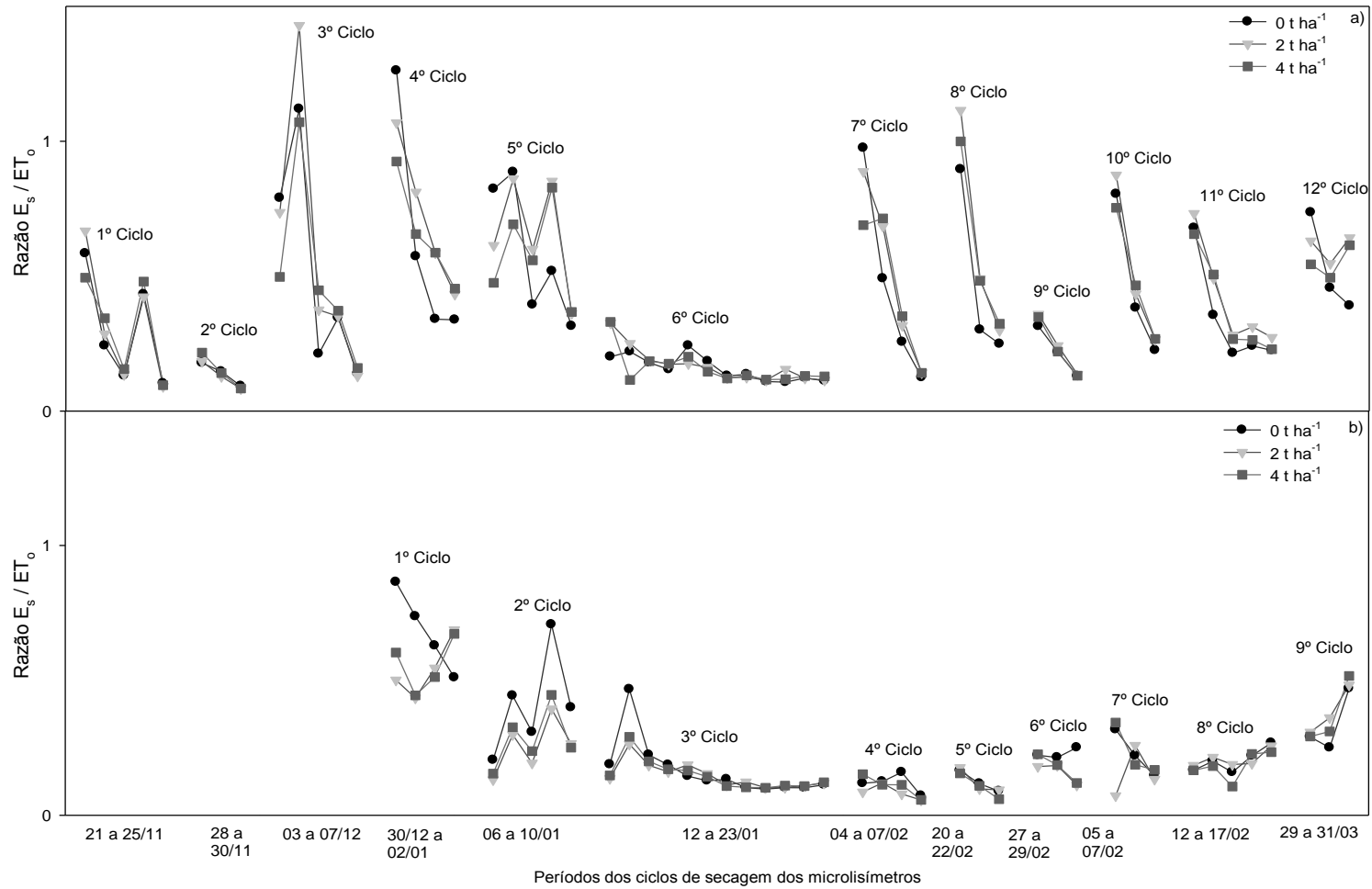
Tabela B – Médias mensais climáticas ocorridas no município de Santa Maria - RS relativas ao período de 1969 - 2005.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
T _{max} , °C	30,7	29,9	28,6	25,0	21,9	19,4	19,4	20,8	22,0	24,9	27,4	29,8	25,0
T _{min} , °C	19,7	19,6	18,2	14,9	11,8	9,9	9,8	10,6	11,8	14,3	16,1	18,4	14,6
UR, %	72,1	77,0	79,0	81,7	82,9	83,3	81,2	78,8	77,6	74,7	70,2	68,4	77,2
WS, m s ⁻¹	1,7	1,7	1,5	1,5	1,5	2,3	2,3	2,3	2,1	2,1	2,1	1,7	1,9
ET _o , mm d ⁻¹	4,0	3,5	2,8	1,7	1,1	0,8	0,9	1,3	1,98	2,7	3,5	4,1	2,4
Chuva, mm	148	135	137	143	150	155	143	127	160	159	120	134	142,6

Adaptado de Martins et al. (2013)

ANEXO C

Figura C - Razão entre Evaporação e Evapotranspiração de Referência (E_s/ET_0) nos respectivos períodos dos ciclos de secagem do solo em pousio (a) e sob o cultivo de soja (b) nos diferentes níveis de cobertura do solo (0; 2 e 4 t ha⁻¹)



ANEXO D

Figura D - Relação entre evaporação da água do solo (E_s) em pousio e evapotranspiração de referência (ET_o) acumuladas em cada ciclo de secagem do solo. A E_s foi determinada com microlisímetros no tratamento solo descoberto (0 t ha^{-1} de MS).

