

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

Anderson Luiz Zwirtes

**MEDIÇÃO E SIMULAÇÃO DA TEMPERATURA E CONTEÚDO DE
ÁGUA EM ARGISSOLO SOB RESÍDUOS DE AVEIA**

Santa Maria, RS
2017

PPGCS/UFESM, RS

ZWIRTTES, Anderson Luiz

Doutor

2017

Anderson Luiz Zwirtes

**MEDIÇÃO E SIMULAÇÃO DA TEMPERATURA E CONTEÚDO DE ÁGUA EM
ARGISSOLO SOB RESÍDUOS DE AVEIA**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração em Processos Físicos e Morfogenéticos do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Doutor em Ciência do Solo**.

Orientador: Prof. Ph.D. Dalvan José Reinert

Santa Maria, RS
2017

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Zwirtes, Anderson Luiz
MEDIÇÃO E SIMULAÇÃO DA TEMPERATURA E CONTEÚDO DE ÁGUA
EM ARGISSOLO SOB RESÍDUOS DE AVEIA / Anderson Luiz
Zwirtes.- 2017.
121 p.; 30 cm

Orientador: Dalvan Jose Reinert
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-
Graduação em Ciência do Solo, RS, 2017

1. Palha de aveia 2. Solo coberto 3. Solo descoberto
4. Hydrus-1D 5. Fluxo de água e calor I. Reinert, Dalvan
Jose II. Título.

© 2017

Todos os direitos autorais reservados a Anderson Luiz Zwirtes. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

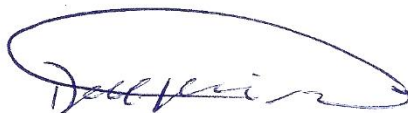
E-mail: andersonzwirtes@yahoo.com.br

Anderson Luiz Zwirtes

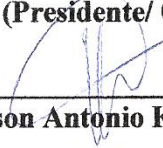
**MEDIÇÃO E SIMULAÇÃO DA TEMPERATURA E CONTEÚDO DE ÁGUA EM
ARGISSOLO SOB RESÍDUOS DE AVEIA**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração em Processos Físicos e Morfogenéticos do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Doutor em Ciência do Solo**

Aprovado em 27 de janeiro de 2017:



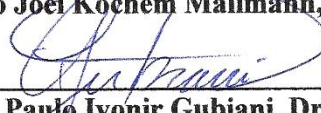
Dalvan José Reinert, Ph.D. (UFSM)
(Presidente/ Orientador)




Vilson Antonio Klein, Dr. (UPF)



Fábio Joel Kochem Mallmann, Dr. (URI-FW)



Paulo Ivonir Gubiani, Dr. (UFSM)



Vanderlei Rodrigues da Silva, Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS
2017

Aos pais, irmãos e familiares, que souberam compreender todos os momentos que se passaram para que eu pudesse chegar até aqui.

Ofereço e dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pai e criador, por ter me presenteado com o dom da vida, uma família maravilhosa e iluminar meus passos.

Ao professor orientador Dalvan José Reinert, pelos ensinamentos, dedicação, paciência, orientação e amizade, além do incentivo ao desenvolvimento do estudo.

Ao professor Paulo Ivonir Gubiani, pelos imensuráveis auxílios, conselhos e ajuda prestada na elaboração do trabalho e do estudo.

Aos meus pais, Guido e Selma, pelo amor, carinho, incentivo e principalmente pelo exemplo de vida, simplicidade e respeito à vida.

Aos irmãos, Jadir, Rosane, Solange e Rosicler, pelo apoio e motivação.

Aos sobrinhos, que chegaram para alegrar nossas vidas e nos dar força para a caminhada.

A minha namorada Cláudia, pela paciência, carinho e auxílio durante a condução deste trabalho.

A Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), juntamente ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo (PPGCS) pelo ensino de qualidade.

A CAPES, pela concessão da bolsa de estudo.

Aos membros das bancas de qualificação e da banca examinadora, pelas sugestões e considerações apresentadas para a melhoria do trabalho.

Aos colegas que destinaram seu tempo com auxílio na condução e finalização deste trabalho.

Enfim, a todos que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos

RESUMO

MEDIÇÃO E SIMULAÇÃO DA TEMPERATURA E CONTEÚDO DE ÁGUA EM ARGISSOLO SOB RESÍDUOS DE AVEIA

AUTOR: Anderson Luiz Zwirtes
ORIENTADOR: Dalvan José Reinert

Esta pesquisa foi conduzida com o objetivo de estudar a dinâmica da temperatura e do conteúdo de água do solo em função de diferentes quantidades de resíduos de aveia preta disposta em cobertura por meio das relações existente com variáveis meteorológicas, bem como a representação destes comportamentos por meio de simulação utilizando o Hydrus-1D. O experimento foi conduzido em um Argissolo Vermelho Distrófico arênico em Santa Maria - RS. Os tratamentos consistiram da utilização de três diferentes níveis de cobertura do solo (3, 6 e 9 Mg ha⁻¹) com palha de aveia (*Avena sativa*) e um tratamento com solo descoberto (0 Mg ha⁻¹). A temperatura do solo e o conteúdo volumétrico de água, em diferentes profundidades, além das condições meteorológicas, foram mensurados durante o período de 01/12/2014 a 06/12/2015. O efeito da cobertura do solo com resíduos vegetais na temperatura do solo foi analisado nas diferentes profundidades correlacionando a temperatura do solo com palha e a temperatura do solo descoberto. O método dos mínimos quadrados foi usado para gerar equações de estimativa da temperatura da superfície do solo em função da temperatura do ar e da radiação solar e o seu desempenho foi comparado com a equação senoidal. Os parâmetros hidráulicos e térmicos, necessários para a simulação da temperatura e do conteúdo de água do solo, com o Hydrus-1D, foram otimizados por meio da solução inversa e validados em solos descobertos. Os parâmetros otimizados foram usados para a simulação da temperatura e do conteúdo de água em solos com diferentes quantidades de palha com duas condições de contorno para a temperatura da superfície do solo, uma medida e outra estimada. A palha exerce influência sobre a temperatura do solo até 50 cm de profundidade. A temperatura do solo descoberto em que ocorre a inversão do efeito da palha foi de 19,6 °C na superfície e 15,8 °C a 50 cm de profundidade. A presença de cobertura de palha mantém o solo mais aquecido que o solo sem palha no início do dia, mas impede que ele se aqueça igual ao solo sem palha no restante do dia. Assim resultando em uma percepção de que a palha aquece e resfria o solo em relação à temperatura do solo desnudo. Essa temperatura foi semelhante em todas as quantidades de palha, porém decresceu em profundidade. A estimativa da temperatura da superfície do solo pode ser estimada em função da temperatura do ar e da radiação solar. Em solo descoberto as equações propostas tem melhor desempenho que a equação senoidal. Em solos cobertos a equação senoidal teve melhor desempenho. Os parâmetros hidráulicos e térmicos do solo otimizados melhoraram as simulações da temperatura e conteúdo de água do solo. A simulação da temperatura do solo com diferentes quantidades de cobertura vegetal pode ser simulada usando o Hydrus-1D, sendo que o uso da condição de contorno com a temperatura da superfície medido teve melhor desempenho que o utilizando a temperatura da superfície estimada.

Palavras-chave: Palha de aveia. Solo coberto. Solo descoberto. Hydrus-1D. Fluxo de água e calor. Estimativa da temperatura da superfície.

ABSTRACT

MEASUREMENT AND SIMULATION OF SOIL TEMPERATURE AND WATER CONTENT IN ALFISOLS UNDER OAT RESIDUES

AUTHOR: Anderson Luiz Zwirtes

ADVISOR: Dalvan José Reinert

This research was conducted with the objective of studying the dynamics of soil temperature and water content as a function of the different amounts of black oat residue (*Avena sativa* Schreb.) in the soil cover, through existing relationships with meteorological variables, as well as the simulation of these dynamics using Hydrus-1D. The experiment was carried out in an Argissolo Vermelho Distrófico arênico (Rhodic Paleudalf) in Santa Maria - RS. The treatments consisted of the use of 3, 6 and 9 Mg ha⁻¹ of oat straw in soil cover and an uncovered soil treatment (0 Mg ha⁻¹). Soil temperature and water content at different depths, in addition to meteorological conditions, were measured during the period from December 1, 2014 to December 6, 2015. The effect of straw on soil temperature was analyzed at different depths, correlating covered soil temperature with uncovered soil temperature. The equations used for estimating soil surface temperature were adjusted by the least square method, where the surface temperature is estimated as a function of air temperature and incident solar radiation, and its performance compared to the sinusoidal equation. The hydraulic and thermal parameters required for the simulation of soil temperature and water content were optimized by the reverse solution and validated on uncovered soils. The optimized parameters were used to simulate the temperature and water content in soils with different amounts of straw with two contour conditions for the soil surface temperature, one measure and the other estimated. The straw affected the soil temperature down to 50 cm deep. The uncovered soil temperature at which inversion of the straw effect occurred was 19.6 ° C at the surface and 15.8 ° C at 50 cm depth. The presence of straw keeps the soil warmer than the soil without straw at the beginning of the day, but prevents it from warming similar to the ground without straw for the rest of the day, causing in turn that, bare soil gets warmer during the day and cools more at night compared to the covered soil. This temperature was similar in all amounts of straw, but decreased in depth. The temperature of the soil surface can be estimated as a function of air temperature and solar radiation. In uncovered soil the proposed equation presents better performance compared to the sinusoidal equation. In covered soils the sinusoidal equation had better performance. The optimal hydraulic and thermal parameters of the soil improved the simulations of temperature and soil water content. The soil temperature with different amounts of oat straw can be simulated using Hydrus-1D, and the use of the contour condition with the measured surface temperature performed better than the estimated surface temperature.

Keywords: Oat straw. Covered soil. Uncovered soil. Hydrus-1D. Water and heat flow. Surface temperature estimation.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Detalhe da junção das ligas metálicas dos sensores termopar (A), do preenchimento com resina epóxi (B) e da extremidade do sensor com a cápsulas de resina epóxi (C).....37
- Figura 2 - Sonda WCR CS616 (A), detalhe da disposição das hastes no solo (B) e da instalação das sondas de umidade e temperatura no solo (C).....38
- Figura 3 - Linha do tempo da utilização dos dados para ajuste e validação das equações de estimativa da temperatura da superfície do solo.41
- Figura 4 - Linha do tempo do uso dos dados na otimização dos parâmetros e avaliação das simulações de temperatura e conteúdo de água no solo.....43
- Figura 5 - Linha do tempo da utilização dos dados nas simulações de temperatura e conteúdo de água no solo coberto com diferentes quantidades de palha.52
- Figura 6 - Relação entre a temperatura do solo coberto ($T_{s_{cp}}$) com 3(I), 6(II) e 9(III) $Mg\ ha^{-1}$ de palha e temperatura do solo sem palha ($T_{s_{sp}}$) na superfície do solo (A), a 5 cm (B), a 15 cm (C), a 30 cm (D) e a 50 cm (E) de profundidade.....53
- Figura 7 - Erros entre as temperaturas da superfície do solo estimadas com as equações senoidal (S), geral (A) e específicas (B) e medidas em cada quantidade de resíduos vegetais dispostos em cobertura no solo.58
- Figura 8 - Distribuição horária dos resíduos da estimativa da temperatura da superfície do solo com a equação senoidal (S), geral (A) e as específicas (B) em solos com 0(I), 3(II) 6(III) e 9(IV) $Mg\ ha^{-1}$ de resíduos vegetais em cobertura.60
- Figura 9 - Histograma dos resíduos entre as temperaturas da superfície do solo medida e estimada em todas as quantidades de resíduos vegetais em cobertura por meio das equações senoidal (S), geral (A) e específicas (B).....62
- Figura 10 - Histograma dos resíduos entre as temperaturas da superfície do solo medida e estimada com as equações senoidal (S), geral (A) e específicas (B) solos cobertos com 0(I), 3(II) 6(III) e 9(IV) $Mg\ ha^{-1}$ de palha.63
- Figura 11 - Histograma dos resíduos entre as temperatura do solo (A) e o conteúdo de água (B), observado nas simulações a 5 (I), 15 (II) e 30 (III) cm de profundidade.66
- Figura 12 - Conteúdo volumétrico de água no solo observado e simulado no período de janeiro a junho a 5 (A), 15 (B) e 30 (C) cm de profundidade.....68

Figura 13 - Curva de retenção de água no solo, obtidas pelo ajuste dos parâmetros θ_s , θ_r , α , n medidos (P. med) e otimizados (P. Oti) para as camadas 0-21; 21-37 e 37-50 cm de profundidades.	71
Figura 14 - Condutividade hidráulica do solo em função do potencial matricial do solo, com parâmetros iniciais medido em laboratório (P. med) e os parâmetros otimizados (P. Oti) para as três camadas do perfil do solo.	72
Figura 15 - Condutividade térmica (λ_0) do solo em função do conteúdo de água no solo.	73
Figura 16 - Temperatura do solo simulada e medida nas profundidades de 5 (A), 15 (B) e 30 (C) cm no mês de janeiro (I) e junho (II).	76
Figura 17 - Conteúdo volumétrico de água do solo medido e simulado com parâmetros otimizados, no período de janeiro a junho a 5 (A), a 15 (B) e a 30 (C) cm de profundidade.	77
Figura 18 - Evaporação e chuva acumuladas em relação a evapotranspiração potencial acumulada no período de janeiro a junho de 2015.	78
Figura 19 - Histograma dos resíduos entre a temperatura (A) e o conteúdo de água no solo (B), observadas e simuladas, a 5 (I), 15 (II) e 30 (III) cm de profundidade, utilizando os parâmetros otimizados.	79
Figura 20 - Radiação, temperatura do ar, chuva, temperatura da superfície do solo medidas (C1) e estimadas com a equação geral (C2) para as condições de 0 (A), 3 (B), 6 (C) e 9 (D) Mg ha ⁻¹ de palha nos meses de agosto (I) e novembro (II).	81
Figura 21 - Temperatura do solo medidas e simuladas em C1 e C2 nas profundidade a 5, 15 e 30 cm, para condição de solo descoberto (A) e com 3 (B), 6 (C) e 9 (D) Mg ha ⁻¹ de palha em cobertura mês de agosto.	85
Figura 22 - Temperatura do solo medidas e simuladas em C1 e C2 nas profundidades de 5, 15 e 30 cm, para condição de solo descoberto (A), 3 (B), 6 (C) e 9 (D) Mg ha ⁻¹ de palha em cobertura mês de novembro.	86
Figura 23 - Tautócronas da temperatura do solo simuladas com temperatura da superfície medidas (C1) e temperatura da superfície estimadas (C2) às 0, 4, 8, 12, 16 e 20 horas do dia 8 de agosto.	88
Figura 24 - Tautócronas das temperaturas do solo simuladas com temperaturas da superfície medidas (C1) e temperaturas da superfície estimadas (C2) às 0, 4, 8, 12, 16 e 20 horas do dia 8 de novembro.	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distribuição granulométrica, classe textural, densidade do solo (D_s), condutividade hidráulica do solo saturado (K_s), conteúdo volumétrico de água do solo saturado (θ_s), conteúdo de água residual no solo (θ_r), e constantes α , n e m da equação de Van Genuchten.....	36
Tabela 2 - Parâmetros iniciais das simulações como fração de sólidos, matéria orgânica, dispersividade térmica longitudinal ($Disp$), coeficientes da equação de condutividade térmica e capacidade volumétrica de calor das frações sólida (C_n) de matéria orgânica (C_o) e água (C_w) requeridos para a simulação temperatura do solo.....	49
Tabela 3 - Temperatura do solo descoberto em que ocorre a inversão do efeito da palha sobre a temperatura do solo coberto (T_{inv}).....	54
Tabela 4 - Equações para estimativa da temperatura da superfície do solo em função da temperatura do ar (T_{ar}), radiação solar (Rad), quantidade de resíduos vegetais dispostos em cobertura (Q_{rv}) e variável binária Dummy (D).....	56
Tabela 5 - Resultado da análise de desempenho das equações por meio da raiz quadrada média do erro (RQME) nas diferentes quantidades de resíduos vegetais (Q_{rv})....	57
Tabela 6 - Raiz quadrada média do erro (RQME) para as simulações de conteúdo de água e temperatura do solo, utilizando os parâmetros iniciais obtidos em laboratório, nas profundidades de 5, 15 e 30 cm.....	65
Tabela 7 - Parâmetros hidráulicos e térmicos do solo otimizados por meio da solução inversa.....	69
Tabela 8 - Raiz quadrada média do erro (RQME) para as simulações de temperatura e conteúdo de água no solo nas profundidades de 5, 15 e 30 cm, utilizando parâmetros otimizados.....	74
Tabela 9 - Raiz quadrada média do erro obtida nas simulações do conteúdo de água e temperatura do solo utilizando como condição de contorno a temperatura da superfície medida (C_1) e a temperatura da superfície estimada (C_2).....	83

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

α	Alpha
K_s	Condutividade hidráulica saturada
$\lambda(\theta)$	Condutividade térmica aparente ($W\ cm^{-3}\ ^\circ C^{-1}$)
$\lambda_0(\theta)$	Condutividade térmica do solo ($W\ cm^{-3}\ ^\circ C^{-1}$)
θ_r	Conteúdo de água do solo residual ($cm^3\ cm^{-3}$)
θ_s	Conteúdo de água do solo saturado ($cm^3\ cm^{-3}$)
θ	Conteúdo volumétrico de água do solo ($cm^3\ cm^{-3}$)
CRA	Curva de retenção de água do solo
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuária
Eac	Evaporação acumulada (cm)
ETc	Evapotranspiração da cultura (cm)
ETP	Evapotranspiração potencial ($cm\ h^{-1}$)
ETPac	Evapotranspiração potencial acumulada (cm)
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
μs	Microsegundos
Ψ	Potencial matricial do solo (kPa)
Ψ_{crit}	Potencial matricial em que a Evaporação torna-se uma fração da ETP (kPa)
Qrv	Quantidade de resíduos vegetais em cobertura ($Mg\ ha^{-1}$);
Rad	Radiação ($kJ\ m^{-2}$)
RQME	Raiz quadrada média do erro
Tsup	Temperatura da superfície do solo ($^\circ C$)
Tinv	Temperatura de inversão do efeito da palha sobre a temperatura do solo ($^\circ C$)
Tar	Temperatura do ar ($^\circ C$)
Ts	Temperatura do solo ($^\circ C$)
T _{scp}	Temperatura do solo com palha ($^\circ C$)
T _{ssp}	Temperatura do solo sem palha ($^\circ C$)
Tmax	Temperatura máxima ($^\circ C$)
Tmin	Temperatura mínima ($^\circ C$)
l	Tortuosidade de poros (-)
D	Variável binária Dummy (-)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	TEMPERATURA E CONTEÚDO DE ÁGUA NO SOLO	23
2.1.1	Simulação do movimento e conteúdo de água no solo	24
2.1.2	Simulação da temperatura e do transporte de calor no solo	25
2.2	ESTIMATIVA DA TEMPERATURA DO SOLO EM FUNÇÃO DAS VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS	27
3	OBJETIVOS	31
3.1	OBJETIVO GERAL	31
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	31
4	MATERIAL E MÉTODOS	33
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL E DO EXPERIMENTO	33
4.2	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO	34
4.3	AQUISIÇÃO DOS DADOS METEOROLÓGICOS	36
4.4	MEDIDA DA TEMPERATURA DO SOLO	37
4.5	MEDIDA DO CONTEÚDO VOLUMÉTRICO DE ÁGUA NO SOLO	38
4.6	ESTUDOS	39
4.6.1	Efeito da palha sobre a temperatura do solo de diferentes profundidades do solo	39
4.6.2	Estimativa da temperatura da superfície do solo em função da Temperatura do ar e radiação solar	40
4.6.3	Simulação do conteúdo de água e temperatura do solo utilizando o modelo Hydrus-1D	43
4.6.3.1	<i>Modelo numérico dos fluxos de água e calor no solo utilizado nas simulações</i>	44
4.6.3.2	<i>Perfil de simulação e condições de contorno da simulação do conteúdo de água e temperatura do solo</i>	46
4.6.3.3	<i>Parametrização inicial, otimização e avaliação do desempenho do modelo Hydrus-1D para simulação da temperatura e conteúdo de água em um Argissolo Vermelho</i>	49
4.6.4	Simulação da temperatura do solo sob diferentes quantidades de resíduo vegetal	51
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
5.1	EFEITO DA PALHA SOBRE A TEMPERATURA DO SOLO EM DIFERENTES PROFUNDIDADES	53
5.2	ESTIMATIVA DA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DO SOLO	56
5.3	SIMULAÇÕES DA TEMPERATURA E DO CONTEÚDO DE ÁGUA NO SOLO COM O HYDRUS-1D	65
5.3.1	Avaliação da simulação com os parâmetros iniciais	65
5.3.2	Avaliação da consistência física dos parâmetros otimizados em relação aos iniciais e desempenho da simulação com os parâmetros otimizados	69
5.4	SIMULAÇÃO DA TEMPERATURA DO SOLO COM DIFERENTES QUANTIDADES DE PALHA EM SUPERFÍCIE	81
6	CONCLUSÕES	93
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
	APÊNDICES	105

1 INTRODUÇÃO

O grau de sucesso de uma atividade agrícola depende da qualidade do planejamento técnico realizado, o qual se adapta as práticas de manejo e sistemas de cultivo aos meios de produção disponíveis na propriedade rural. A adoção de sistemas conservacionistas que mantêm o solo coberto com plantas ou palha, como o sistema plantio direto, deve levar em consideração as alterações na dinâmica dos processos de transferência de massa e energia inerentes ao solo. Com relação ao sistema de plantio direto, a área cultivada no mundo em 2009 era de 111 milhões de hectares (ha) (DERPSCH et al., 2010) e no Brasil é de 31,8 milhões de ha (FEBRAPDP, 2012).

A presença de palha em cobertura modifica a dinâmica do transporte do calor e umidade no perfil de solo, alterando práticas de manejo como época e profundidade de semeadura. O planejamento dos cultivos agrícolas se dá, principalmente, pela análise das condições climáticas e meteorológicas locais, como temperatura do ar (T_a), temperatura do solo (T_s), precipitação e conteúdo de água do solo (θ). Neste cenário, a T_s e o θ influenciam diretamente a janela de semeadura das diferentes culturas agrícolas. Cada cultura necessita de intervalos de T_s ótimas para que ocorra uma adequada germinação das sementes e posterior estabelecimento uniforme da população de plantas. T_s acima ou abaixo dessa faixa resulta em desuniformidade da germinação, acarretando perdas de potencial produtivo da lavoura. Enquanto que o θ , além de ser importante para a germinação das sementes, também é responsável pelo suprimento da demanda hídrica da planta, desde sua emergência até a senescência.

A T_s e o θ apresentam variações no espaço e no tempo. Devido à inter-relação entre T_s e θ , o estudo do movimento simultâneo de água e calor torna-se importante para melhor compreender os processos de fluxo de massa no solo. A simulação desses fluxos favorece a compreensão dos processos observados a campo, porém, em solos não saturados, verifica-se uma dificuldade na solução das equações diferenciais, principalmente na equação de Richards, devido à não-linearidade dos parâmetros hidráulicos do solo (MANNICH e GUETTER, 2011a). Por isso, o uso de modelos que são capazes de resolver as equações de fluxo de água no solo está cada vez mais difundido no meio científico.

O modelo Hydrus-1D (SIMUNEK et al., 2013) vem se destacando por ser um modelo de base física e a simulação integrar os efeitos do sistema solo planta atmosfera. Na literatura são encontrados trabalhos com a adoção do Hydrus para simulações isoladas dos fluxos de água (MELO e LOUZADA, 2012; DABACH et al., 2013), simulações envolvendo fluxo de água e solutos no solo (GONÇALVES et al., 2006; RHEINHEIMER, et al. 2013; PINHO e

MIRANDA, 2014) e as simulações envolvendo fluxo de água e calor no solo (SAITO et al., 2006; DAHIYA et al., 2007; LU et al., 2013; DEB, et al., 2011). Além disso, constantes atualizações são realizadas na busca de contemplar e melhorar a simulação de cada fluxo (SIMUNEK et al., 2016), o que tem contribuído para a ampla adoção do modelo.

O uso do modelo Hydrus no Brasil foi avaliado em simulações de determinação do θ (GONZALEZ et al., 2015), na avaliação da utilização em simulação do transporte de solutos como de cobre e zinco (MALLMANN et al., 2012; MALLMANN et al., 2014), potássio (PINHO e MIRANDA, 2014) e urânio (DOURADO, 2014). Entretanto, não foram encontrados até o momento registros da utilização do modelo Hydrus na simulação acoplando o fluxo de água e calor no solo. Aplicações de modelos para estimar a T_s e o θ podem ser uma importante ferramenta, tanto para auxiliar a tomada de decisões pelos técnicos no meio rural, como para facilitar a compreensão científica do processo de transferência de calor no solo.

Na simulação dos movimentos de água e calor, o Hydrus-1D necessita de informações das propriedades térmicas e hidráulicas do solo. Para a simulação dos fluxos de calor é necessário informar a temperatura da superfície do solo (T_{sup}), que pode ser mensurada a campo ou estimada. A mensuração da T_{sup} necessita de instrumentação, que pode representar um custo elevado; já a estimativa da T_{sup} pode ser uma alternativa viável e de baixo custo. Uma estratégia seria a estimativa da T_{sup} por meio de variáveis meteorológicas, considerando a influência provocada pelos resíduos vegetais em cobertura.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 TEMPERATURA E CONTEÚDO DE ÁGUA NO SOLO

O θ e a T_s são consideradas duas propriedades físicas do solo que exercem influência direta no desenvolvimento de plantas (LETEY, 1985). Assim, as análises dos processos que governam a T_s e o θ vêm ganhando notoriedade no meio científico e acadêmico. O uso de simulação matemática permite compreender com maior facilidade como estes processos ocorrem, possibilitando uma análise mais detalhada das inter-relações que governam os processos.

A T_s varia no tempo e no espaço e influencia o desenvolvimento de plantas (GASPARIM et al., 2005; WAZILEWSKI et al., 2011), a distribuição de micro-organismos no solo (SOUTO et al., 2008; RODRIGUES et al., 2011), a velocidade da degradação dos resíduos vegetais (ANDRADE et al., 2006; DAVIDSON e JANSSENS, 2006), o movimento de água e de calor no solo (NAGARE, 2011), entre outros. Similarmente, o θ também tem variação espacial e temporal, sendo necessário à maioria das funções vitais de plantas e animais, estando presente em várias reações e rotas metabólicas (CARLESSO e ZIMMERMANN, 2000).

A T_s e o θ são afetadas por muitos fatores, como a radiação solar incidente (Rad), a precipitação, a quantidade de água que infiltra no solo (TORRES, 2003), as espécies de plantas cultivadas e a cobertura do solo com resíduos vegetais (FURLANI et al., 2008; KNIES, 2010). A T_s é fortemente influenciada pelo θ e, conseqüentemente, a mudança no θ provoca alterações no calor específico e na condutividade térmica do solo.

O calor específico, definido como a quantidade de energia térmica que 1 m³ de água ou solo necessita para aumentar a temperatura em 1 K (PREVEDELLO, 2010) é alterado em função da variação do θ , o que afeta as propriedades térmicas do solo. A condutividade térmica é a capacidade de transferência de calor por condução e ocorre em pontos de contato entre partículas. O aumento do θ proporciona um aumento na condutividade térmica do solo (PREVEDELLO, 2010), que ocorre devido à água envolver as partículas de solo e preencher os espaços porosos, ocasionando um aumento na área de contato entre as partículas, aumentando a condutividade térmica.

Devido à inter-relação entre T_s e θ , o estudo do movimento simultâneo de água e calor torna-se importante para melhor compreender o processo de fluxo de calor e água no interior do solo. Assim, a representação por meio da simulação pode ser uma ferramenta para facilitar a compreensão desses movimentos.

2.1.1 Simulação do movimento e conteúdo de água no solo

O uso de modelos matemático para descrever os fluxos de massa em meio não saturado passou a ser amplamente difundido após o surgimento de computadores com capacidade de resolver numericamente equações diferenciais como, por exemplo, a equação de Richards para o movimento de água. O movimento de água no solo é uma das áreas centrais de estudo da física do solo (NEVES et al., 2000) e se inicia a partir do momento que a água atravessa sua superfície. É um processo contínuo que controla toda a dinâmica dos elementos químicos e a satisfação da demanda hídrica pelas plantas (NETTO et.al., 1996). O movimento de água no solo apresenta forte relação com o conteúdo de água, o potencial matricial e a condutividade hidráulica ($K(\theta)$), que sofrem variações ao longo do tempo (BIASSUSI, 2001).

A equação de Richards, que descreve o movimento de água no solo para as três dimensões (x,y,z), é uma equação diferencial parcial parabólica não-linear, de base física, cujas soluções analíticas são poucas e difíceis de obter, devido à alta não-linearidade dos parâmetros hidráulicos do solo (MANNICH e GUETTER, 2011a). No entanto, mesmo que alguns trabalhos buscam soluções analíticas para a equação de Richards, como os apresentados por Srivastava e Jim Yem (1991), Parlange et al. (1999), Mannich e Guetter (2011b), estas se limitaram a situações específicas de contorno, tendo seu uso muito restrito.

Para descrever o fenômeno natural do movimento de água para solos saturados e não saturados, a equação de Richards pode ser resolvida por meio de simulação numérica, com utilização de modelagem matemática (WENDLAND e PIZARRO, 2010). Dessa forma, a literatura reporta softwares com capacidade de solução da equação de Richards, como por exemplo o Hydrus (SIMUNEK et al., 2013). O software Hydrus-1D vem sendo amplamente utilizado para simular os fluxos de água, calor e solutos no solo.

Para a simulação por meio do Hydrus-1D, é necessária a montagem de um perfil de simulação que deve ser dividido em pequenos intervalos de simulação, sendo cada extremidade desses intervalos delimitada por um nó de simulação (SIMUNEK et al., 2013). Quanto maior o número de nós, menores são os intervalos de simulação facilitando a convergência e a resolução da equação diferencial. Na simulação do movimento de água no solo, o Hydrus-1D resolve a equação de Richards numericamente para solos saturados e não saturados. Para isso, utiliza o método de elementos finitos de um nó de simulação a outro, ou seja, resolve a equação de uma extremidade do intervalo de simulação à outra (SIMUNEK et al., 2013).

O Hydrus-1D necessita de informações referentes às propriedades hidráulicas do solo, como os parâmetros da curva de retenção de água do solo (CRA) e condutividade hidráulica

saturada (K_s), enquanto as propriedades hidráulicas de solo não saturado são estimadas em função da CRA e da K_s (SIMUNEK et al., 2013). Também é necessário informar a entrada de água no sistema, contabilizada por meio da precipitação, e a saída de água, informada por meio da evapotranspiração potencial de água (ETP). Os parâmetros hidráulicos são facilmente obtidos em laboratório, enquanto a ETP pode ser estimada através de equações para dados diários ou horários, utilizando dados meteorológicos.

Muitos trabalhos têm utilizado o Hydrus-1D para simular o movimento de água no solo através de parâmetros hidráulicos obtidos em laboratório (GONÇALVES et al., 2006; RUBIO e POYATOS, 2012; MALLMAN et al., 2012; MALLMAN et al., 2014). Porém, em alguns casos, as simulações dos fluxos de água com o uso dos parâmetros hídricos obtidos em laboratório não representam fielmente o processo verificado no solo, sendo necessária uma otimização dos parâmetros (DAHIYA et al., 2007; JANKOSZ, 2008; SIMUNEK et al., 2012). A solução inversa é uma ferramenta utilizada para ajustar os parâmetros necessários a simulação dos fluxos de água, calor e solutos. No ajuste de parâmetros, a solução inversa utiliza dados medidos, no meio em que se quer otimizar os parâmetros, e por meio de solução numérica resulta em parâmetros que minimizem os erros entre os valores simulados e os observados, porém, os parâmetros otimizados devem ser analisados a fim de adotar valores que se encontram dentro de limites físicos aceitáveis para o sistema modelado.

2.1.2 Simulação da temperatura e do transporte de calor no solo

A T_s varia no tempo e no espaço e, de modo geral, as T_s máximas ocorrem durante o período diurno devido à incidência da radiação solar, e as mínimas durante o período noturno, resultado da emissão de ondas longas para a atmosfera. Quando uma porção de solo é aquecida, o calor gerado tende a se propagar em todas as direções em busca de um novo equilíbrio térmico (NOVAIS, 2011). Assim, durante o período diurno o fluxo de calor ocorre preferencialmente para o interior do solo devido ao aquecimento da superfície, enquanto que durante o período noturno o calor armazenado no interior do perfil do solo se propaga em direção à superfície devido ao seu resfriamento. O fluxo de calor no solo torna-se uma função da T_s em diferentes profundidades (GALVANI et al., 2001; CARNEIRO et al., 2014).

O fluxo de calor no solo pode ser matematicamente descrito pela equação de Fourier, a qual é análoga à equação de Richards para o movimento de água quando substituída na equação da continuidade, e é fundamental para modelagem dos fluxos de calor no solo. Assim como para a equação de Richards do movimento de água no solo, ao buscar soluções analíticas para

a equação diferencial de movimento de calor muitas condições de contorno devem ser aplicadas, o que torna sua solução limitada a poucos casos. Por isso, a modelagem com solução numérica da equação diferencial torna-se uma ferramenta importante para representar o fluxo de calor em perfis de simulação próximos às condições observadas a campo. Além disso, alguns *softwares* são capazes de resolver a equação diferencial para movimento de calor e também para o movimento de água no solo, possibilitando um estudo do movimento combinados de água e calor no solo.

O modelo Hydrus-1D resolve a equação diferencial para fluxo de calor no solo numericamente de forma similar a resolução da equação de Richards (SIMUNEK et al., 2013). A equação do movimento de calor no solo é resolvida tendo como principal componente em sua solução a condutividade térmica do solo, denominada no modelo Hydrus de condutividade térmica aparente $\lambda(\theta)$, que é estimada em função do θ e combina a condutividade térmica do solo ($\lambda_0(\theta)$) e a macrodispersividade. A $\lambda_0(\theta)$ é descrita por meio da equação proposta por Chung e Horton (1987) e implementada no Hydrus-1D (SIMUNEK et al., 2013; SAITO et al., 2006).

A simulação dos movimentos de calor utiliza os valores do θ resultante da simulação (SIMUNEK et al., 2013), o que ressalta a importância da calibração dos parâmetros hidráulicos para representar corretamente o fluxo de água no solo. Saito et al. (2006) destacam que os parâmetros hidráulicos são bem detalhados, enquanto que os parâmetros térmicos têm seu peso centrado nos três coeficientes da equação de Chung e Horton (1987). Devido ao fluxo de calor estar diretamente relacionado à esses três parâmetros, que são particulares para cada tipo de solo, torna-se necessário uma calibração precisa do modelo e sua validação para que o movimento de calor seja representado corretamente.

Na literatura são encontrados poucos trabalhos utilizando o Hydrus-1D para a simulação da T_s e θ simultaneamente. Trabalhos desenvolvidos por Hansson et al. (2004), Saito et al. (2006), Dahiya et al. (2007), Sakai et al. (2009), Zhao et al. (2010), Xiang et al. (2012), Lu et al. (2013) apresentam o modelo Hydrus como uma ferramenta importante para a simulação da T_s . No entanto, dos trabalhos acima, apenas Dahiya et al. (2007) e Lu et al. (2013) utilizaram o Hydrus para simular a T_s em solo com diferentes condições de cobertura.

Para a simulação da T_s , o Hydrus-1D ainda requer como condição de contorno os valores de temperatura superior e inferior do perfil de simulação (SIMUNEK et al., 2013), que podem ser obtidos por meio de sensores instalados a campo. Porém, a instalação e manutenção de sensores para aquisição de dados apresentam um custo elevado (SANTOS et al., 2013b), dificultando o acompanhamento detalhado da T_s durante os ciclos de cultivo. Uma alternativa de menor custo seria a obtenção da T_{sup} por meio de estimativas a partir de variáveis

mensuradas em estações meteorológicas, quando estas estão disponíveis em locais próximos aos que se deseja realizar as simulações.

2.2 ESTIMATIVA DA TEMPERATURA DO SOLO EM FUNÇÃO DAS VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS

O fluxo de calor no solo ocorre em função da diferença de temperatura (ΔT) que ocorre em uma camada (ΔZ), sendo a densidade de fluxo (q) uma função da condutividade térmica do meio (k) e do gradiente térmico ($\Delta T/\Delta Z$) e é representada, em uma dimensão, pela equação de Fourier ($q = k \cdot (\Delta T/\Delta Z)$) (DONG et al., 2015). A T_s e a T_{ar} acompanham as variações do saldo de radiação (R_n). Portanto, os valores de T_s e T_{ar} aumentam durante o período diurno, pois, em geral, o R_n é positivo, devido a incidência de R_{ad} (ondas curtas) superar a emissão de ondas longas, e reduzem durante o período noturno.

A T_s pode ser obtida por meio de mensuração ou estimativa. A mensuração da T_s pode ser realizada por meio de geotermômetros ou sensores de termopares, já a estimativa da T_s pode ser obtida por meio de equações que consideram o balanço de energia (PIKUL, 1991; WU et al., 1996; MIHALAKAKOU et al., 1997; MIHALAKAKOU, 2002). Porém esses estudos necessitam uma análise mais aprimorada do processo, principalmente na determinação dos componentes do balanço de energia. Assim, formas alternativas de estimativa da T_s foram propostas utilizando como parâmetros de entrada variáveis meteorológicas com maior facilidade de obtenção (ROODENBURG, 1985; PIKUL, 1991; ZHENG et al., 1993; NURUDDIN e TOKIMAN, 2005; ZONG-CHANG, 2013). A estimativa da T_s utilizando variáveis meteorológicas pode ser obtida por meio de modelos empíricos, que são baseados em relações estatísticas entre a T_{ar} e a T_s (LOU et al., 1992; LEHNERT, 2014). Estes modelos são de fácil obtenção, porém necessitam de extensos bancos de dados para a obtenção de equações (LUO et al., 1992).

Utilizando variáveis meteorológicas, Zheng et al. (1993) desenvolveram equações empíricas para estimativa da T_s a 10 cm de profundidade para diferentes regiões climáticas dos Estados Unidos, utilizando como parâmetros de entrada a temperatura máxima e mínima do ar e a precipitação. A acurácia desta equação foi testada na Coreia do Sul (KANG et al., 2000) e República Tcheca (LEHNERT, 2013) onde os autores confirmaram a boa acurácia na estimativa da T_s . Nuruddin e Tokiman (2005), trabalhando em solos cobertos por floresta na Malásia, apresentam séries de equações lineares para obter a T_s a partir da T_{ar} , com alto coeficiente de determinação, em diferentes profundidades do perfil. Em um estudo

desenvolvido com dados de Tar e Ts obtidos na cidade de Taquari/RS, Bergamaschi e Guadagnin (1993) obtiveram modelos de estimativa da Ts em função da Tar e concluíram que modelos de regressão linear são adequados para estimar a Ts a partir de leituras da Tar feitas às 9, 15 e 21 horas. Utilizando dados horários da estação meteorológica de Água Funda/SP, Azevedo e Galvani (2003) apresentaram regressões lineares para estimar a Ts em várias profundidades, considerando o atraso da onda de calor no solo. Entretanto, por serem equações empíricas, o uso dessas equações está limitada aos horários e condições de solo em que foram desenvolvidas.

As equações disponíveis na literatura são para condições de solos descobertos (ZHENG et al., 1993; BERGAMASCHI e GUADAGNIN, 1993; AZEVEDO e GALVANI, 2003; NURUDDIN e TOKIMAN, 2005;), condições estas que são pouco frequentes à campo. No Brasil, a campanha pela adoção de sistemas de cultivo conservacionistas do solo durante a década de 90 preconizou o uso do sistema plantio direto, que foi amplamente difundido e aceito pelos agricultores. Neste sistema de manejo do solo e das culturas, o solo permanece coberto por resíduos vegetais durante o ciclo de cultivo das plantas. Hoje no Brasil existem pelo menos 31,8 milhões de ha cultivados sob plantio direto (FEBRAPDP, 2012). No mundo a área cultivada sob plantio direto supera 111 milhões de ha (DERPSCH et al., 2010).

A presença de resíduos vegetais sobre o solo pode modificar o regime hídrico e térmico do solo (DAHIYA et al., 2007). Os efeitos da cobertura do solo com resíduos vegetais na redução da amplitude térmica do solo são conhecidos e amplamente estudados (MIYASAKA et al., 1966; BRAGAGNOLO e MIELNICZUK, 1990; SILVA et al., 2006; DAHIYA et al., 2007; DERPESCH et al., 1985; FURLANI et al., 2008; KNIES, 2010; COELHO et al., 2013). No entanto, esses estudos não correlacionam a Ts com os dados meteorológicos, o que possibilitaria a obtenção de equações para estimativa da Ts em solo coberto com resíduos vegetais. Na análise das Ts e Tar, Beltrami (2001) observou que ambas temperaturas resultaram em variações semelhante durante o período em que o solo não estava congelado e concluíram que é possível a construção de relações entre Tar e Ts nesta condição. Sena et al. (2013) avaliaram a aplicação de uma equação na estimativa da Ts em função da Tar em área cultivada com arroz irrigado. Para que a equação tivesse bom desempenho, os autores ajustaram os coeficientes de duas equações, uma para o período com irrigação e outra para o período sem irrigação, pois a lâmina de água teve grande influência na Ts. De maneira análoga, a presença de palha também deve interferir nas equações que estimam a Ts como função de variáveis meteorológicas, justificando a necessidade de ajuste dos coeficientes para condições de solo coberto com diferentes quantidades de palha.

As equações disponíveis na literatura estimam a T_s em profundidade em função das variáveis meteorológicas, mas não consideram as características térmicas do solo, as quais governam o fluxo de calor no seu interior. De acordo com Streck et al. (1994), ao comparar resultados de temperatura entre solo descoberto e com resíduos vegetais na superfície é importante levar em consideração as diferenças no θ , pois ele modifica as propriedades térmicas do solo e altera o balanço de energia. Fato este que pode ter corroborado na análise de Azevedo e Galvani (2003), onde os autores destacam que as equações servem apenas para os primeiros decímetros de solo e para condição de solo descoberto. Assim, o Hydrus-1D seria uma alternativa para simular a T_s considerando as características térmicas do solo. Porém, este modelo requer a T_{sup} do perfil de simulação como condição de contorno.

No Hydrus, quando a T_{sup} não foi mensurada, esta pode ser estimada utilizando a equação senoidal que está amplamente difundida para estimativa da T_s (HILLEL, 1998; KANG, 2000; PAUL et al., 2004; PREVEDELO, 2010; HU et al., 2016). No entanto, a operacionalização da equação requer a mensuração no mínimo das temperaturas máximas e mínimas da superfície para obtenção da T_{sup} média e da amplitude de oscilação no entorno da T_{sup} média. A necessidade de medida da T_{sup} torna o uso da equação senoidal mais trabalhosa o que pode dificultar sua adoção. A solução poderia ser o uso de equações empíricas para estimativa da T_{sup} ao longo das horas em função das variáveis meteorológicas.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo do trabalho foi estudar a dinâmica da temperatura e do conteúdo de água no solo em função de diferentes quantidades de resíduos de aveia preta disposta em cobertura, por meio das relações com as variáveis meteorológicas, bem como a simulação desta dinâmica utilizando o Hydrus-1D.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- i. Avaliar o efeito de diferentes quantidades de palha na superfície do solo sobre a temperatura horária do solo, mensurada ao longo de um ano em diferentes profundidades.
- ii. Ajustar os coeficientes de equações lineares múltiplas para estimativa da T_{sup} em função da T_a e da Rad para diferentes quantidades de resíduo vegetal na superfície do solo, bem como comparar o desempenho das equações ajustadas com a clássica equação senoidal para estimativa da T_{sup} .
- iii. Otimização e validação dos parâmetros de solo que governam o fluxo de água e calor no solo necessários para a simulação da T_s e θ com o modelo Hydrus-1D.
- iv. Avaliar o desempenho da simulação da T_s com o Hydrus-1D, considerando diferentes quantidades de palha em cobertura e utilizando como T_{sup} os valores medidos e estimados em função das variáveis climáticas e quantidade de palha.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Este item foi separado em duas partes, uma detalhando as informações gerais de condução do experimento, características da área, medições e coleta de dados, e outra parte detalhando as metodologias aplicadas em cada estudo.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL E DO EXPERIMENTO

O estudo foi conduzido na área experimental do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria situada na latitude de 29°43'13" S e longitude de 53°42'23" W e altitude média de 101 m. O clima da região, conforme Moreno (1961), é do tipo "Cfa" de acordo com a classificação climática de Köppen (subtropical úmido, sem estação seca definida e com verões quentes). Nesta classe, a Tar média do mês mais quente do ano é superior a 22 °C e as temperaturas mínimas do mês mais frio oscilam entre -3 e 18 °C. A precipitação média anual da região varia de 1.322 a 1.769 mm. O solo do local foi classificado como Argissolo Vermelho Distrófico arênico (SANTOS et al., 2013a).

Os tratamentos do experimento consistiram da utilização de três níveis (3, 6 e 9 Mg ha⁻¹) de palha de aveia (*Avena sativa*) em cobertura do solo e um tratamento com solo descoberto (0 Mg ha⁻¹). Três repetições de cada tratamento foram utilizadas seguindo o delineamento de blocos ao acaso. A análise estatística aplicada aos dados está detalhada em cada um dos estudos e apresentado a seguir. A palha foi distribuída em unidades experimentais de 6 m² (2x3 m) em 24 de novembro de 2014 e substituída em 2015 por mesma massa de palha nos dias 12 de janeiro, 11 de março, 24 de abril, 13 de junho, 13 de agosto e 22 de outubro a fim de manter a quantidade de palha próxima da estabelecida em cada tratamento. O total da massa de palha utilizado foi obtida de um cultivo realizado próximo à área experimental. Para a obtenção da palha, toda planta de aveia foi colhida, quando a cultura estava em pleno florescimento, seca ao sol e armazenada em local coberto. O herbicida flumizina (pré-emergente) foi aplicado nas datas em que foram feitas as trocas da palha, para evitar a emergência de plantas espontâneas nas unidades experimentais.

A medição e coleta de dados ocorreu durante o período de 01 de dezembro de 2014 a 06 de dezembro de 2015. As medições feitas entre 07 e 22 de outubro de 2015 foram desconsideradas na análise dos dados, pois nesse período ocorreram ventos intensos que movimentaram a palha disposta na superfície do solo.

4.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO

Para caracterização física do perfil de solo utilizado realizou-se a coleta de amostras deformadas e indeformadas de solo em três diferentes camadas do perfil (0-21; 21-37 e 37-50 cm). Estas camadas foram separadas por análise morfológica do perfil, sendo a espessura delimitada onde foi verificada mudança de coloração do solo.

A análise granulométrica foi realizada por meio do método da pipeta, com utilização de 20 g de terra fina seca ao ar e 60 mL de solução dispersante de NaOH 1,0 % (EMBRAPA, 2011), para a determinação dos teores de argila ($\Phi < 0,002$ mm), silte ($0,002 \leq \Phi < 0,05$ mm) e areia ($0,05 \leq \Phi < 2,0$ mm).

Em cada camada de solo foram coletadas cinco amostras com estrutura preservada, por meio de cilindros metálicos com 0,04 m de altura e 0,06 m de diâmetro, para determinação da densidade do solo, da CRA e da K_s .

O preparo das amostras com estrutura preservada consistiu em retirar o excesso de solo excedente ao volume do cilindro metálico e posterior saturação do solo por capilaridade por um período de aproximadamente 24 h. As amostras saturadas foram pesadas e submetidas às tensões de 1, 6 e 10 kPa em coluna de areia (REINERT e REICHERT, 2006), tensões de 33 e 100 kPa em câmaras de Richards (KLUTE, 1986). Após o conteúdo de água do solo estar em equilíbrio em cada uma dessas tensões, as amostras eram pesadas para a determinação do conteúdo volumétrico de água (θ) presente em cada tensão. Depois de pesadas na tensão de 100 kPa, as amostras foram novamente saturadas para a determinação da K_s .

A K_s foi obtida com o uso do permeâmetro de carga constante (EMBRAPA, 2011) e calculada pela equação 1:

$$K_s = \frac{V_1 H}{At(H + h)} \quad (1)$$

Em que: K_s é a condutividade hidráulica do solo saturado (mm h^{-1}); V_1 é o volume de água percolado pela amostra (mm^3); H é a altura da amostra (mm); A é a área da seção transversal da amostra (mm^2); t é o tempo entre o início e o término da coleta do fluxo de água; h é a altura da lâmina de água aplicada sobre a amostra de solo (mm).

Em cada amostra foram feitas três medições da densidade de fluxo a intervalos de 5 min, e para cada uma foi calculada a K_s . A média das três medições foi considerada como valor de

Ks da amostra e está usada para obter um valor médio entre as 5 amostras de solo coletada em cada camada, compondo o valor médio da Ks de cada camada. Após determinação da Ks, as amostras foram submetidas à secagem a 105°C por aproximadamente 48 h, para determinação da densidade do solo (Ds), conforme descrito em EMBRAPA (2011).

Amostras com estrutura não preservada de solo foram usadas para a determinação do θ em tensões acima de 500 kPa. Determinou-se o potencial matricial das amostras deformadas com o uso de um psicrômetro de ponto de orvalho WP4, conforme descrito por Klein et al. (2010). Após a obtenção do potencial matricial as amostras foram pesadas, e submetidas a secagem em estufa a 105°C por 48 h para obtenção da umidade gravimétrica. O θ nas tensões lidas foi obtido por meio da multiplicação da umidade gravimétrica pela razão entre densidade do solo de cada camada e a densidade da água.

Para cada camada de solo, os cinco valores de θ (cinco amostras) obtidos em cada tensão foram usados para calcular um valor médio de θ . Ao conjunto das médias de θ e suas correspondentes tensões, mais o conjunto de θ e tensões obtidas com WP4 da mesma camada de solo, ajustou-se a equação de Van Genuchten (1980):

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha\psi|^n]^m} \quad (2)$$

Em que: θ , θ_s e θ_r são o conteúdo volumétrico de água estimado, de saturação e residual, respectivamente ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); ψ é a tensão de água no solo (cm); α (1/cm), n e m são coeficientes de ajuste da equação, sendo $m=1-1/n$. Pela dificuldade de se definir o valor de θ_r , ele também foi ajustado a exemplo dos coeficientes de ajuste.

Os valores dos parâmetros medidos nas três camadas (Tabela 1) são semelhantes aos encontrados nos trabalhos de Gubiani (2008) e Kaiser (2010), conduzidos na mesma área cultivada sob o sistema de plantio direto e sem intervenção mecânica. Também foi realizado o ajuste dos parâmetros da equação de Van Genuchten (1980) para as cinco amostras coletadas em cada camada para obtenção da variabilidade dos parâmetros em cada camada.

Tabela 1 - Distribuição granulométrica, classe textural, densidade do solo (Ds), condutividade hidráulica do solo saturado (Ks), conteúdo volumétrico de água do solo saturado (θ_s), conteúdo de água residual no solo (θ_r), e constantes α , n e m da equação de Van Genuchten.

Camada (cm)	Areia	Silte	Argila	Classe Textural	Ds
	g kg ⁻¹				g cm ⁻³
0-21	665	212	122	Franco arenosa	1,67
21-37	628	244	128	Franco arenosa	1,58
37-50	637	251	112	Franco arenosa	1,56
Camada (cm)	Ks	θ_s	θ_r^*	α	n
	mm h ⁻¹	cm ³ cm ⁻³	cm ³ cm ⁻³	cm ⁻¹	-
0-21	12,38	0,322	0	0,019	1,263
21-37	7,23	0,321	0	0,033	1,237
37-50	12,55	0,375	0	0,035	1,290

*valor sugerido para uso quando ajuste proporciona valores menores que 0,001 cm³ cm⁻³

Fonte: O Autor.

4.3 AQUISIÇÃO DOS DADOS METEOROLÓGICOS

Os dados meteorológicos horários de Tar (°C), umidade relativa do ar (UR, %), velocidade do vento (Vv, m s⁻¹), Rad (kJm⁻²) e precipitação pluvial (mm) foram obtidos de uma estação meteorológica automática situada a 1500 metros do local do experimento. Esta estação pertence ao Instituto Brasileiro de Meteorologia (INMET) e faz parte de uma rede de estações meteorológicas distribuídas por todo o território nacional. A estação meteorológica é composta por uma unidade de memória central (*datallogger*) conectada aos sensores de mensuração das variáveis meteorológicas. As variáveis meteorológicas são mensuradas a cada minuto e disponibilizadas automaticamente a cada hora na internet. Dados horários referentes aos últimos 90 dias ficam disponíveis para *download* gratuitamente. Os dados foram baixados mensalmente e salvos em uma planilha eletrônica.

Os dados meteorológicos foram utilizados nas equações de estimativa da Ts e nas simulações. A Tar e a Rad foram utilizadas como variáveis de entrada da equação de estimativas da Tsup. A Tar, UR, Vv e Rad foram utilizadas para o cálculo da ETP que foi utilizado juntamente com a precipitação nas simulações dos fluxos de calor e umidade no solo.

Um pluviômetro de balança automatizado foi instalado junto ao experimento para a aferição dos valores de precipitação. Uma estação meteorológica automática foi instalada na área do experimento no período de 30 de abril a 1 de novembro de 2015. Desta estação foram

realizadas análises de consistência das informações de precipitação pluvial e Rad. Dentro deste período as informações inconsistentes ou inexistentes na estação do INMET foram completadas com informações da estação local. Ainda, optou-se por utilizar como base os dados da estação meteorológica do INMET pela disponibilidade dos dados e padronização na instalação dos sensores. Os valores negativos de Rad, registrados sempre no período noturno, foram substituídos por zero.

4.4 MEDIDA DA TEMPERATURA DO SOLO

A T_s foi monitorada com uso de sensores termopar do tipo T (cobre-constantan) (Figura 1A). Na extremidade do sensor foi usada uma cápsula plástica, com comprimento de 3 cm e diâmetro de 0,6 cm, preenchida com resina epóxi. Esta cápsula tinha como objetivo evitar a oxidação das ligas metálicas do sensor, o que poderia prejudicar sua acurácia (Figura 1B e 1C). Os sensores foram conectados a um *datalogger* CR1000 (*Campbell Scientific Inc.*) programado para realizar as medições e armazenagem automática dos dados a cada hora.

Figura 1 - Detalhe da junção das ligas metálicas dos sensores termopar (A), do preenchimento com resina epóxi (B) e da extremidade do sensor com a cápsulas de resina epóxi (C).



Fonte: O Autor

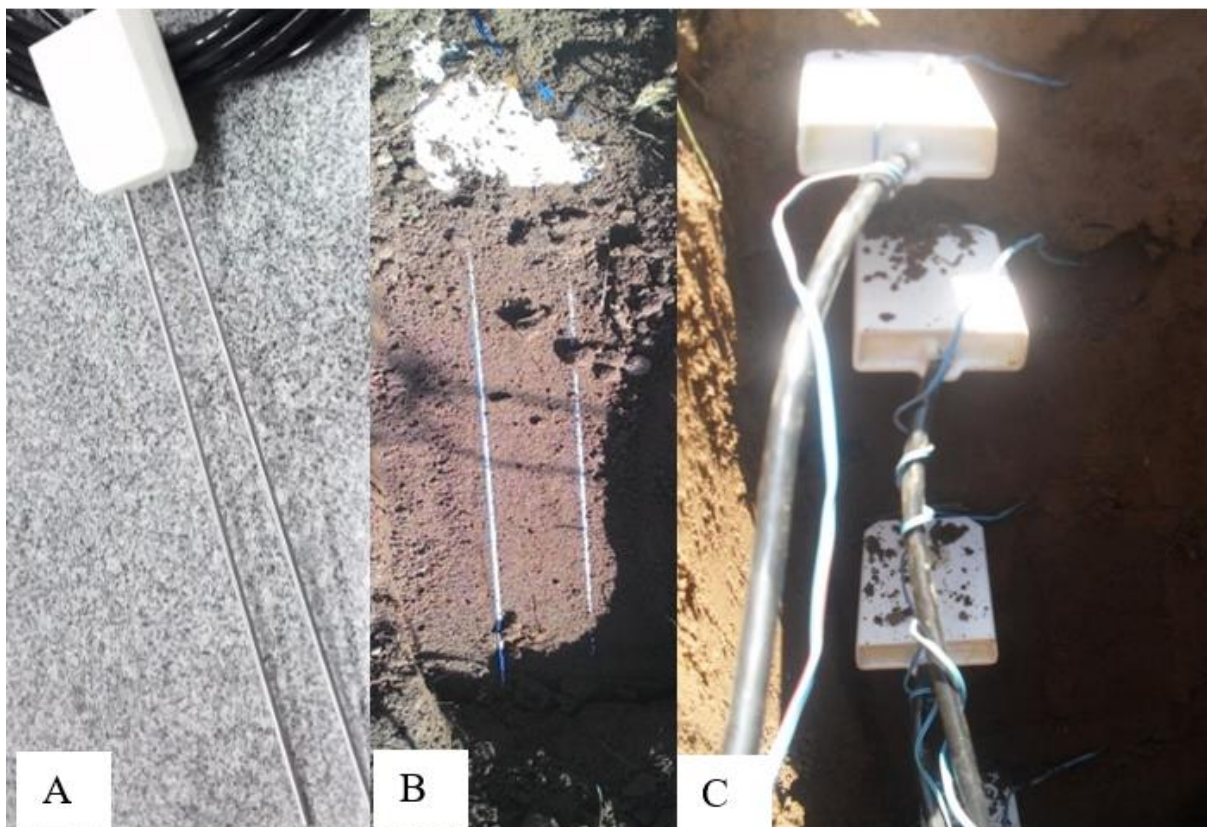
Os sensores foram instalados nas profundidades de 0 (superfície do solo), 5, 15, 30 e 50 cm, na posição central de cada parcela. Os sensores da superfície do solo no tratamento com solo descoberto foram cobertos com uma fina camada de solo ($\cong 1$ mm) para evitar incidência

direta da Rad. Já nos tratamentos com 3, 6 e 9 Mg ha⁻¹ os sensores estavam dispostos sobre a superfície do solo e abaixo da camada de palha

4.5 MEDIDA DO CONTEÚDO VOLUMÉTRICO DE ÁGUA NO SOLO

A medição do θ foi realizada com uso de sondas WCR (*water content reflectometer*) modelo CS 616 (Campbell Scientific, Inc) (Figura 2A). O princípio de funcionamento destas sondas se baseia no período de um pulso eletromagnético ao longo das hastes presente na extremidade da sonda.

Figura 2 - Sonda WCR CS616 (A), detalhe da disposição das hastes no solo (B) e da instalação das sondas de umidade e temperatura no solo (C).



Fonte: O Autor.

O período de propagação do pulso é modificado em função da permissividade dielétrica do meio onde a sonda está inserida. O período de propagação do pulso na água é de aproximadamente 42 microsegundos (μ s), enquanto que no ar a propagação do pulso ocorre

mais rapidamente e este período é reduzido para aproximadamente 12 μ s. Por meio de uma equação genérica, é realizada a conversão do período de propagação do pulso em θ (Equação 3).

$$\theta = - 0,0663 - 0,0063*\text{período} + 0,0007*\text{período}^2 \quad (3)$$

As sondas WCR foram conectadas a um *datalogger* CR1000 (*Campbell Scientific Inc.*) contendo a programação de aquisição e armazenamento dos valores pontuais de θ medido a cada hora. As sondas foram instaladas horizontalmente no solo a 5, 15 e 30 cm de profundidade (Figura 2B e 2C). Adotou-se este sentido de inserção das sondas para os valores de θ serem comparados com os valores simulados na mesma posição. Os detalhes da instalação das sondas e sensores no solo podem ser observados na Figura 2B e 2C, em que é demonstrado a disposição das sondas WCR ao lado dos sensores termopares, instalados no perfil de solo. A acurácia das medições foi avaliada, comparando os valores de θ medido com os sensores com os obtidos por meio de coleta de solo, em 4 momentos ao longo do período de coleta de dados.

A análise da acurácia das leituras resulta em erros menores que 25% nos sensores instalados até 15 cm de profundidade e erros menores que 35% nos sensores instalados nas profundidades de 30 e 50 cm (Apêndices A e B). Cabe ressaltar ainda que o erro pode ter sido aumentado devido ao sentido de orientação das sondas (horizontal) e o sentido de coleta (vertical) e a variabilidade espacial entre a instalação da sonda e o local de coleta.

4.6 ESTUDOS

4.6.1 Efeito da palha sobre a temperatura do solo de diferentes profundidades do solo

Foram utilizados os valores de T_s medidos no período de 01 de dezembro de 2014 a 06 de dezembro de 2015. A partir das três repetições de cada tratamento foi obtido um valor médio para a T_s em cada profundidade. A T_s horária de cada profundidade (0, 5, 15, 30 e 50 cm) dos locais cobertos com palha (3, 6 e 9 Mg ha⁻¹) ($T_{s_{cp}}$) foi relacionada com a T_s da respectiva profundidade do solo descoberto (0 Mg ha⁻¹) ($T_{s_{sp}}$), a fim de avaliar o efeito da palha sobre a T_s .

Para cada profundidade foi ajustada uma equação de regressão linear (equação 4) pelo método dos mínimos quadrados.

$$T_{s_{cp}} = b_0 + b_1 T_{s_{sp}} \quad (4)$$

Em que: $T_{s_{cp}}$ é a temperatura do solo com palha, $T_{s_{sp}}$ é a temperatura do solo sem palha, b_0 e b_1 são coeficientes de ajuste.

Os coeficientes b_0 e b_1 das equações foram comparados com os coeficientes da equação da reta 1:1, para a qual $b_1 = 1$ e $b_0 = 0$, resultando na equação 5.

$$T_{s_{cp}} = T_{s_{sp}} \quad (5)$$

A equação 5 considera não existir efeito da palha sobre a T_s . A comparação dos coeficientes foi realizada pelo teste t, considerando-se as hipóteses $b_0 \neq 0$ e $b_1 \neq 1$, a 5% de probabilidade de erro.

A intersecção da reta da equação 4 com a reta da equação 5 foi calculada pela equação 6.

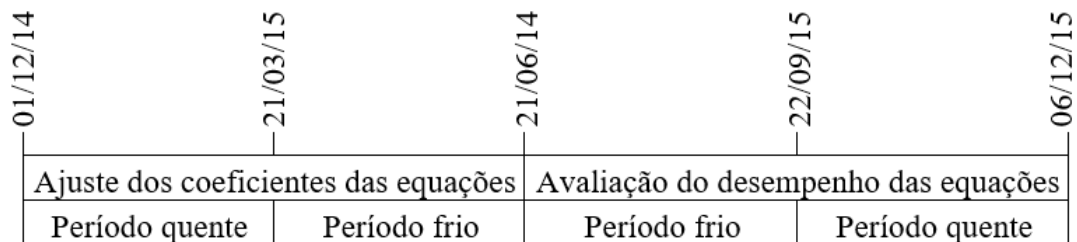
$$T_{s_{sp}} = b_0 / (1 - b_1) \quad (6)$$

A equação 6 indica o ponto de inversão do efeito da palha sobre a T_s , ou seja, o valor de temperatura no qual a T_s do solo descoberto é igual a T_s do solo com palha.

4.6.2 Estimativa da temperatura da superfície do solo em função da Temperatura do ar e radiação solar

Foram utilizados os valores de T_{sup} medidos no experimento e os dados meteorológicos T_{ar} ($^{\circ}C$) e Rad ($kJ\ m^{-2}$), referentes ao período de 01 de dezembro de 2014 a 06 de dezembro de 2015. Esses dados foram agrupados em duas séries, conforme demonstrado na Figura 3.

Figura 3 - Linha do tempo da utilização dos dados para ajuste e validação das equações de estimativa da temperatura da superfície do solo.



Fonte: O autor

A primeira série reuniu as informações do período entre 01 de dezembro de 2014 e 21 de junho de 2015 e foi utilizada para ajustar os coeficientes de equações lineares múltiplas, enquanto a segunda série reuniu dados compreendendo o período de 22 de junho de 2015 a 06 de dezembro de 2015 e foi utilizada como dados independentes para a avaliação do desempenho das equações.

A estimativa dos coeficientes das equações foi por meio do método dos mínimos quadrados. Uma variável binária Dummy (D) foi incluída para separar as equações em período com temperaturas mais elevadas, denominado de período quente e identificado com D igual a zero, e período com temperaturas menos elevadas, que foi denominado de período frio e identificado com D igual a um. Para isso a primeira série de dados foi dividida de 01/12/14 a 20/03/15 e identificado com D igual a zero (0) e de 21/03 a 21/06/15 e identificado com D igual a um (1) (Figura 3).

As equações foram ajustadas considerando uma situação geral, denominada de equação geral, que envolve o uso da Qrv como variável independente (equação 7) e outra específica, onde foi ajustado uma equação para estimativa da Tsup em cada Qrv (equação 8).

$$T_{sup} = b_0 + b_1 * T_{ar} + b_2 * Rad + b_3 * Qrv + b_4 * D + b_5 * T_{ar} * D + b_6 * Rad * D + b_7 * Qrv * D \quad (7)$$

$$T_{sup} = b_0 + b_1 * T_{ar} + b_2 * Rad + b_3 * D + b_4 * T_{ar} * D + b_5 * Rad * D \quad (8)$$

Em que: Tar é a temperatura do ar (°C); Rad é a radiação solar (kJ.m⁻²); Qrv é a quantidade de resíduos vegetais em cobertura (Mg ha⁻¹); e b₁ a b₇ são coeficientes de ajuste.

A Rad permaneceu como parâmetro de entrada na equação somente quando o valor de seu coeficiente era positivo. Quando esta restrição não era atendida, a equação era novamente

gerada, passando a ter como variáveis independentes a Tar e a Qrv na situação geral (equação 7) e somente a Tar na situação específica (equação 8). Os coeficientes da Tar, Rad e D somente foram utilizados nas equações quando seus valores foram significativos pelo teste t, a 5% de probabilidade de erro. Ainda, cabe ressaltar que outras tentativas para melhorar o desempenho das equações foram realizadas separando os valores em período diurno e noturno, mas as equações obtidas apresentaram menor poder de predição quando comparadas às equações anteriores.

As equações obtidas no período frio foram aplicadas no subsequente período frio (D=1), de 22/06 a 22/09/15, e as equações obtidas no período quente foram aplicadas no subsequente período quente (D=0), de 23/09 a 6/12/15.

A equação senoidal (equação 9) foi usada para estimar a Tsup, sendo seu desempenho usado como referência para a comparação do desempenho da equação geral e específicas ajustadas.

$$T_{(z,t)} = \bar{T} + T_o \operatorname{sen} \left(\frac{2\pi t}{p_t} - \frac{9\pi}{12} \right) \quad \text{para } z = 0 \text{ e } 0 < t < 24 \text{ h} \quad (9)$$

Em que: $T_{(z,t)}$ é a temperatura do solo (°C); z é a profundidade (cm), t é o tempo (h); p_t é o período de tempo (h) necessário para completar um ciclo da onda senoidal (adimensional); \bar{T} é a temperatura média em torno da qual a temperatura oscila senoidalmente (°C); T_o é a amplitude da oscilação (metade da diferença entre temperatura máxima e mínima) (°C); A segunda parte do termo seno foi incluída para forçar a ocorrência da temperatura máxima as 15 h, a fim de seguir o padrão observado nas leituras da Tsup.

As temperaturas médias e a amplitude de oscilação foram calculadas com base nos valores das 24 leituras medidas em cada dia. Esses valores foram posteriormente e informados em cada dia simulado com a equação senoidal. O desempenho entre equações foi avaliado por meio da raiz quadrada média do erro (RQME):

$$RQME = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{sim} - Y_i^{obs})^2}{n} \right]^{0,5} \quad (10)$$

Em que: Y^{sim} é o valor simulado/estimado; Y^{obs} é o valor observado; n é o número de observações.

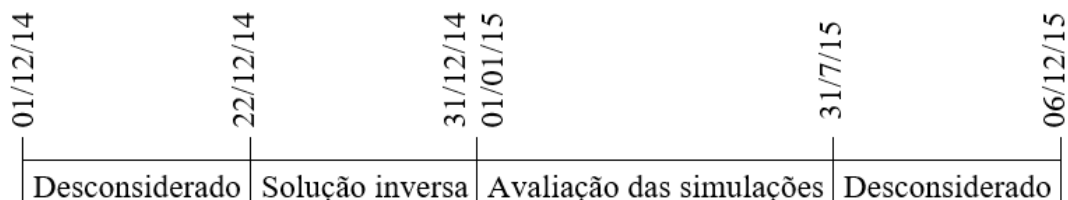
A análise dos resíduos entre aos valores simulado/estimado e o observado (equação 11) foi realizada para as três equações: (i) dentro de cada Qrv; e (ii) para cada hora nas diferentes Qrv. Os resíduos foram separados em classes com intervalo de 1°C, calculando-se também a frequência de ocorrência em cada classe.

$$Y^{\text{sim}} - Y^{\text{obs}} \quad (11)$$

4.6.3 Simulação do conteúdo de água e temperatura do solo utilizando o modelo Hydrus- 1D

Foram utilizados os valores medidos de T_s , θ e as informações meteorológicas do período de 22 de dezembro de 2014 a 31 de junho de 2015. A linha do tempo da utilização dos dados indica a finalidade de uso de cada período (Figura 4).

Figura 4 - Linha do tempo do uso dos dados na otimização dos parâmetros e avaliação das simulações de temperatura e conteúdo de água no solo



Fonte: O autor

A avaliação do desempenho das simulações com os parâmetros de solo não considerou os diferentes níveis de palha em cobertura, portanto neste estudo foram utilizados somente as informações do tratamento com solo descoberto nas profundidades de 5, 15 e 30 cm. Os dados de 22 de dezembro a 31 de dezembro de 2014 foram utilizados na otimização dos parâmetros por meio da solução inversa. Na avaliação das simulações, foram utilizados os dados do período de 1 de janeiro a 31 de junho de 2015.

4.6.3.1 Modelo numérico dos fluxos de água e calor no solo utilizado nas simulações

As informações deste item foram compiladas a partir do material de autoria de Simuek et al. (2013), em que os autores descrevem os princípios dos modelos numéricos utilizados pelo Hydrus-1D para descrever os fluxos de água e calor no solo.

O Hydrus-1D foi usado para simulação unidirecional dos fluxos de água e calor no solo. Este modelo utiliza como estratégia de simulações a solução numérica das equações de conservação de massas. O código do Hydrus-1D utiliza a equação de Richards (equação 12), derivada da equação da continuidade para descrever os movimentos internos de água no solo, para condições de solo saturado e insaturado.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \left(\frac{\partial \Psi}{\partial z} + \cos \alpha \right) \right] - S(h) \quad (12)$$

Em que: θ é o conteúdo volumétrico de água ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), t é o tempo (h); Ψ é o potencial matricial (cm); z é a coordenada espacial, positivo acima (cm); $\alpha = 0^\circ$ para fluxo vertical, 90° para fluxo horizontal, e $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ para fluxo inclinado; $S(h)$ é o parâmetro de representação de absorção de água pelas raiz (h^{-1}) e $K(\theta)$ é a condutividade hidráulica do solo para determinado conteúdo de água (cm h^{-1}).

A solução da equação de Richards, por ser aplicada tanto em condições de solo saturado quanto em solo não saturado, requer o conhecimento das funções hidráulicas do solo nestas condições, que são fornecidos por meio da CRA e da K_s , em que cada θ é relacionado com um potencial matricial do solo (Ψ) por meio da equação de Van Genuchten (1980) sem ocorrência de histerese, para descrever a CRA. A partir da CRA foi então estimada a condutividade hidráulica do solo não saturado ($K(\theta)$). As equações que descrevem estes processos são:

$$\theta(\Psi) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha\Psi|^n]^m} & \Psi < 0 \\ \theta_s & \Psi \geq 0 \end{cases} \quad (13)$$

$$K(\theta) = K_s S_e^l [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (14)$$

$$m = 1 - 1/n, \quad n > 1 \quad (15)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (16)$$

Em que: θ (Ψ) é o conteúdo volumétrico de água do solo em determinado potencial matricial ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); Ψ é o potencial matricial (cm); θ_s é o conteúdo volumétrico de água no solo saturado ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); θ_r é o conteúdo volumétrico de água residual ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); α ($1/\text{cm}$), m e n (adimensionais) são parâmetros empíricos da CRA; $K(\theta)$ é a condutividade hidráulica do solo não saturado (cm h^{-1}); K_s é a condutividade hidráulica do solo saturado (cm h^{-1}); S_e é a saturação efetiva (adimensional); l é o parâmetros de conectividade e tortuosidade de poros (adimensional).

O modelo numérico utilizado para a simulação do fluxo de calor no solo, não considerando o transporte de vapor, pode ser descrito a partir da equação de dispersão/convecção, proveniente da equação 17, ou por meio de sua equivalente (equação 18) apresentada por Simunek et al. (2013):

$$\frac{\partial C_p(\theta)T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(\theta) \frac{\partial T}{\partial z} \right) - C_w \frac{\partial qT}{\partial z} - C_w ST \quad (17)$$

$$C_p(\theta) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(\theta) \frac{\partial T}{\partial z} \right) - C_w q \frac{\partial T}{\partial z} \quad (18)$$

Em que: $C_p(\theta)$ e C_w correspondem a capacidade volumétrica de calor na fase sólida e líquida do solo, respectivamente ($\text{J cm}^{-3} \text{°C}^{-1}$); T é a temperatura (°C); t é o tempo (h); $\lambda(\theta)$ é a condutividade térmica aparente do solo ($\text{W cm}^{-3} \text{h}^{-1} \text{°C}^{-1}$); e q é a densidade de fluxo líquido de água (m s^{-1});

O primeiro termo do lado direito da equação 17 representa o fluxo de calor por condução, o segundo termo representa o fluxo de calor transportado pelo fluxo de água e o terceiro termo representa a energia que as plantas retiram do sistema com a absorção de água.

O terceiro termo da equação não é desenvolvido neste estudo pois durante a condução do experimento não teve desenvolvimento de plantas. A equação 18 é derivada da equação 17, utilizando informações da equação de Darcy que descreve o fluxo de água no solo (SIMUNEK et al., 2013).

A capacidade volumétrica de calor é definida como o produto da densidade e a capacidade gravimétrica de calor. De acordo com de Vries (1963), a capacidade volumétrica de calor é dada pela equação 19:

$$C_p(\theta) = C_n\theta_n + C_o\theta_o + C_w\theta + C_a a_v \cong (1.92 \theta_n + 2.51\theta_o + 4.18\theta) \cdot 10^6 \quad (19)$$

Em que: θ referem-se a frações volumétricas ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); subscritos n, o, a e w representam fase sólida, matéria orgânica, gasosa e líquida, respectivamente.

A condutividade térmica aparente do solo ($\lambda(\theta)$) é obtida por meio da resolução da equação 20.

$$\lambda(\theta) = \lambda_0(\theta) + \beta C_w |q_L| \quad (20)$$

Em que: β é a dispersividade térmica (cm); q_L é a densidade de fluxo de água (cm h^{-1}); $\lambda_0(\theta)$ é a condutividade térmica ($\text{W cm}^{-3} \text{ h}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$), descrita pela equação de Chung e Horton (1987), e representada pela equação 21;

$$\lambda_0(\theta) = b_1 + b_2(\theta) + b_3(\theta)^{0,5} \quad (21)$$

Em que: b_1 , b_2 e b_3 são coeficientes empíricos ($\text{W cm}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$).

4.6.3.2 Perfil de simulação e condições de contorno da simulação do conteúdo de água e temperatura do solo

Inicialmente, um perfil de simulação com espessura de 50 cm foi criado no Hydrus-1D. Este perfil foi dividido em 3 camadas, informando que este seria formado por três tipos de materiais, como observado no solo, buscando assim representar fielmente o solo do local de onde foram obtidos os valores reais usados na avaliação do desempenho da simulação. O perfil de simulação foi discretizado em 501 nós equidistantes, distanciados um do outro em 0,1 cm, resultando em 500 intervalos de simulação. Foram inseridos 3 pontos de observação nas profundidades de 5, 15 e 30 cm no perfil de simulação, para obter os resultados das simulações,

correspondentes às profundidades que os sensores instalados no experimento estavam inseridos no solo para monitoramento da Ts e do θ .

As simulações utilizaram como variáveis de entrada valores da precipitação horária, ETP, Tsup e temperatura da camada inferior do perfil de solo. A simulação utilizou passo de tempo inicial de 0,024 h, com mínimo de 0,00024 h e máximo de 120 h. O modelo de van Genuchten-Mualem (VAN GENUCHTEN, 1980), sem histerese, foi utilizado para descrever a CRA, a partir da qual foi estimada a $K(\theta)$, que são descritas pelas equações 12, 13 e 14.

Para o fluxo de água, adotou-se como condições de contorno superior as condições atmosféricas com possibilidade de ocorrência de escoamento superficial, enquanto que para a base do perfil a condição de contorno considerava a drenagem livre. Para o fluxo de calor, adotou-se as Ts medidas na superfície e a 50 cm de profundidade como condição de contorno superior e inferior.

A entrada de água no perfil compreende a precipitação horária (cm h^{-1}), enquanto que a saída de água na superfície do perfil foi estimada com a equação 22.

$$E_p = ETP e^{-kIAF} \quad (22)$$

Em que: E_p é a evaporação potencial (cm h^{-1}); ETP é a evapotranspiração potencial (cm h^{-1}); IAF é o índice de área foliar (adimensional); k é a constante que rege a extinção de radiação pelo dossel (adimensional).

Não havendo desenvolvimento de plantas durante o período do experimento o índice de área foliar (IAF) é igual a zero, sendo assim, a equação 22 resulta na evaporação potencial igual a ETP. A solução da equação 22 requer o valor da ETP que foi obtido por meio da equação de Penman-Monteith (PM) adaptado para cálculo da ETP horária (equação 23) (ALLEN et al., 2006).

$$ETP = \frac{0,408 S(R_n - G) + \gamma \frac{37}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{S + \gamma(1 + 0,24u_2)} \quad (23)$$

Em que: ETP é a evapotranspiração potencial (mm h^{-1}); S é a declividade da curva de pressão de vapor de saturação versus a curva de temperatura ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); R_n é a radiação líquida na superfície da cultura ($\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$); G é a densidade de fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$); T é a temperatura média do ar horária ($^\circ\text{C}$); u_2 é a velocidade do vento a 2 m de altura (m s^{-1}); e_s

é a pressão de vapor de saturação (kPa); e_a é a pressão atual de vapor (kPa); $e_s - e_a$ é o déficit de pressão de vapor de saturação (kPa).

As variáveis da equação 22 foram calculadas conforme as equações 24 a 27.

$$R_n = 0,57378 \text{ Rad (PEREIRA et al. 1998)} \quad (24)$$

$$G = 0,005 \text{ Rad.} \quad (25)$$

$$e_s = 0,6108 \text{ EXP} \left(\frac{17,27T_{ar}}{T_{ar} + 237,3} \right) \quad (26)$$

$$e_a = e_s \frac{UR}{100} \quad (27)$$

O Hydrus-1D realiza a compensação dos estágios de evaporação em função da disponibilidade de água no solo, reduzindo a evaporação de água do solo quando a umidade na superfície atinge um valor de potencial matricial crítico (Ψ_{crit}), que deve ser informado juntamente com as variáveis de contorno. Durante a simulação, quando o potencial matricial é maior que o Ψ_{crit} , a taxa de evaporação é igual a evapotranspiração potencial, enquanto que quando o potencial matricial do solo é menor que o Ψ_{crit} a evaporação torna-se uma fração da ETP, onde o valor de evaporação é controlado em função das condições $K(\theta)$.

O valor utilizado como Ψ_{crit} para o solo descoberto foi de -15 kPa (-150 cm). Este valor foi encontrado por meio de simulações preliminares a fim de determinar uma razão entre o valor de evaporação acumulada (Eac) e ETP acumulada (ETPac) entre 0,3 e 0,5 para o período de simulação em solo descoberto. O valor adotado para a razão entre Eac e ETPac é reforçado por estudos em que são atribuídas taxas de evaporação de 25 a 40% do valor obtido em ETP, quando não há o sombreamento do solo (DALMAGO et al., 2003). A evaporação direta corresponde a 30% da evapotranspiração da cultura (ETc) do milho e trigo (LIU et al., 2002). De acordo com Prevedello (1996), a Eac pode representar até 50% da ETPac. A razão estipulada no trabalho ainda corrobora com o valor do coeficiente de cultura médio (0,3 - 0,4) utilizado no início do ciclo de desenvolvimento da cultura para a obtenção da ETc (ALLEN et al., 1998).

Os valores medidos de θ e T_s das 23 h do dia anterior ao início das simulações foram usadas como condições iniciais dos valores dos mesmos no perfil de simulação. Estas informações correspondem ao dia 21 de dezembro de 2014 usados para a otimização e do dia 31 de dezembro de 2014 para avaliação do desempenho da simulação.

4.6.3.3 Parametrização inicial, otimização e avaliação do desempenho do modelo Hydrus-1D para simulação da temperatura e conteúdo de água em um Argissolo Vermelho

Os parâmetros θ_s , θ_r , α , n e K_s medidos em laboratório (Tabela 1) e necessários para a simulação dos fluxos de água no solo foram informados no modelo para caracterizar as 3 camadas do perfil de solo. Adotou-se inicialmente o valor de 0,5 para o parâmetro l , necessário para solucionar a equação 14, que é sugerido para adoção nas simulações com uso do Hydrus- 1D (SIMUNEK et al., 2013), quando não se tem o conhecimento do valor do parâmetro medido.

Devido à dificuldade e complexidade de se medir em laboratório os valores dos coeficientes b_1 , b_2 e b_3 da equação 21 e o valor da dispersividade térmica longitudinal (Disp) (equação 20) utilizou-se os valores sugeridos pelo Hydrus-1D. Os valores dos coeficientes b_1 , b_2 e b_3 são reportados por Chung e Horton (1987), e separados por tipo de solo, tendo-se adotado os coeficientes relativos ao solo arenoso neste trabalho. Os valores dos parâmetros do fluxo de calor no solo estão informados na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros iniciais das simulações como fração de sólidos, matéria orgânica, dispersividade térmica longitudinal (Disp), coeficientes da equação de condutividade térmica e capacidade volumétrica de calor das frações sólida (Cn) de matéria orgânica (Co) e água (Cw) requeridos para a simulação temperatura do solo.

Camada	Fração de sólidos	Fração MO	Disp
cm	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	cm
0-21	0,65	0,025	5
21-37	0,66	0,018	5
37-50	0,61	0,018	5
	b_1	b_2	b_3
		$\text{W cm}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	
0-21	$1,06 \cdot 10^{12}$	$-1,12 \cdot 10^{13}$	$2,29 \cdot 10^{13}$
21-37	$1,06 \cdot 10^{12}$	$-1,12 \cdot 10^{13}$	$2,29 \cdot 10^{13}$
37-50	$1,06 \cdot 10^{12}$	$-1,12 \cdot 10^{13}$	$2,29 \cdot 10^{13}$
	Cn	Co	Cw
		$\text{J cm}^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	
0-21	$2,49 \cdot 10^{11}$	$3,25 \cdot 10^{11}$	$5,42 \cdot 10^{11}$
21-37	$2,49 \cdot 10^{11}$	$3,25 \cdot 10^{11}$	$5,42 \cdot 10^{11}$
37-50	$2,49 \cdot 10^{11}$	$3,25 \cdot 10^{11}$	$5,42 \cdot 10^{11}$

A avaliação das simulações de θ e da Ts utilizando os parâmetros medidos em laboratório foi realizada comparando com os valores de θ e da Ts medidos no período de 1 de janeiro de 2015 a 31 de junho de 2015. Para a avaliação das simulações, analisou-se valores da RQME (equação 10). A análise da distribuição dos resíduos foi realizada por meio da equação 11, sendo os resíduos da simulação da Ts separados em classes com diferenças de 1°C, enquanto que os resíduos da simulação do θ foram separados em classes de 0,03 cm³ cm⁻³. A frequência dos resíduos presente em cada classe foi obtida por razão entre a quantidade de valores contidos em cada classe e o total de observações, que no período compreendeu a 4343 observações.

Após a análise do desempenho da simulação com parâmetros iniciais, optou-se pela otimização dos parâmetros, que foi realizada com o objetivo de melhorar o desempenho das simulações em relação à simulação com os parâmetros iniciais. Na otimização, foram usados dados do período de 22 a 31 de dezembro de 2014, utilizando técnica da solução inversa do Hydrus 1D.

O Hydrus-1D apresenta incluído em seu código um algoritmo, que expressa o erro entre os valores observados e simulados, para otimização dos parâmetros iniciais necessários para a simulação dos fluxos de água e calor (ou solutos) no solo por meio da solução inversa (SIMUNEK et al., 2013). Essa técnica objetiva encontrar valores para os parâmetros, que resultem em resultados das simulações com menores erros em relação aos valores medidos que são usados como referência. Os resultados da equação 28 são minimizados durante o processo de solução inversa por meio do método não linear de Levenberg–Marquardt (SIMUNEK et al., 1998).

$$\Phi(b, p) = \sum_{j=1}^m v_j \sum_{i=1}^{n_j} w_{i,j} [p_j^*(t_i) - p_j(t_i, b)]^2 \quad (28)$$

Em que: m representa os diferentes conjuntos de dados medidos; n_j é o número de medidas referente a cada tipo de observação; p_j^{*}(t_i) é a medida específica no tempo t_i de jth conjunto de observações; p_j(t_i, b) é o valor simulado pelo modelo com o parâmetro otimizado b; v_j e w_j são os pesos associados a conjuntos de dados medidos.

A solução inversa foi aplicada para otimizar alguns parâmetros hidráulicos do solo (θ_r , α , n e l) e os coeficientes b₁, b₂ e b₃ da equação 21. Buscou-se otimizar inicialmente os parâmetros que não haviam sido medidos. Assim, a otimização teve início nos parâmetros l, θ_r , α e n. Os valores de θ_s da primeira e segunda camada foram reduzidos manualmente em 0,01 cm³ cm⁻³, enquanto que os valores de Ks não foram alterados. Optou-se por usar os valores

medidos de K_s e não os otimizados, porque eles extrapolavam limites físicos aceitáveis (valores otimizados acima de 58 cm h^{-1}).

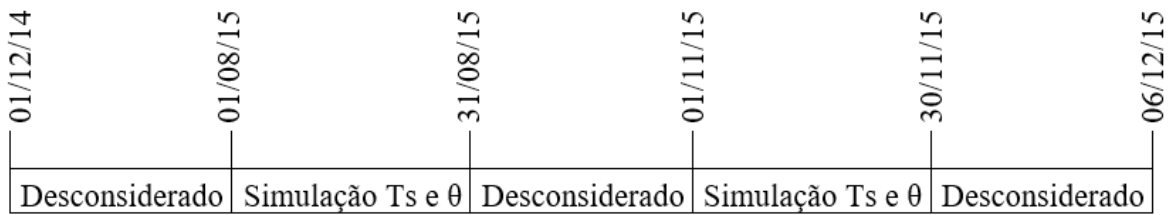
De posse dos valores dos parâmetros otimizados de cada camada realizou-se a comparação desses com os valores iniciais dos parâmetros. Para isso, foram geradas as CRA usando a equação 2 e a curva de $K(\theta)$ com a equação 3 com os parâmetros medidos em laboratório e os otimizados. A mesma comparação foi realizada para a $\lambda_0(\theta)$ (equação 21) em função da variação do θ , utilizando os coeficientes b_1 , b_2 e b_3 apresentado por Chung e Horton (1987) para solos arenosos comparando com os coeficientes otimizados. Por meio desta comparação foram selecionados para o restante das simulações os parâmetros otimizados que não resultavam relações incoerentes para as variáveis relacionadas pelos parâmetros. Quando esta restrição não era atendida, optou-se por manter os parâmetros iniciais.

Após a escolha entre os parâmetros iniciais e os otimizados, estes foram inseridos no Hydrus-1D e foi realizada uma nova simulação com as condições de contorno descritas para o período de 1 de janeiro a 31 de junho de 2015. O desempenho da simulação com os parâmetros escolhidos foi novamente avaliado por meio da análise da RQME (equação 10) e da distribuição da frequência dos resíduos.

4.6.4 Simulação da temperatura do solo sob diferentes quantidades de resíduo vegetal

Foram utilizados dados referentes aos meses de agosto e novembro de 2015 conforme Figura 5. No estudo foram usados os valores de T_s e θ dos tratamentos envolvendo o solo descoberto e cobertos com os 3 níveis de palha. A simulação da T_s e do θ foram realizadas com o uso do Hydrus-1D, sendo os fluxos descritos pelos modelos matemáticos descritos no item 4.6.3.1. As condições de perfil de simulação (espessura, discretização, profundidades e pontos de observação), variáveis de entrada (chuva) e saída de água (ETP) e condições de tempo, passo de simulação, iterações, etc., foram obtidos conforme descritas no estudo 3 e descritas em 4.6.3.2.

Figura 5 - Linha do tempo da utilização dos dados nas simulações de temperatura e conteúdo de água no solo coberto com diferentes quantidades de palha.



Fonte: O autor

Os valores dos parâmetros hidráulicos e térmicos do solo utilizados foram obtidos por meio de solução inversa no estudo anterior, com exceção dos coeficientes b_1 , b_2 e b_3 para a camada de 37 a 50 cm, onde foram utilizados os valores sugeridos por Chung e Horton (1987) para solo arenoso, em decorrência dos valores otimizados para esta camada apresentar relações incoerentes para a variável relacionada pelo parâmetro. Os valores de Ψ_{crit} , que foram aumentados com o aumento da quantidade de palha, a fim de reduzir as quantidades de água perdida por evaporação, mantendo-as próximas a valores reportados na literatura para perda de água por evaporação com a quantidade de palha disposta em cobertura de cada tratamento. Para o solo descoberto o Ψ_{crit} foi de -15 kPa (-150 cm), enquanto que solos cobertos com 3, 6, e 9 Mg ha⁻¹ os valores de -13,3 kPa (-133 cm), -11,7 kPa (-117 cm) e -10 kPa (-100 cm) foram adotados, respectivamente, para cada quantidade de palha.

Dois cenários de simulação foram criados modificando as condições de contorno da T_{sup} , variável necessária para a simulações da T_s . A T_{sup} medida foi utilizada como condição de contorno para o cenário 1 (C1), enquanto que para o cenário 2 (C2) a T_{sup} foi estimada por meio da equação obtida no estudo 2 para a situação geral, em que a T_{sup} é estimada em função da T_{ar} , Rad e Q_{rv} . Apesar de cientes da retenção de água da chuva pela palha, esta não foi considerada no presente estudo devido ao objetivo ser de avaliar o uso da equação geral para estimativa da T_{sup} na simulação da T_s . Para isso era necessário que os valores semelhantes de θ resultantes da simulação dentro de cada nível de palha.

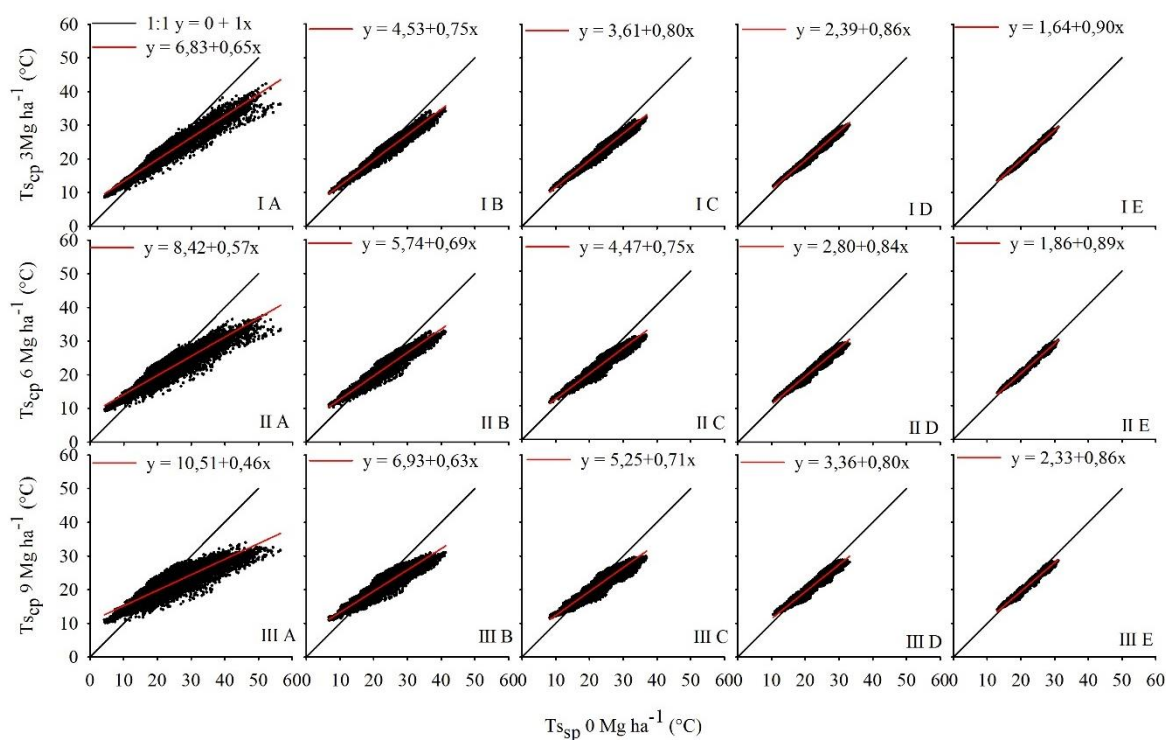
O desempenho das simulações da T_s e do θ no C1 e C2 foram avaliados por meio da RQME (equação 10). As simulações das T_s das 0, 4, 8, 12, 16 e 20 h, do dia 8 de agosto e 8 de novembro foram usadas para a obtenção das tautócronas de T_s .

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 EFEITO DA PALHA SOBRE A TEMPERATURA DO SOLO EM DIFERENTES PROFUNDIDADES

A presença da palha na superfície do solo alterou a variação horária da Ts até a profundidade de 50 cm, indicada pelos coeficientes b_1 e b_0 que foram estatisticamente diferentes de 1 e 0, respectivamente (Figura 6).

Figura 6 - Relação entre temperatura do solo coberto ($T_{s_{cp}}$) com 3(I), 6(II) e 9(III) $Mg\ ha^{-1}$ de palha e temperatura do solo sem palha ($T_{s_{sp}}$) na superfície do solo (A), a 5 cm (B), a 15 cm (C), a 30 cm (D) e a 50 cm (E) de profundidade.



Fonte: O Autor

Em todos os casos, o coeficiente b_1 foi menor que um e o coeficiente b_0 foi maior que zero. O fato de b_0 ser maior que zero indica uma tendência de que no início do dia a temperatura era mais elevada no solo coberto com palha e o fato de b_1 ser menor que um indica que a taxa de aquecimento e resfriamento do solo com palha é menor que no solo descoberto. Isto ocorre principalmente devido à dois mecanismos. O primeiro deles é o aumento da refletividade (albedo) na superfície da camada vegetal em comparação ao solo desnudo (LIU et al., 2014), o

que reduz a quantidade de energia disponível para aquecer a superfície. O segundo mecanismo resulta da barreira física proporcionada pela palha em cobertura, resultando na redução do fluxo de calor em seu interior. Este fato provocou redução no aquecimento do solo em profundidade durante o período diurno e também o resfriamento do solo durante a noite, corroborando com Webler et al. (2016), que indicam menores perdas de energia em solo coberto.

A temperatura no ponto de intercepção da reta de regressão da $T_{s_{cp}}$ com a reta 1:1 foi denominado neste estudo como temperatura de inversão do efeito da palha sobre a T_s (T_{inv}). Isso descreve uma relação entre $T_{s_{cp}}$ e $T_{s_{sp}}$ na qual a $T_{s_{cp}}$ é maior que a $T_{s_{sp}}$ quando a $T_{s_{sp}}$ for menor que a T_{inv} enquanto que a $T_{s_{cp}}$ é menor que a $T_{s_{sp}}$ quando a $T_{s_{sp}}$ é maior que a T_{inv} (Figura 6). Para uma mesma profundidade, a T_{inv} apresentou variações de até 0,5 °C entre os tratamentos. Essa variação pode ser considerada pequena, quando comparada à amplitude térmica do solo, o que resulta num valor de T_{inv} semelhante para as diferentes quantidades de palha em uma mesma profundidade. Porém, a T_{inv} diminuiu com o aumento da profundidade (Tabela 3), independentemente da quantidade de palha. Em média, a T_{inv} foi de 19,6 °C na superfície do solo e 16 °C na profundidade de 50 cm. Maiores valores de T_{inv} em camadas próximas à superfície do solo podem estar associadas às maiores amplitudes térmica que ocorre nas camadas superficiais, tanto em escala diária como em escala anual. Resultados deste estudo corroboram os estudos do efeito da palha na T_s a 5 cm de profundidade onde foram observadas $T_{s_{cp}}$ menores que a $T_{s_{sp}}$ quando a $T_{s_{sp}}$ foi maior que 23°C (FURLANI et al., 2008) e 20°C (RIBAS et al., 2015). Os dados deste estudo também corroboram com os de Almeida (2011), que observou que valores de $T_{s_{sp}}$ foram menores que a $T_{s_{cp}}$ quando a $T_{s_{sp}}$ foi de 15,6°C, indicando a manutenção de calor no solo com o uso de palha em cobertura.

Tabela 3 - Temperatura do solo descoberto em que ocorre a inversão do efeito da palha sobre a temperatura do solo coberto (T_{inv}).

Massa seca de palha de aveia (Mg ha ⁻¹)	Profundidade (cm)				
	0	5	15	30	50
	T_{inv} (°C)				
3	19,4	18,4	17,9	16,7	15,8
6	19,5	18,8	18,2	17,0	16,3
9	19,6	18,8	18,1	16,9	16,3

Fonte: O Autor

Em uma mesma profundidade do solo, o incremento da quantidade de palha em cobertura provocou um aumento em b_0 e redução em b_1 (Figura 6). Isto proporcionou diferentes valores de $T_{s_{cp}}$ para uma mesma $T_{s_{sp}}$ em cada um dos tratamentos. Na superfície, os extremos de $T_{s_{sp}}$ verificados foram de 4,2 e 56,5 °C. Quando a $T_{s_{sp}}$ na superfície foi igual a 4,2 °C, a $T_{s_{cp}}$ estimada foi de 9,5; 10,81 e 12,45°C para as quantidades de 3, 6 e 9 Mg ha⁻¹ de palha, respectivamente. No entanto, com a $T_{s_{sp}}$ na superfície igual a 56,5, a $T_{s_{cp}}$ estimada foi de 43,4; 40,6 e 36,7 °C para as quantidades de 3, 6 e 9 Mg ha⁻¹ de palha, respectivamente. Explica-se este resultado devido à redução na perda de energia no solo coberto com o aumento da quantidade de palha, portanto se tem maiores $T_{s_{cp}}$ em relação aos $T_{s_{sp}}$ quando a $T_{s_{sp}}$ for menor que a T_{inv} . Por outro lado, a palha resulta em menores densidade de fluxo de calor (convertido pela absorção da radiação solar na superfície da palha até a superfície do solo), quando comparado ao solo descoberto, resultando em menores $T_{s_{cp}}$ em relação a $T_{s_{sp}}$ quando a $T_{s_{sp}}$ for maior que a T_{inv} . O incremento da quantidade de palha aumenta espessura da camada de palha (ΔZ), diminuindo o gradiente térmico ($\Delta T/\Delta Z$) e tornando mais longo o caminho para a propagação do calor da superfície da palha até a superfície do solo. Considerando que a condutividade térmica (k) do meio (palha e ar) é semelhante em todas as quantidades de palha, a equação de Fourier ($q = k \cdot (\Delta T/\Delta Z)$) indica que há decréscimo na densidade de fluxo de calor (q) com o decréscimo de $\Delta T/\Delta Z$.

O efeito da palha na variação da T_s diminui com o aumento da profundidade, fazendo com que o coeficiente angular (b_1) se aproxime de um (1) e o valor do intercepto (b_0) se aproxime do zero. Consequentemente, a reta que relaciona a $T_{s_{cp}}$ com a $T_{s_{sp}}$ se aproxima da reta 1:1, indicando que a mudança na T_s causada pela palha em superfície decresce com a profundidade. Em decorrência disso, o efeito da palha em cobertura na T_s se anula em alguma profundidade abaixo dos 50 cm. Nesse sentido, diversos autores observaram que a palha em cobertura não provocava efeito sobre a T_s na profundidade de 10 cm quando o solo foi coberto pelo dossel vegetativo de milho (DALMAGO et al., 2004) e de feijão (SILVA et al., 2006). Já Furlani et al. (2008) observaram que a T_s a 5 cm de profundidade não foi afetada pela palha em cobertura quando o solo foi completamente coberto pelo dossel vegetativo de aveia preta e nabo forrageiro. Isso indica que a profundidade do solo em que as temperaturas sofrem influência da cobertura vegetal é dependente da condição de cultivo e da interceptação da radiação solar. Como neste trabalho não houve cultivo, a radiação solar incide diretamente sobre a superfície do solo desnudo e sobre a superfície da camada de palha, resultando em maiores gradientes térmicos no solo descoberto quando comparado aos solos com palha em cobertura,

proporcionando maiores modificações nos valores de temperatura em profundidade entre os tratamentos.

5.2 ESTIMATIVA DA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DO SOLO

Os coeficientes de determinação (R^2) foram maiores que 0,80 para todas as equações ajustadas, indicando o bom ajuste das equações de regressão múltipla (Tabela 4). Esses valores são semelhantes ao R^2 de 0,84 obtido por Azevedo & Galvani (2003) em equações de estimativas da T_{sup} em função da T_{ar} em solos desnudo. Valores de R^2 acima de 0,80 também foram obtidos de regressões da T_s a 5 cm com a T_{ar} durante o período inicial de desenvolvimento do trigo (KRCMAROVA et al., 2013) e do arroz antes da irrigação (SENA et al., 2013), no entanto os autores não informaram as condições de palha e sombreamento do solo, as quais possuem grande interferência nos resultados.

Tabela 4 - Equações para estimativa da temperatura da superfície do solo em função da temperatura do ar (T_{ar}), radiação solar (Rad), quantidade de resíduos vegetais dispostos em cobertura (Q_{rv}) e variável binária Dummy (D).

	Equação geral *	R^2	Eq.
	$T_{sup} = 10,87 - 3,5*D + 0,68*T_{ar} + 0,0016*Rad - 0,0005*Rad*D - 0,31*Q_{rv} + 0,25*Q_{rv}*D^{(1)}$	0,82	29
Cobertura (Mg ha ⁻¹)	Equações específicas **		
0	$T_{sup} = 1,7 + 1,19*D + 1,01*T_{ar} - 0,13*T_{ar}*D + 0,003*Rad - 0,0007*Rad*D$	0,93	30
3	$T_{sup} = 10 - 2,63*D + 0,65*T_{ar} + 0,001*Rad - 0,0003*Rad*D$	0,92	31
6	$T_{sup} = 11,74 - 3,64*D + 0,59*T_{ar} + 0,05*T_{ar}*D + 0,0009*Rad - 0,0005*Rad*D$	0,90	32
9	$T_{sup} = 13,54 - 3,12*D + 0,52*T_{ar} + 0,0001*Rad$	0,88	33

⁽¹⁾ T_{ar} em °C; Rad em kJ m⁻²; Q_{rv} em Mg ha⁻¹; D adimensional

* Utiliza a quantidade de resíduos vegetais como parâmetro de entrada do modelo (variável independente)

** Equação ajustada para estimativa da T_{sup} em cada Q_{rv}

Fonte: O Autor

A diminuição do coeficiente da Rad na sequência 0, 3, 6, 9 Mg ha⁻¹ de Q_{rv} (Tabela 4) indica que o incremento da Q_{rv} diminuiu o efeito direto da Rad na T_{sup} . Consequentemente, na mesma sequência, a T_{sup} passou a ter melhor relação com a T_{ar} . Essas modificações estão associadas a mudanças na quantidade de energia disponível e no meio de propagação do calor. A presença de palha na superfície do solo aumenta a refletividade da Rad e reduz a quantidade

de energia disponível para aquecer a superfície. Além disso, com o aumento da Q_{rv} aumenta espessura da camada de palha (ΔZ), diminuindo o gradiente térmico ($\Delta T/\Delta Z$) e tornando mais longo o caminho para a propagação do calor da superfície da palha até a superfície do solo. Considerando que a condutividade térmica (k) do meio (palha e ar) é semelhante em todas as Q_{rv} , a equação de Fourier ($q = k(\Delta T/\Delta Z)$) indica que há decréscimo na densidade de fluxo de calor (q) com o decréscimo de $\Delta T/\Delta Z$.

O desempenho das três equações foi afetado pela Q_{rv} . A estimativa da T_{sup} por meio da equação senoidal resultou em menor RQME quando comparada com as equações geral e específica em solos cobertos, independentemente da quantidade de palha. No entanto, em solo descoberto a menor RQME foi obtida com uso da equação específica (Tabela 5). A equação geral tem melhor desempenho na estimativa da T_{sup} que a equação específica em solos com Q_{rv} de 6 Mg ha^{-1} , já nas condições de cobertura do solo analisada as equações específicas estimam melhor a T_{sup} que a equação geral nas demais Q_{rv} .

Tabela 5 - Resultado da análise de desempenho das equações por meio da raiz quadrada média do erro (RQME) nas diferentes quantidades de resíduos vegetais (Q_{rv}).

Equação	$Q_{rv} \text{ (Mg ha}^{-1}\text{)}$			
	0	3	6	9
	RQME ($^{\circ}\text{C}$)			
Senoidal	2,89	1,66	1,29	0,95
Geral	3,47	2,67	2,54	2,81
Específica	2,28	2,33	2,58	2,75

Fonte: O Autor

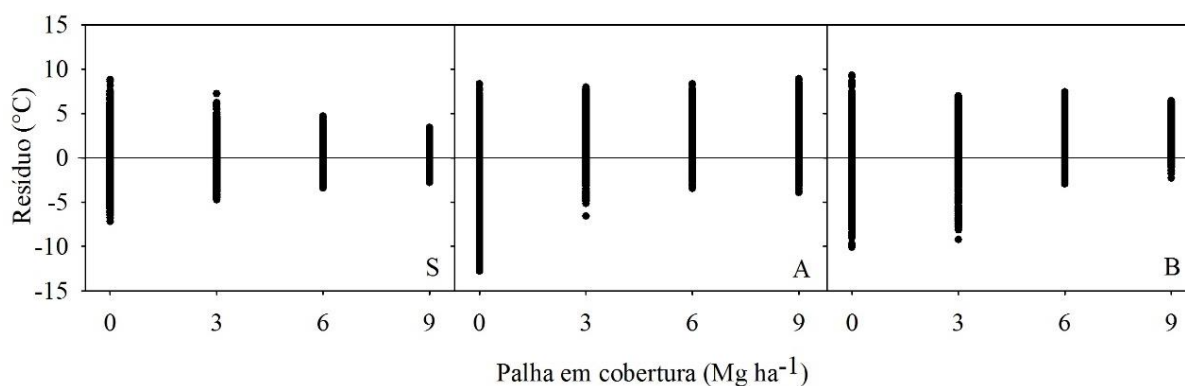
O valor da RQME com o uso da equação senoidal reduziu com o incremento da Q_{rv} . O incremento na Q_{rv} até 9 Mg ha^{-1} resultou em redução de até $1,57 \text{ }^{\circ}\text{C}$ na RQME da T_{sup} estimada com a equação senoidal, reduzindo de $2,89 \text{ }^{\circ}\text{C}$ em solos com 0 Mg ha^{-1} para $0,95 \text{ }^{\circ}\text{C}$ em solos com 9 Mg ha^{-1} . Na estimativa da T_s , a 5 cm de profundidade, utilizando a equação senoidal, Hu et al. (2016) encontraram RQME de $2,59$ e $2,29 \text{ }^{\circ}\text{C}$ em dois locais da China, valores próximos aos encontrados no presente trabalho. A estimativa da T_s em profundidade tende a ter uma maior acurácia em decorrência das menores variações de temperatura (MIHALAKAKOU, 2002).

Em solo descoberto (0 Mg ha^{-1}) o uso das equações geral resultou em aumento de $0,58 \text{ }^{\circ}\text{C}$ em relação a RQME obtida com a equação senoidal. Entretanto, o uso da equação

específica reduziu 0,61 °C na RQME em comparação a equação senoidal. A redução na RQME com a equação específica pode ter ocorrido devido ao melhor ajuste dos coeficientes e principalmente devido ao valor do coeficiente da Rad, que contribuiu para redução de erros na estimativa das T_{sup} máxima no solo descoberto. O uso da equação específica aumentou a RQME em 0,67, 1,29 e 1,80 °C em comparação a equação senoidal para solos com Q_{rv} de 3, 6 e 9 Mg ha⁻¹, respectivamente. Para essas mesmas Q_{rv} em cobertura, o uso da equação geral proporcionou, respectivamente, aumento de 1,01, 1,25 e 1,86 °C na RQME comparada a equação senoidal. A maior diferença na RQME foi de 1,86°C, entre a equação geral e a senoidal, sendo essa diferença menor do que as amplitudes da RQME da equação senoidal nas diferentes Q_{rv} , que foi de 1,94°C. Esse resultado indica que mesmo com maiores RQME, os valores estimados com a equação geral e específica concordam com os valores medidos. Van Donk et al. (2004) observaram valores de RQME de 4,1°C na estimativa da T_s , a 4 cm de profundidade, utilizando um modelo (ENWATBAL.BAS) usado para simulação do balanço de energia e água do solo. Ainda, segundo os autores, mesmo com este valor para RQME o modelo resultou em um bom desempenho na obtenção da T_s .

O incremento da Q_{rv} diminuiu a amplitude dos resíduos da equação senoidal, sendo que o tratamento com 9 Mg ha⁻¹ de palha resultou na menor amplitude de erro (Figura 7S). Os menores erros na estimativa da T_{sup} , usando a equação geral foram verificados nas parcelas com Q_{rv} de 6 Mg ha⁻¹ (Figura 7 A).

Figura 7 – Erros entre as temperaturas da superfície do solo estimadas com as equações senoidal (S), geral (A) e específicas (B) e medidas em cada quantidade de resíduos vegetais dispostos em cobertura no solo.



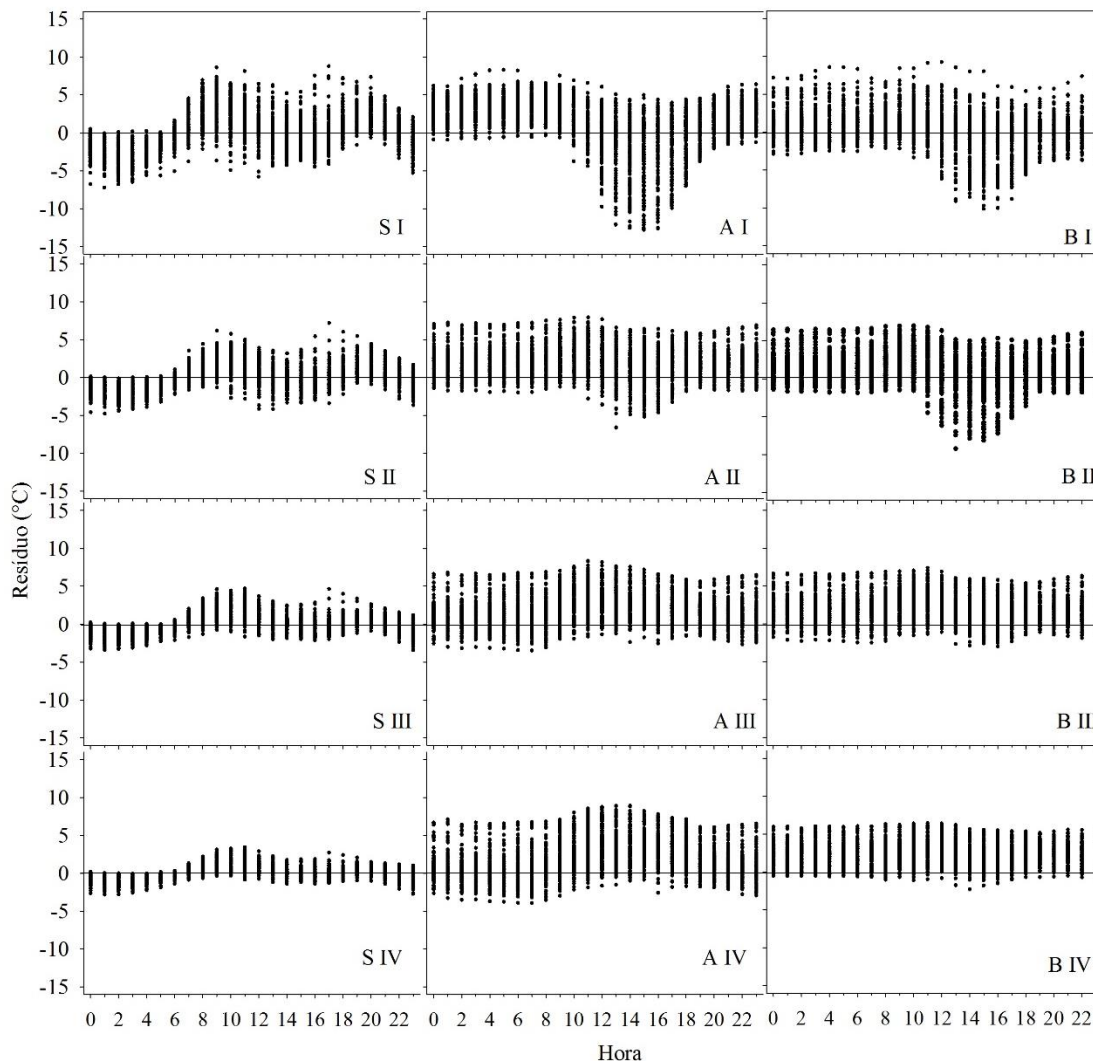
Com as equações específicas, o aumento da Q_{rv} reduziu a amplitude dos erros, comportamento semelhante ao observado para a equação senoidal (Figura 7B). Esse resultado pode ter ocorrido em função da menor amplitude térmica obtida com a cobertura do solo (FURLANI et al., 2008; COELHO et al., 2013) e com o incremento da Q_{rv} (GASPARIM et al., 2005).

A equação senoidal superestimou a T_{sup} em no máximo 8,0; 7,2; 4,7 e 3,4 °C e subestimou em no máximo 7,2; 4,8; 3,4 e 2,8 °C nos solos com 0, 3, 6 e 9 mg ha⁻¹ de palha, respectivamente (Figura 7S). Já a utilização da equação geral superestimou a T_{sup} em no máximo 8,32; 7,95; 8,33 e 8,88 °C e subestimou em no máximo 12,8; 6,6; 3,8 e 3,9 °C em solos com Q_{rv} de 0, 3, 6 e 9 Mg ha⁻¹, respectivamente (Figura 7A). Enquanto que a utilização das equações específicas em solos com 0, 3, 6 e 9 Mg ha⁻¹ superestimou a T_{sup} em no máximo de 9,3; 6,9; 7,4 e 6,4 °C e subestimou em no máximo 10,1; 9,2; 2,9 e 2,3 °C (Figura 7B).

A amplitude entre o valor máximo superestimado e o subestimado da equação senoidal foi de 15,2; 12,0; 8,1 e 6,2 °C em solos com Q_{rv} de 0, 3, 6 e 9 Mg ha⁻¹ (Figura 7S). Nestas mesmas Q_{rv} , o uso da equação geral resultou em amplitudes dos erros de 21,1; 14,5; 12,2 e 12,8 °C e com as equações específicas amplitudes de 19,4; 16,1; 10,3 e 8,7°C respectivamente (Figura 7A e 7B). As amplitudes dos erros foram menores com o uso da equação senoidal quando comparado com as amplitudes resultantes do uso da equação geral e específicas. As equações específicas reduziram as amplitudes dos erros em relação a equação geral (Figura 7A e 7B).

A distribuição horária dos erros na comparação das temperaturas medidas e estimadas auxilia para uma análise mais refinada do desempenho das equações. A equação senoidal tem maiores erro em subestimativa dos valores da T_{sup} das 20 h da noite até às 8h do dia seguinte, em todas as Q_{rv} em cobertura, além de superestimar as T_{sup} predominantemente nos horários entre 8 e 12 h em todas as Q_{rv} (Figura 8 SI, 8 SII, 8 SIII e 8 SIV). A superestimativa da T_{sup} com a equação senoidal também predomina nos horários entre 17 e 21 h em solos com 0, 3 e 6 Mg ha⁻¹.

Figura 8 - Distribuição horária dos resíduos da estimativa da temperatura da superfície do solo com a equação senoidal (S), geral (A) e as específicas (B) em solos com 0(I), 3(II) 6(III) e 9(IV) Mg ha⁻¹ de resíduos vegetais em cobertura.



Fonte: O Autor

A superestimativa da T_{sup} , com a equação senoidal, também predomina nos horários entre 17 e 21 h em solos com 0, 3 e 6 Mg ha⁻¹. Em solo descoberto e com 3 Mg ha⁻¹, a equação geral superestima mais a T_{sup} entre as 20 h até as 9 h do dia seguinte, e subestima mais entre as 9 e 19 h de um mesmo dia (Figura 8 AI e 8 AII). Nas parcelas com 6 e 9 Mg ha⁻¹, a equação geral predominantemente superestimou a T_{sup} , principalmente nos horários entre as 10 e 15 h (Figura 8 AIII e 8 AIV). Este resultado pode ser em função da diferença de T_{sup} máximas e mínimas diária que ocorre entre os tratamentos. Esta diferença entre os tratamentos é contemplada pelo coeficiente B_3 da equação geral, porém o mesmo pode não ser capaz de

contemplar toda a variação que existe na T_{sup} nos diferentes tratamentos. Assim, dentro de cada quantidade de palha a equação geral responde somente às variações de T_{ar} e a Rad , em que os valores aumentam nos horários próximos ao meio dia, proporcionando uma superestimativa da T_{sup} nestes horários para solos com 6 e 9 $Mg\ ha^{-1}$, que são os tratamentos com T_{sup} inferiores aos tratamentos com menor Q_{rv} . No entanto, em solos descobertos e com 3 $Mg\ ha^{-1}$ de palha, como ocorrem picos de T_{sup} máxima, consequentemente a equação não é capaz de proporcionar, em mesma razão a elevação da temperatura, causando a subestimativa. As representações contínuas da T_{sup} ao longo das horas são mostradas no anexo C.

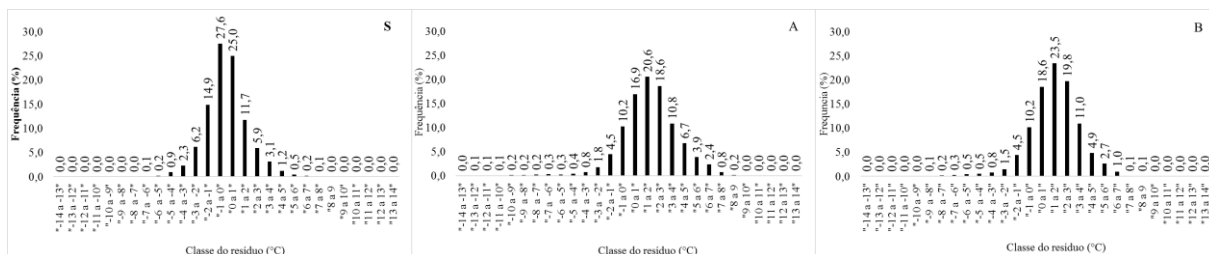
A utilização das equações específicas 30 e 31 (0 e 3 $Mg\ ha^{-1}$ de Q_{rv} , respectivamente) subestimou mais a T_{sup} nos horários entre as 11 e as 17 horas, enquanto nos demais horários ocorreu predomínio superestimativa da T_{sup} (Figura 8 BI e 8 BII). A estimativa da T_{sup} com as equações específicas 32 e 33 (6 e 9 $Mg\ ha^{-1}$ de Q_{rv} , respectivamente) não resultam horários com predominância dos erros em superestimativa ou subestimativa, sendo que em grande parte dos horários ocorrem erros por superestimativa próximos a 5 °C (Figura 8 BIII e 8 BIV).

No período entre as 22 h da noite e as 7 h da manhã, a equação senoidal subestima a T_{sup} mais que a equação geral e as específicas, em todos as Q_{rv} . Nesse período, ambas as equações propostas neste trabalho resultam em maiores superestimativa da T_{sup} . Ainda, na análise da equação senoidal, no período entre 0 e 7 h praticamente não ocorreu superestimativa da T_{sup} . No período das 7 às 21 h a equação senoidal subestimou menos a T_{sup} em relação as duas equações propostas. Entre 8 e 21 h o uso da equação senoidal resultou em amplitude de erros em superestimativa próximas às evidenciadas nas equações gerais e específicas, isso para todas as condições de palha. Entretanto, para os demais períodos os erros em superestimativa com a equação senoidal foram menores em relação aos erros resultantes do uso das equações propostas. Estes resultados demonstram que a equação senoidal, que é amplamente utilizada para a estimativa da T_{sup} , apresenta erros, principalmente em subestimativas da T_{sup} durante o período noturno, erros maiores que as observadas com as equações gerais e específicas. No entanto, em períodos diurnos, a equação senoidal resultou em erros menores quando comparado com as equações sugeridas. Cabe ressaltar ainda, a necessidade das informações observadas da T_{sup} média e a amplitude de oscilação para a operacionalização da equação senoidal, e mesmo tendo estas informações a equação resultou em erros. Caso utilizasse valores de T_{sup} e amplitude médios de outro período os erros com a equação senoidal poderiam ser muito maiores do que os encontrados neste trabalho. As equações propostas apresentam desempenho satisfatório, pois os erros ficaram muito próximos aos da equação senoidal, adotada como referência e amplamente utilizada em modelagem para estimativa da T_s e T_{sup} .

Em solo com Qrv de 0 Mg ha⁻¹, a equação específica subestima menos (Figura 8 BI) que a equação geral (Figura 8 AI). O contrário ocorre para as superestimativas. No solo com Qrv de 3 Mg ha⁻¹ a equação específica (Figura 8 BII) resultou em subestimativa superior à equação geral (Figura 8 AII), enquanto os erros em superestimativa foram semelhantes nesta Qrv. Em solo com 6 Mg ha⁻¹ de palha os erros de subestimativa e superestimativa da equação geral (Figura 8 AIII) foram similares aos do uso da equação específica (Figura 8 BIII). No solo com 9 Mg ha⁻¹ a equação específica teve menores erros em superestimativa e subestimativa (Figura 8 BIV) que os obtidos com a equação geral (Figura 8 AIV). Isto se deve em virtude dos coeficientes B₁ e B₂ da equação específica serem próprios para cada Qrv.

A análise da frequência dos resíduos para o conjunto total dos dados de Tsup mostra que frequências maiores que 5% estão concentradas entre -3 e +3 °C com o uso da equação senoidal (Figura 9 S), entre -1 e +5 °C com o uso da equação geral (Figura 9 A) e entre -1 e +4 °C com o uso das equações específicas (Figura 9 B).

Figura 9 – Histograma dos resíduos entre as temperaturas da superfície do solo medida e estimada em todas as quantidades de resíduos vegetais em cobertura por meio das equações senoidal (S), geral (A) e específicas (B).



Fonte: O Autor.

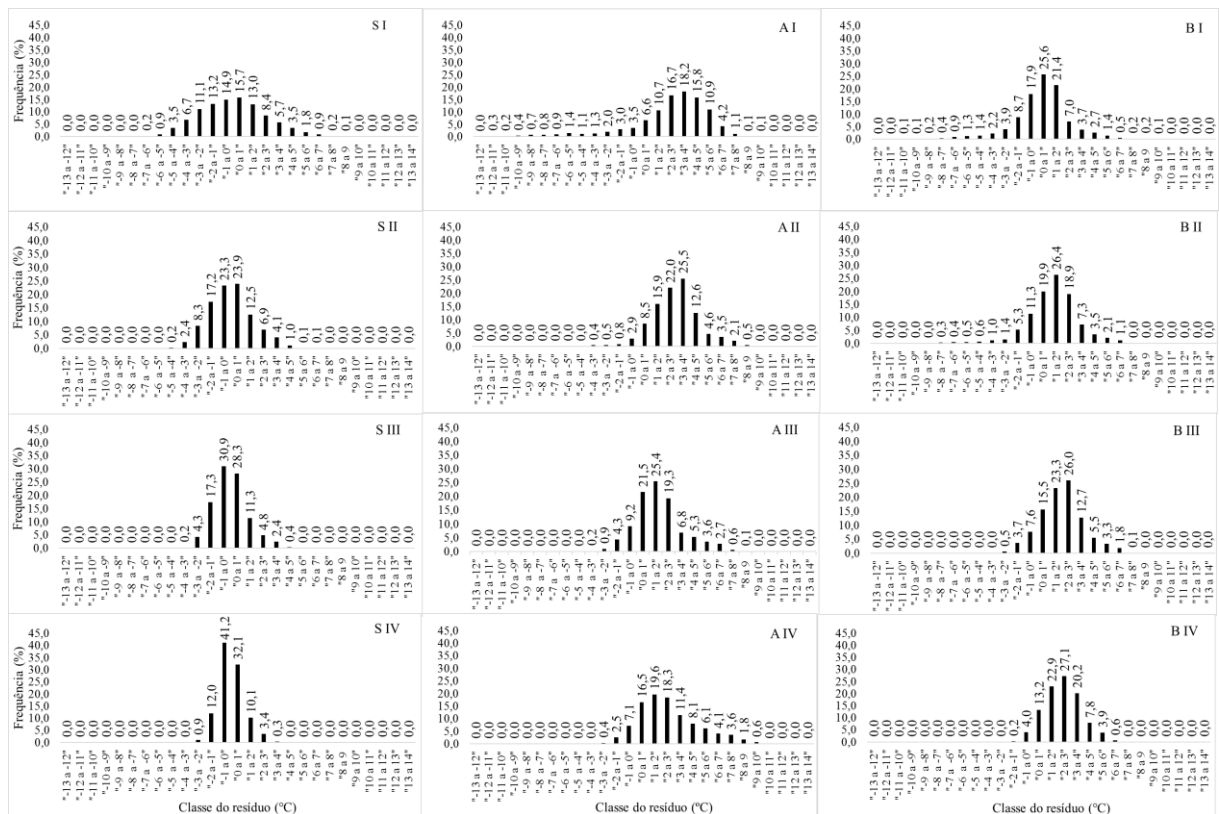
O uso da equação senoidal resultou em 91% dos resíduos nas classes de erro compreendidas dentre -3 e +3 °C e 99% dos erros estão entre -5 e +5 °C. Com o uso da equação geral, 72% dos resíduos então entre -3 e +3 °C e 91% então entre -5 e +5 °C. Com o uso das equações específicas, 78% dos resíduos então entre -3 e +3 °C e 95% então entre -5 e +5 °C (Figura 9).

Os resultados indicam que a aplicabilidade das equações depende do erro admitido nas estimativas da Tsup e que os erros são menores com o uso das equações senoidal. No entanto, as equações propostas resultaram em mais de 70% dos valores estimados com erros entre -3 e 3 °C. As equações específicas resultam em maior acurácia quando comparadas com a equação

geral. A vantagem da equação geral é que ela pode ser aplicada em solos com diferentes Qrv até 9 Mg ha⁻¹, diferentemente das equações específicas, para as quais só se conhece seu desempenho para os Qrv definidos neste estudo. Neste caso, para solos com Qrv intermediários, aos definidos neste estudo, o uso das equações específicas exigiria a escolha da equação considerando a Qrv que mais se aproxima ao Qrv presente no solo onde se pretende aplicar a equação para estimar Tsup.

Uma análise da utilização das equações gerais e específicas em cada quantidade de palha (Figura 10) pode auxiliar a tomada de decisão em relação a adoção da melhor equação tendo como base a acurácia desejada.

Figura 10 - Histograma dos resíduos entre as temperaturas da superfície do solo medida e estimada com as equações senoidal (S), geral (A) e específicas (B) solos cobertos com 0(I), 3(II) 6(III) e 9(IV) Mg ha⁻¹ de palha.



Fonte: O Autor.

Quando a acurácia desejada for baixa e tolerando um erro entre -5 e $+5$ °C, a equação senoidal contempla 96, 99, 100 e 100 % dos resíduos entre os valores tolerados em solos com Qrv de 0, 3, 6 e 9 Mg ha⁻¹ respectivamente (Figura 10 SI, 10 SII, 10 SIII e 10 SIV). A equação geral apresenta uma frequência de erros entre -5 e $+5$ °C de 89, 94, 93 e 90 % para as Qrv 0, 3, 6 e 9 Mg ha⁻¹ respectivamente (Figura 10 AI, 10 AII, 10 AIII e 10 AIV). Tolerando a mesma classe de erros, as equações específicas resultam em frequência de 94, 95, 94 e 95 % nos solos com Qrv de 0, 3, 6 e 9 Mg ha⁻¹ (Figura 10 AI, 10 AII, 10 AIII e 10 AIV). Quando a acurácia desejada é maior, tolerando erros entre -3 e $+3$ °C, o uso da equação senoidal resulta em frequências de 76, 85, 92 e 96% dos erros entre a faixa de erro tolerado para solos com Qrv de 0, 3, 6 e 9 Mg ha⁻¹, respectivamente. Com a equação geral e específica a frequência de erros fica em 57, 75, 80 e 64 % e de 85, 83, 77 e 67% para as Qrv de 0, 3, 6 e 9 Mg ha⁻¹, respectivamente.

Os resultados indicam que a equação senoidal, mesmo ao ser operacionalizada com informações da Tsup média e a amplitude de oscilação obtidos dos valores observados, ocorre erros de estimativa da Tsup ao longo das horas. Assim, além dos erros, para a operacionalização da equação senoidal é necessário medir a Tsup. Ao comparar a equação senoidal com as equações geral e específicas, os erros resultantes do uso destas últimas foram superiores, mas indicam uma facilidade maior na utilização, quando da presença de estações meteorológicas, pois requerem somente informações da Tar e Rad, que são facilmente obtidos nas estações.

A escolha e o uso das equações de estimativa propostas requerem o conhecimento e a determinação da exatidão requerida para as Tsup em função da condição de cobertura do solo. No solo descoberto, a equação específica apresentou melhor acurácia na estimativa da Tsup. No entanto para os demais tratamentos a maior acurácia foi obtida com a equação senoidal. Apesar desse resultado para solos com palha, a análise da acurácia das equações propostas em comparação com a equação senoidal dentro de cada nível de palha indica que as equações propostas podem ser utilizadas para estimativa da Tsup. Assim, a utilização das equações específicas resulta em maior acurácia na estimativa da Tsup em solos com 0 e 9 Mg ha⁻¹ de palha quando comparado a equação geral. No entanto para 3 e 6 Mg ha⁻¹ de palha, tanto a equação geral como as específicas evidenciaram poder de predição semelhante. Portanto, quando o grau de acurácia desejada for mais elevado, é indicado o uso das equações específicas para estimativa de solos descoberto e com 9 Mg ha⁻¹ de palha, enquanto que o uso da equação geral ou específica é recomendado para solos com 3 e 6 Mg ha⁻¹ de palha. Ainda, neste caso a equação geral, mesmo apresentando uma acurácia inferior às equações específicas pode ser

recomendada devido ao fato de permitir a estimativa da T_{sup} em diferentes quantidades de resíduos em superfície.

5.3 SIMULAÇÕES DA TEMPERATURA E DO CONTEÚDO DE ÁGUA NO SOLO COM O HYDRUS-1D

5.3.1 Avaliação da simulação com os parâmetros iniciais

A utilização dos parâmetros hidráulicos do solo medidos em laboratório resultou em valores de RQME maiores que $0,05 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ nas simulações do θ nas profundidades de 5 e 15 cm durante o período de janeiro a junho (Tabela 6). Nesse período, o menor valor de RQME foi de $0,038 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ para a simulação do θ na profundidade de 30 cm.

Tabela 6 - Raiz quadrada média do erro (RQME) para as simulações de conteúdo de água e temperatura do solo, utilizando os parâmetros iniciais obtidos em laboratório, nas profundidades de 5, 15 e 30 cm.

Período	Conteúdo de água			Temperatura do solo		
	RQME			RQME		
	$\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$			$^{\circ}\text{C}$		
	5 cm	15 cm	30 cm	5 cm	15 cm	30 cm
Janeiro – Junho	0,055	0,059	0,038	1,33	0,50	0,59
Janeiro	0,054	0,061	0,042	1,92	0,71	0,61
Fevereiro	0,053	0,057	0,041	1,59	0,58	0,70
Março	0,051	0,054	0,034	1,48	0,54	0,68
Abril	0,059	0,061	0,039	1,15	0,40	0,62
Maio	0,051	0,053	0,028	0,73	0,32	0,45
Junho	0,061	0,066	0,044	0,60	0,31	0,41

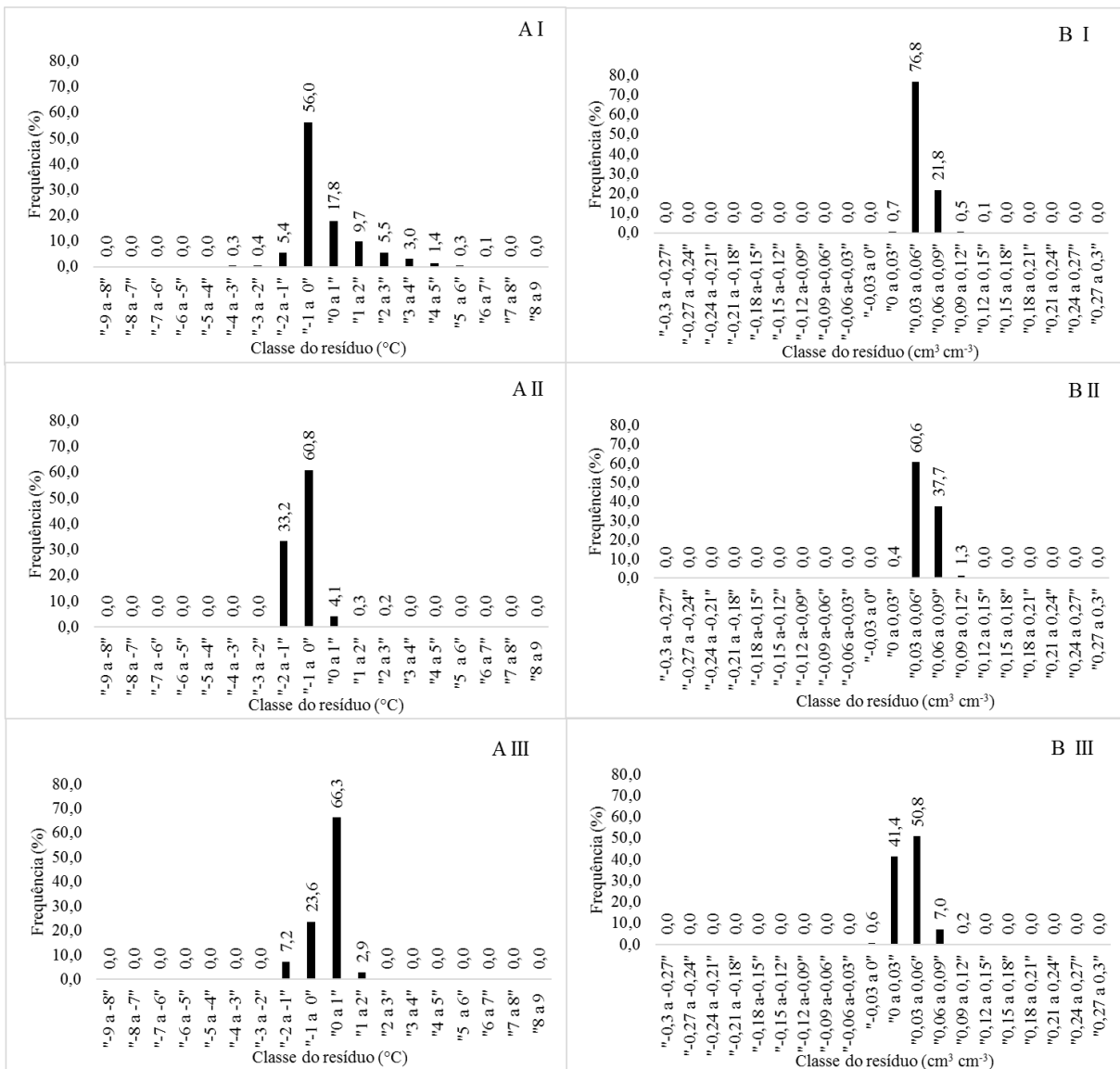
Fonte: O Autor.

A simulação da T_s para a profundidade de 5 cm proporcionou maior valor da RQME ($1,33 \text{ }^{\circ}\text{C}$) durante todo o período de janeiro a junho. Nas demais camadas a simulação resultou em um valor de RQME abaixo de $0,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$. No mês de janeiro ocorreu o pior desempenho na simulação da T_s a 5 e 15 cm, sendo que este resultado é atribuído a amplitude térmica maior que ocorre nos meses de verão em comparação aos meses de inverno, enquanto que no mês de junho, mês com menor amplitude térmica em comparação a janeiro, foram observados os menores valores de RQME nas 3 profundidades simuladas. Apesar do menor valor da RQME

na simulação da Ts, este resultado pode estar distorcidos em função dos valores do θ simulados, o qual é utilizado no cálculo da condutividade térmica do solo.

Ao considerar a distribuição dos resíduos em classes, verifica-se que houve uma subestimativa da Ts nas profundidades de 5 e 15 cm, resultando em frequência erros entre -1 e 0 °C de 56 % e 60,8% respectivamente em cada profundidade. Já na simulação da temperatura a 30 cm, houve superestimativa da Ts simulada com erros entre 0 e 1 °C em 66,3% do período avaliado (Figura 11 AII e 11 AIII).

Figura 11 - Histograma dos resíduos entre as temperatura do solo (A) e o conteúdo de água (B), observado nas simulações a 5 (I), 15 (II) e 30 (III) cm de profundidade.

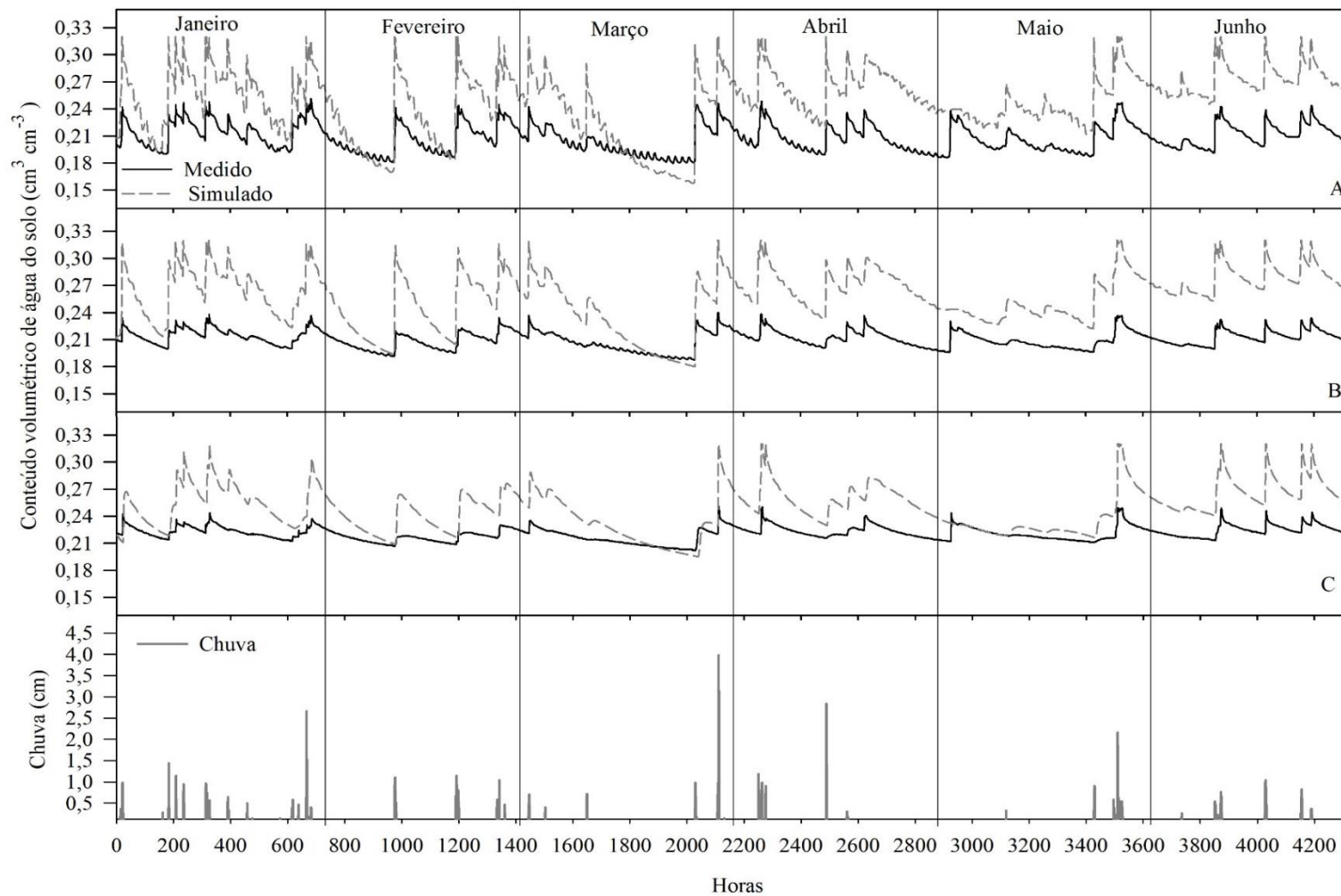


Fonte: O Autor.

A frequência de distribuição dos erros indica a superestimativa do conteúdo de água em todas as profundidades simuladas (Figura 11). Erros entre 0,03 e 0,06 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ são observados em 76,8% do período de janeiro a junho, enquanto erros entre 0,06 e 0,09 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ são observados em 21,8% deste período na simulação do θ a 5 cm (Figura 11 BI). A simulação do θ na profundidade de 15 cm apresentou maiores frequência de erros nas classes de 0,03 a 0,06 (60,6%) e 0,06 a 0,09 (37,7%) $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ (Figura 11 BII). Na camada de 30 cm de profundidade a superestimativa se concentra na classe entre 0,03 e 0,06 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ (50,8%) (Figura 11 BIII).

Apesar dos valores das classes aparentemente serem baixos em termos de θ , quando convertidos para valores de lâmina de água presente no solo o erro aumenta proporcionalmente à espessura da camada de solo. A análise dos valores simulados e observados ao longo do período demonstra que o comportamento do fluxo de água no solo, que provoca as variações do θ , está sendo simulado de forma coerente nas profundidades, porém com valores superestimados (Figura 12 A, 12 B, 12 C), indicando assim, que os parâmetros de entrada necessitam ser otimizados visando melhorar as simulações do θ .

Figura 12 - Conteúdo volumétrico de água no solo observado e simulado no período de janeiro a junho a 5 (A), 15 (B) e 30 (C) cm de profundidade.



Fonte: O Autor.

5.3.2 Avaliação da consistência física dos parâmetros otimizados em relação aos iniciais e desempenho da simulação com os parâmetros otimizados

A otimização dos parâmetros por meio da solução inversa presente no Hydrus-1D permite encontrar valores de parâmetros que melhor descrevem o processo de simulação analisada. Os valores dos parâmetros otimizados (Tabela 7) minimizaram os erros entre os valores simulados e observados no período entre 22 e 31 de dezembro. A otimização de parâmetros por meio da solução inversa é uma técnica utilizada em vários estudos para melhorar o desempenho das simulações (RAMOS et al., 2006; DAHIYA et al., 2007; JANKOSZ, 2008; SIMUNEK et al., 2012), no entanto, para sua operacionalização depende de medições a campo (RAMOS et al., 2006). A comparação entre parâmetros otimizados e os parâmetros obtidos em laboratório indicam que os parâmetros otimizados estimam uma CRA com conformação próxima a CRA com os parâmetros medidos (RAMOS et al., 2006).

Tabela 7 - Parâmetros hidráulicos e térmicos do solo otimizados por meio da solução inversa.

Parâmetros hidráulicos do solo						
Camada (cm)	θ_r $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	θ_s	α $1/\text{cm}$	n	Ks cm h^{-1}	l
0-21	0,00315	0,30	0,0204	1,36	1,2	0,35
21-37	4,79E-05	0,31	0,0156	1,50	0,8	0,000286
37-50	0,02	0,37	0,0177	1,77	1,2	2,6
Coeficientes da condutividade térmica do solo						
	b_1	b_2	b_3	$\text{W cm}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$		
0-21	$2,80 \cdot 10^{09}$	$-4,86 \cdot 10^{10}$	$8,82 \cdot 10^{12}$			
21-37	$8,07 \cdot 10^{10}$	$-1,25 \cdot 10^{09}$	$2,37 \cdot 10^{13}$			
37-50	$6,32 \cdot 10^{12}$	$-1,14 \cdot 10^{11}$	$1,37 \cdot 10^{14}$			

Fonte: O Autor.

De acordo com Minella et al. (2010), a otimização dos parâmetros para simulação do conteúdo de água em uma coluna de areia melhorou o desempenho da simulação. Porém para que este resultado fosse alcançado os valores selecionados não foram coerentes com as características físicas do meio poroso. Na otimização da Ks para simulação de fluxos de água, em um Argissolo Vermelho, este problema também foi reportado por Zwirtes et al. (2014), onde os valores obtidos extrapolam os limites físicos aceitáveis do parâmetro no solo. Com

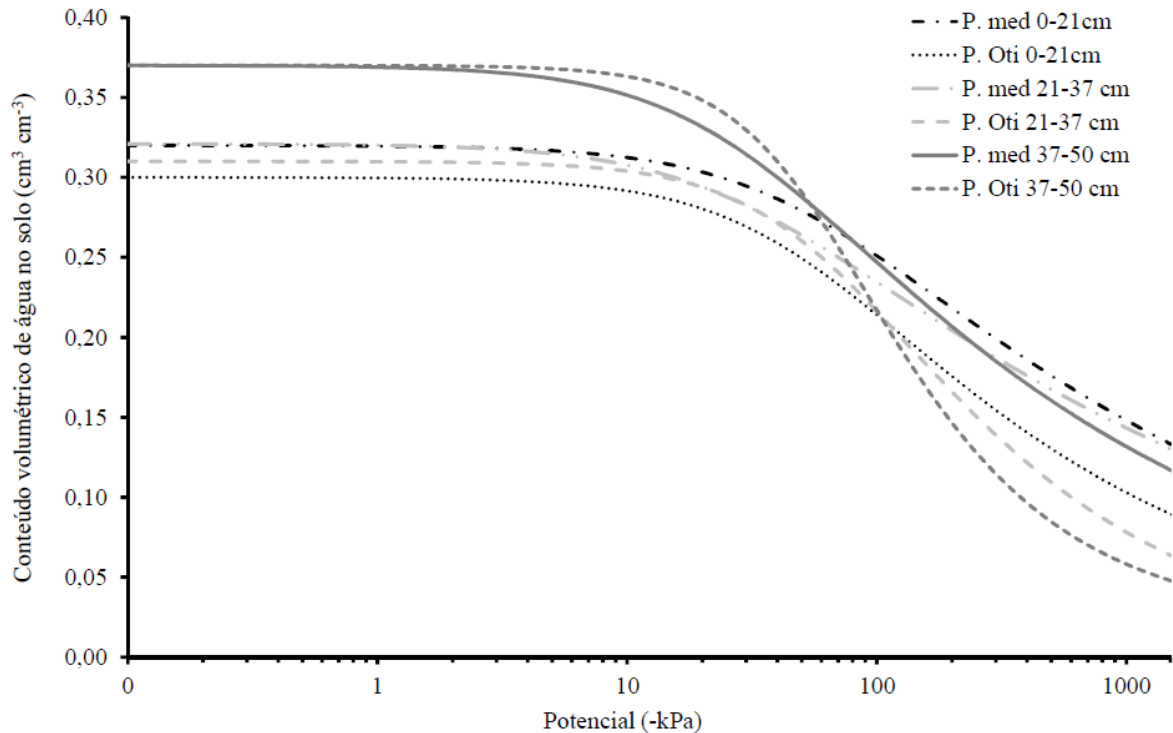
isso, uma análise comparativa entre os parâmetros otimizados e os iniciais se faz necessário para a adoção de parâmetros mais coerentes.

O θ_s foi minimamente reduzido, mantendo-se acima do valor mínimo obtidos nas amostras de solo. Optou-se por manter o θ_s dentro do limite de valores observados nas amostras pelo fato do valor apresentar elevada confiabilidade na determinação. O parâmetro α teve seu valor aumentado na camada de 0-21 cm e reduzido nas demais camadas abaixo. Os parâmetros θ_r e n tiveram seus valores aumentados em todas as camadas. O parâmetro l foi reduzido nas camadas de 0-21 e 21-37 cm e elevado na camada de 37-50 cm.

Na determinação dos parâmetros da CRA, entre as amostras coletadas em cada camada existem variações nos valores dos parâmetros. A variabilidade observada entre as cinco amostras que compreenderam o valor médio utilizado na simulação para o θ_s entre 0,35 e 0,29 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, α entre 0,015 e 0,03 (1/cm) e n entre 1,24 e 1,28 na camada 1; θ_s entre 0,39 e 0,3 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, α entre 0,01 e 0,04 (1/cm), e n entre 1,27 e 1,35 na camada 2 e entre 0,39 e 0,36 ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) α entre 0,02 e 0,03 (1/cm) e n entre 1,27 e 1,3 na camada 3. Quando considerada a variação existente entre as amostras de solo coletada em cada camada, os valores otimizados de θ_s para as três camadas e α para as camadas 1 e 2 ficam entre os extremos dos valores obtidos nas amostras, enquanto que o parâmetro n otimizado teve seu valor modificado acima do maior valor obtido em todas as camadas. Evidenciado, assim, que as amostras de solo coletadas não foram suficientes para contemplar a variabilidade das propriedades físicas e os valores dos parâmetros resultantes das amostras não representam, por meio da simulação, a variação do θ medido.

A expressão dos efeitos proporcionados pela alteração dos parâmetros na CRA pode ser observada na Figura 10, onde observa-se que nas camadas 2 e 3, nas quais houve aumento dos valores de α , ocorre início da redução do θ em potenciais menores que as CRA geradas com os parâmetros obtidos no laboratório. Contudo, com o aumento no valor do parâmetro n estas CRA apresentam um decréscimo de θ mais acentuado.

Figura 13 - Curva de retenção de água do solo, obtidas pelo ajuste dos parâmetros θ_s , θ_r , α , n medidos (P. med) e otimizados (P. Oti) para as camadas 0-21; 21-37 e 37-50 cm de profundidades.

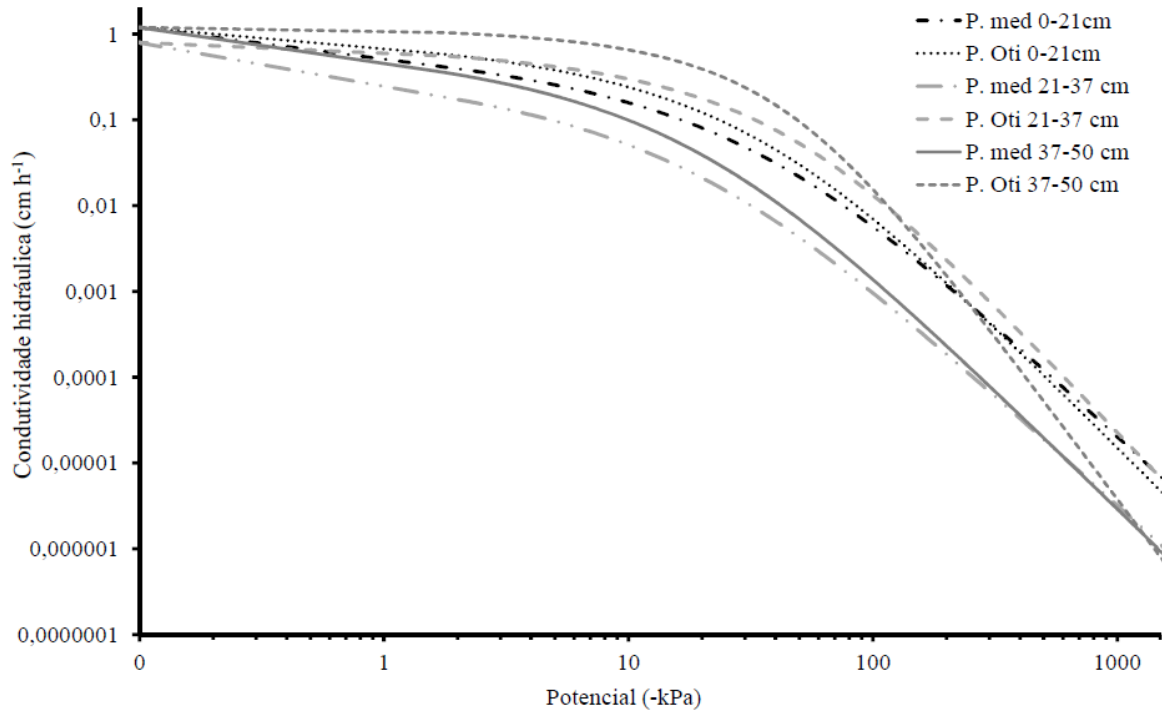


Fonte: O Autor.

Em potenciais maiores que -10 kPa, o θ obtido com as CRA dos parâmetros iniciais e os otimizados apresentam valores próximos em cada camada (Figura 13). As diferenças maiores entre as CRA obtidas com os parâmetros iniciais e os otimizados encontram-se em potenciais menores, abaixo de -100 kPa, em que o θ das CRA com parâmetros otimizados são menores que com parâmetros iniciais.

A modificação da CRA influencia diretamente a $K(\theta)$ em função do modelo usar os valores de θ obtidos por meio da CRA. Além dos parâmetros que modificam a CRA, o parâmetro l também apresenta influência sobre os valores de $K(\theta)$. O aumento no valor l proporciona redução no valor de $K(\theta)$ (JONG VAN LIER et al., 2015). A condutividade hidráulica obtida com os parâmetros otimizados em função do potencial matricial (Ψ) pode ser melhor observada na Figura 14.

Figura 14 - Condutividade hidráulica do solo em função do potencial matricial do solo, com parâmetros iniciais medido em laboratório (P. med) e os parâmetros otimizados (P. Oti) para as três camadas do perfil do solo.

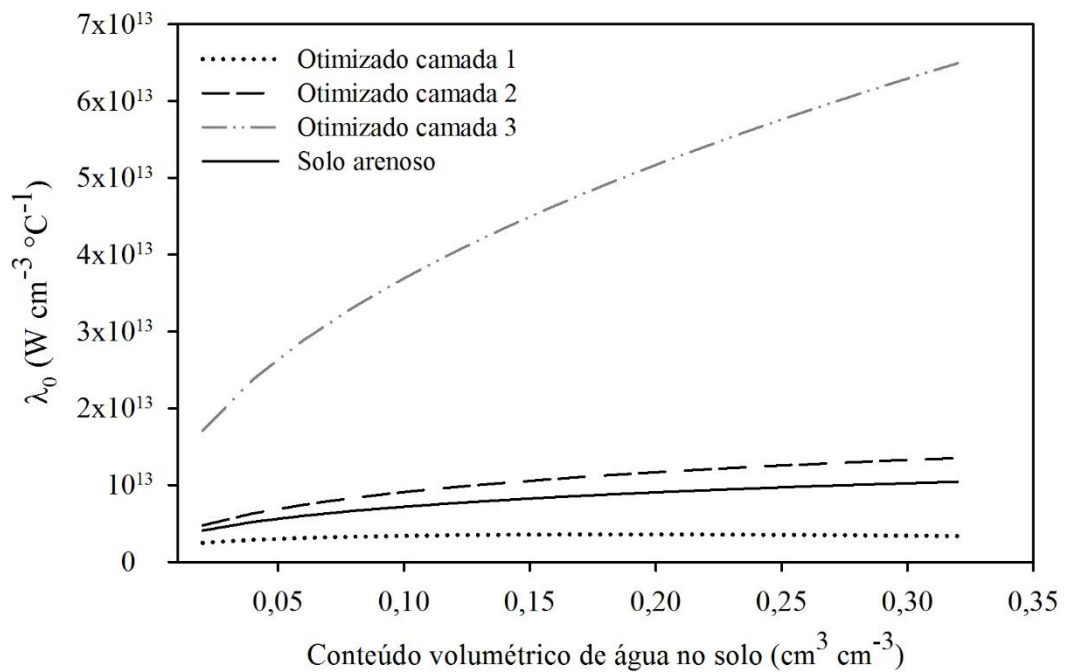


Fonte: O Autor.

Os valores da condutividade hidráulica nos diferentes potenciais estimada com parâmetros otimizados resultaram em valores mais elevados que os obtidos com os parâmetros medidos.

Os coeficientes b_1 , b_2 e b_3 , otimizados para a camada 1 e 2 do solo resultam uma $\lambda_0(\theta)$ com respostas próximas às observadas quando se utiliza os coeficientes apresentados por Chung e Horton (1987) para solo arenoso. Entretanto, os coeficientes otimizados para a camada 3 do solo resultaram em uma elevada $\lambda_0(\theta)$ (Figura 15), resultando em valores discrepantes em relação às $\lambda_0(\theta)$ obtidas com os coeficientes propostos por Chung e Horton (1987) para solos arenosos, que foi usado como condição inicial de simulação.

Figura 15 - Condutividade térmica (λ_0) do solo em função do conteúdo de água no solo.



Fonte: O Autor.

Considerando que a granulometria não possui grande variação entre os horizontes de solo (Tabela 1), as diferenças entre os valores de $\lambda_0(\theta)$ foram altos. Com o θ de $0,02 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ os valores de λ_0 para a camada 3 foram mais elevados que para as demais camadas, com valor 6 vezes superior ao λ_0 observado com os coeficientes do solo arenoso. Este fato indica que o valor otimizado para os coeficientes desta camada podem estar equivocados e não representar efetivamente os processos físicos que ocorrem nesta camada, ainda que, estes valores foram os que minimizaram os erros durante a solução da equação 21 no processo de otimização.

Ao considerar as respostas da $\lambda_0(\theta)$ para as diferentes camadas e tipo de solo optou-se por utilizar os valores dos coeficientes otimizados para a camada 1 e 2, enquanto que para a camada 3 optou-se pela adoção dos valores descritos por Chung e Horton (1987) para solos arenosos, devido a simulação da Ts com estes parâmetros para esta camada concordar com os valores medidos, com RQME de $1,44 \text{ °C}$.

A otimização dos parâmetros de entrada para o fluxo de água no solo proporcionou melhora no desempenho da simulação do θ , resultando em menores valores para RQME (Tabela 8) quando comparados à RQME obtidas com os parâmetros iniciais. Quando considerado o período de janeiro a junho são encontrados valores de RQME $0,0133$, $0,0126$ e $0,0133 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ a 5, 15, 30 cm de profundidade respectivamente. A simulação do θ para o mês

de março e abril resultou em menores valores de RQME em todas profundidades analisadas, enquanto que a simulação do θ no mês de janeiro e fevereiro resultaram em maiores valores de RQME.

Tabela 8 - Raiz quadrada média do erro (RQME) para as simulações de temperatura e conteúdo de água no solo nas profundidades de 5, 15 e 30 cm, utilizando parâmetros otimizados.

Período	Conteúdo de água no solo			Temperatura do solo		
	RQME			RQME		
	cm ³ cm ⁻³			°C		
	5 cm	15 cm	30 cm	5 cm	15cm	30 cm
Janeiro -Junho	0,0133	0,0126	0,0133	0,67	1,22	0,88
Janeiro	0,0147	0,0131	0,0118	1,06	1,24	0,93
Fevereiro	0,0134	0,0128	0,0129	0,77	1,39	0,99
Março	0,0122	0,0099	0,0102	0,78	1,31	0,91
Abril	0,0120	0,0119	0,0118	0,40	1,30	0,89
Maiο	0,0140	0,0137	0,0180	0,34	0,98	0,70
Junho	0,0135	0,0139	0,0135	0,22	1,07	0,80

Fonte: O Autor.

As simulações de Ts usando os parâmetros otimizados resultaram em valores de RQME de 0,67; 1,22 e 0,88 °C para o período simulados nas profundidades 5, 15 e 30 cm, respectivamente. A adoção dos coeficientes b_1 , b_2 e b_3 da equação 20, otimizados na primeira e segunda camada de solo, somado a melhor simulação do θ decorrente da mudança dos parâmetros hidráulicos, reduziu o valor da RQME na simulação da Ts na profundidade de 5 cm quando comparada aos valores obtidos para as simulações com os parâmetros iniciais. Porém, aumentou a RQME nas simulações de Ts nas profundidades de 15 e 30 cm. Este resultado é atribuído à redução no valor do θ , simulado com os parâmetros otimizados, apresentando assim efeito sobre a condutividade térmica do solo e também sobre o calor específico deste solo, o que pode ter acarretado prejuízo na representação dos fluxos de calor e proporcionado maiores RQME. Cabe ressaltar ainda, que foram mantidos os valores dos coeficientes otimizados para a camada 2, pois em simulação mantendo os valores dos coeficientes citados por Chung e Horton (1987) na camada de 21 a 37 cm resultou em valores de RQME maiores que os obtidos com os coeficientes otimizados.

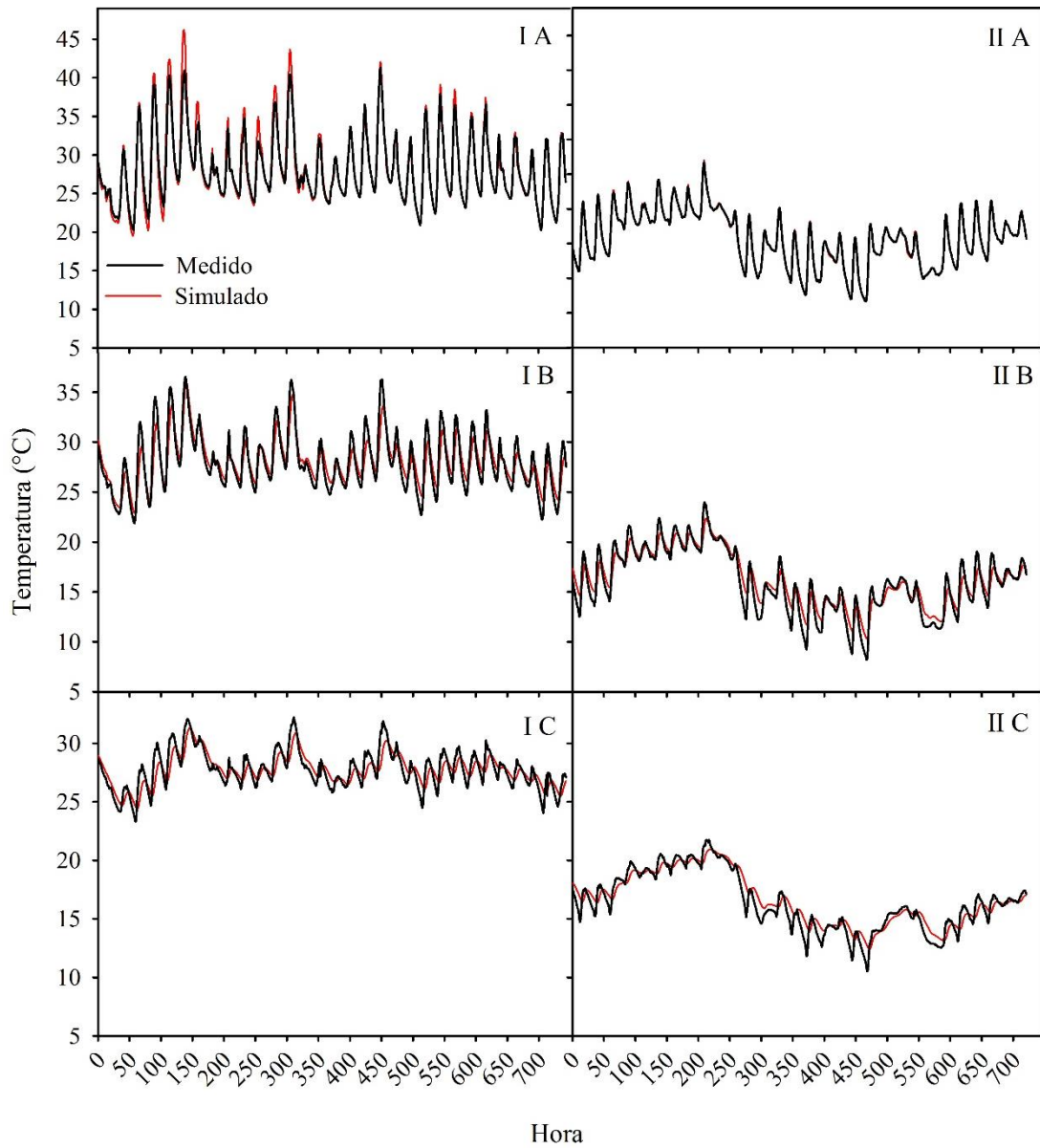
No mês de janeiro foi obtida a maior RQME (1,06 °C) na simulação da Ts a 5 cm. Na profundidade de 15 e 30 cm os maiores valores da RQME foram observados em fevereiro. As simulações da Ts nos meses de maio e junho resultaram em menores valores de RQME do

período avaliado para as três profundidades. Este fato pode estar associado a maior amplitude térmica observada na Ts que ocorre até o mês de abril, período final de verão até meados do outono, nestes meses é observado que os picos de temperaturas não são compensados durante a simulação (Figura 16) resultando em maiores valores de RQME. Trabalhos comparando valores simulados de θ com o modelo de Van Genuchten (1980) e de Ts com valores observados a campo classificam o desempenho das simulações como bom e satisfatório, com respectivos resultados de RQME entre 0,019 a 0,013 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ e 3,7 a 2,9 °C (DEB et al., 2011), 0,034 a 0,010 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ e 1,66 a 0,30 °C (DAHIYA et al., 2007); 0,028 a 0,013 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ e 6,24 a 2,7 °C (LU et al., 2013). Todos estes valores são superiores aos encontrados no presente trabalho, indicando assim que os resultados encontrados neste trabalho representam bem os fluxos de água para o meio em que foi calibrado.

As simulações acompanham as variações de temperatura nos solos. A Ts simulada foi próxima dos valores observados (Figura 16). A simulação da Ts para o mês de janeiro (Figura 16 I), quando os valores de RQME foram os mais elevados, possibilita a verificação que as maiores magnitudes de erro ocorrem durante os picos de temperatura máxima (Tmax) e mínima (Tmin) diária. Nos picos de temperatura diária, durante o mês de janeiro, ocorre superestimativa da Tmax e subestimativa da Tmin a 5 cm. Já nas simulações a 15 e 30 cm de profundidade (Figura 16 IB e 16 IC) ocorre o inverso nos picos de temperatura, sendo os valores subestimados na Tmax e superestimados na Tmin diárias. Estes mesmos resultados são observados para as profundidades de 15 e 30 cm de profundidade em grande parte da simulação de Ts do mês de junho (Figura 16 IIB e 16 IIC). Na simulação da Ts a 5 cm no mês de junho (Figura 16 IIA) os erros nos picos de Tmax e Tmin são amenizados, não sendo possível a visualização da predominância em superestimativa ou subestimativa por meio da análise visual.

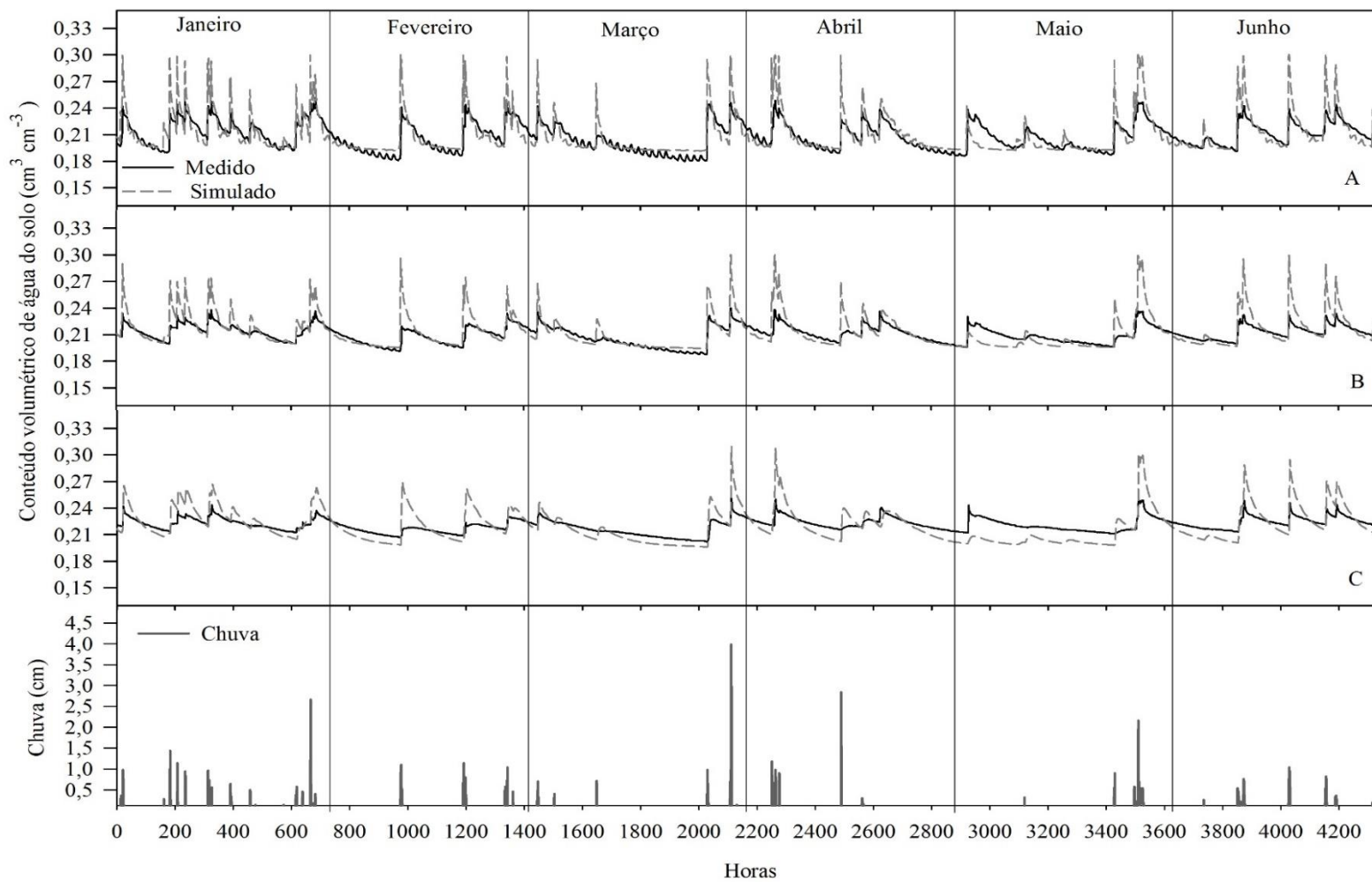
A simulação do θ no período de janeiro a junho concordam com valores observados para o mesmo período (Figura 17). Sem a presença de plantas, a saída de água do perfil fica limitada a drenagem profunda e a evaporação de água do solo. A textura do solo nestas camadas, com elevada quantidade de partículas da fração areia, favorece rápida drenagem de água, conseqüentemente rápida redução de água no solo após as chuvas, até atingir a θ na capacidade de campo. Estas reduções do θ podem ser observados tanto nos valores medidos como nos estimados nas três profundidades.

Figura 16- Temperatura do solo simulada e medida nas profundidades de 5 (A), 15 (B) e 30 (C) cm no mês de janeiro (I) e junho (II).



Fonte: O Autor.

Figura 17 – Conteúdo volumétrico de água do solo medido e simulado com parâmetros otimizados, no período de janeiro a junho a 5 (A), a 15 (B) e a 30 (C) cm de profundidade.

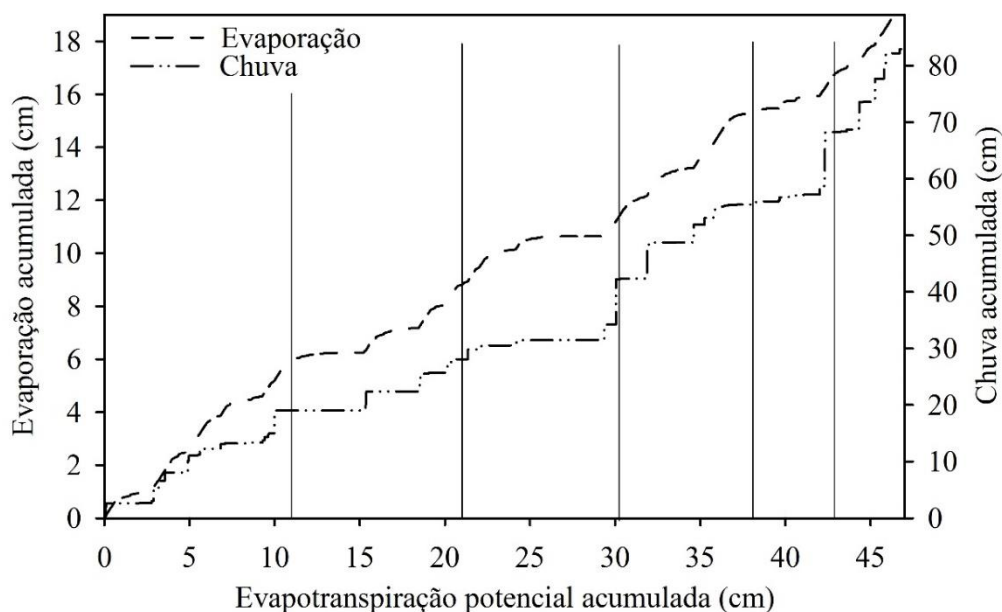


Fonte: O Autor.

A saída de água na superfície do solo ocorre por meio da evaporação, sendo que esta decresce com a redução do θ . Tendo em vista que a evaporação varia em função do θ , a mesma pode ser separada em duas fases, a primeira em que a evaporação é limitada pelas condições climáticas (que corre em solo com elevado θ) e a segunda, subsequente, em que a evaporação é limitada pela redistribuição de água do solo, sendo uma função da $K(\theta)$ (ocorrem a partir de um determinado valor de θ) (GARDNER e HILLEL, 1962; ALLEN et al., 1998). O valor do θ em que inicia a segunda fase de evaporação na simulação é obtido em função do Ψ_{crit} informado nas condições de contorno. Nas simulações do θ , observa-se uma rápida redução no θ nas primeiras horas após ocorrência de precipitação, e posteriormente ocorre menor redução no θ ao longo do tempo, indicando os efeitos das fases de evaporação da água do solo sobre a simulação do θ . Os valores de θ simulados foram semelhantes aos θ medidos indicando que o processo de simulação da evaporação na fase 2 também foi simulada coerentemente.

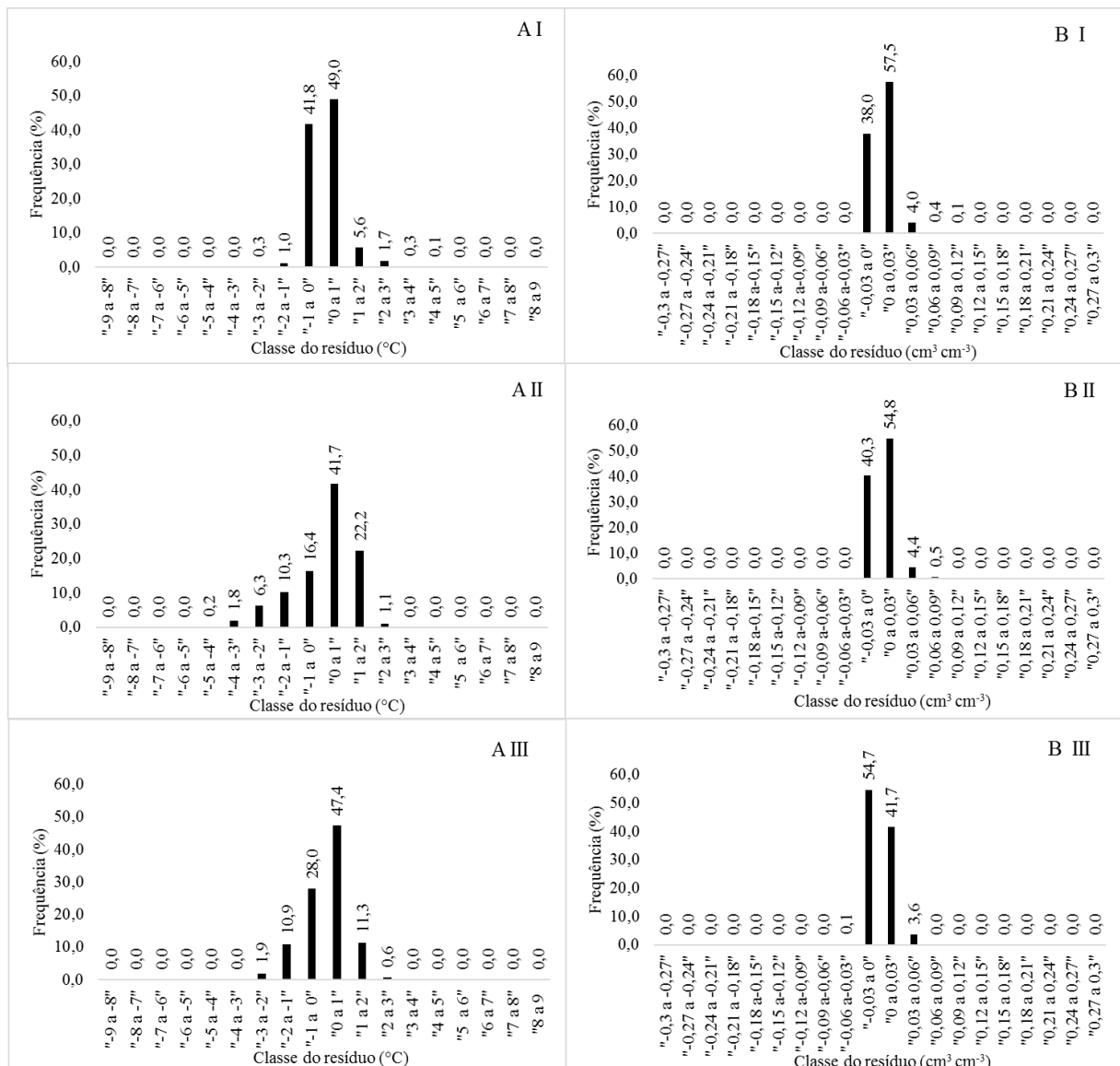
Para o período de janeiro a junho a lâmina de água precipitada acumulada foi 56% superior a lâmina de ETP estimada (Figura 18), enquanto que a lamina de água evaporada, resultante da simulação, correspondeu a 41% da ETP estimada para o mesmo período. Um incremento no valor de evaporação ocorre após as chuvas, indicando que a simulação compensou o valor de evaporação de água do solo nas fases 1 e 2 da evaporação em função do θ simulado.

Figura 18 - Evaporação e chuva acumuladas em relação a evapotranspiração potencial acumulada no período de janeiro a junho de 2015. Barras verticais representam a mudança de mês.



A relação existente entre a diferença dos valores simulados e os observados, de Ts e θ (Figura 16 e 17), pode ser melhor observada por meio da análise da frequência dos resíduos (Figura 19). São observados para as 3 profundidades a ocorrência de superestimativa dos valores simulados para a Ts, sendo a maior frequência dos resíduos contida entre 0 e 1 °C.

Figura 19 - Histograma dos resíduos entre a temperatura (A) e o conteúdo de água no solo (B), observadas e simuladas, a 5 (I), 15 (II) e 30 (III) cm de profundidade, utilizando os parâmetros otimizados.



Fonte: O Autor.

Na profundidade de 5 cm, ocorreu uma frequência de subestimativa de 43,1% na T_s , sendo que a maior parte ocorre na classe de -1 a 0 °C. Erros na magnitude menor que 1 °C positivo ou negativo ocorreram na maior parte da simulação nesta camada, concentrando 90,8% dos valores, que indicam uma boa representatividade da simulação, principalmente por conseguir uma boa representação da amplitude diária da temperatura que ocorre nas camadas próximas a superfície do solo.

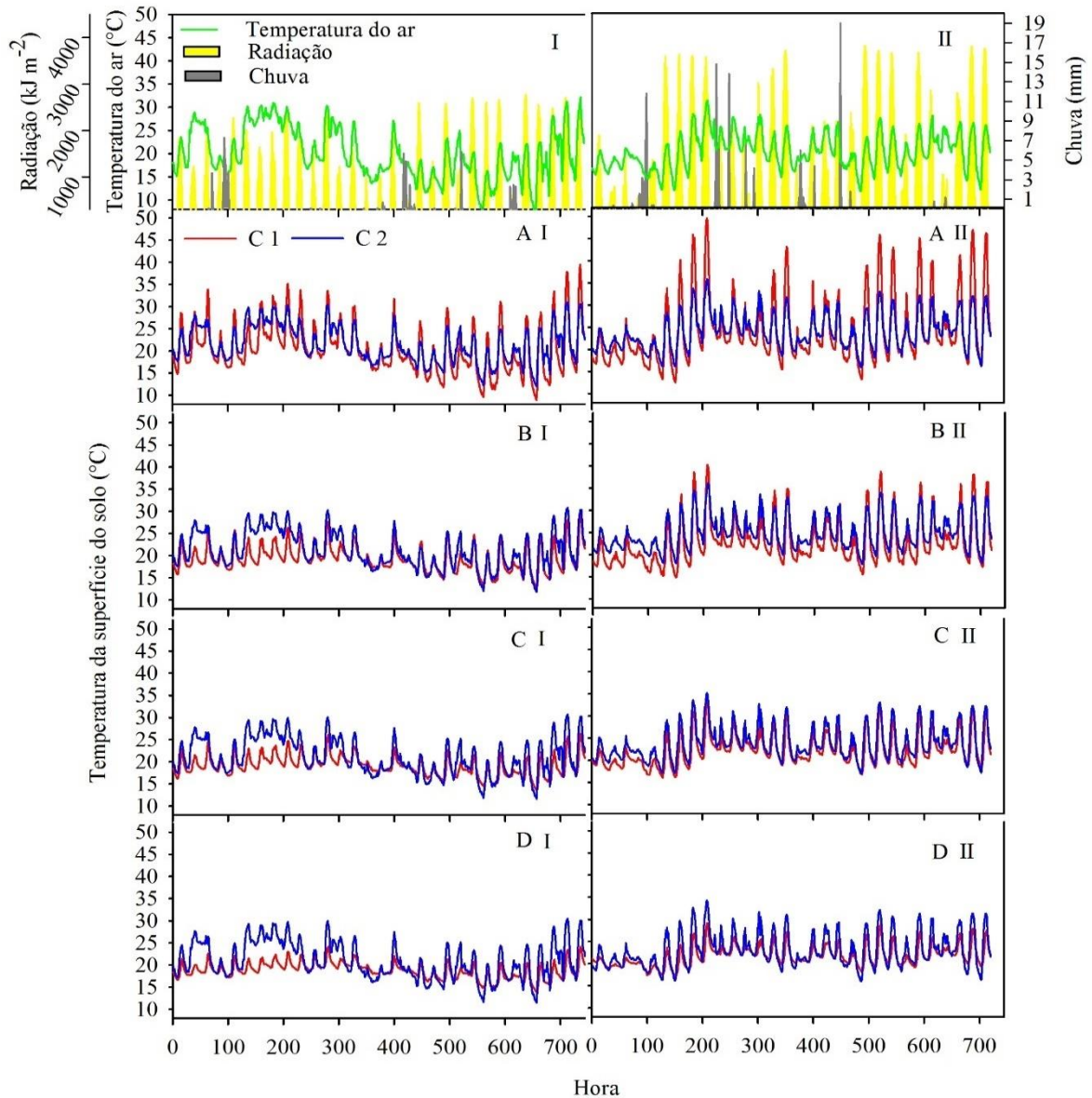
As simulações da T_s a 15 e 30 cm resultam resíduos em classes maiores, com erros entre -4 e -5 °C em 0,2% e de -3 a -2 °C em 1,9 % do período avaliado, respectivamente para cada profundidade. Este erro pode ser atribuído à amplitude da temperatura na superfície, e da solução com menor acurácia da equação de condutividade térmica, que consequentemente resulta em valores subestimados dos picos máximos. Apesar de ocorrerem erros de até 5 °C, a frequência destes é pequena, considerando que o período avaliado contemplou uma estação quente (verão), moderada (outono) e fria (inverno). Em superestimativa, as maiores classes de resíduo foram de 2 a 3 °C nas profundidades de 15 e 30 cm, em menos de 1% do período. Já na camada de 5 cm, erros entre 4 a 5 °C ocorre em 0,1% do período. Nesta profundidade, os erros que ocupam as classes maiores de ± 3 °C basicamente ocorrem durante os picos de temperatura máxima e mínima principalmente no período quente, no qual foram registradas amplitudes térmicas diárias de até 17,3 °C.

A simulação do θ do solo resultou em superestimativa nas profundidades de 5 e 15 cm, enquanto que o θ é subestimado na profundidade de 30 cm. Frequência superior a 90% de ocorrência de erros nas classes de -0,03 a 0 e de 0 a 0,03 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$. Na simulação do θ a 5 cm, uma frequência baixa (0,1%) de erros ocorre na classe 0,009 a 0,012 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, enquanto que nas simulações a 15 e 30, as classes mais elevadas de resíduos são 0,06 a 0,09 e 0,03 e 0,06 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, respectivamente. Apesar de baixas frequências de resíduos nas classes acima de 0,03 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, estes erros estão relacionados ao efeito de superestimativa do θ nos horários em que ocorre a entrada de água. Nestes momentos os valores simulados foram superiores aos medidos a campo.

5.4 SIMULAÇÃO DA TEMPERATURA DO SOLO COM DIFERENTES QUANTIDADES DE PALHA EM SUPERFÍCIE

A T_s e o θ foram simulados utilizando dados meteorológicos dos meses de agosto e novembro. O índice pluviométrico do mês de agosto (94 mm) foi menor que o do mês de novembro (179 mm) (Figura 20).

Figura 20 - Radiação, temperatura do ar, chuva, temperatura da superfície do solo medidas (C1) e estimadas com a equação geral (C2) para as condições de 0 (A), 3 (B), 6 (C) e 9 (D) Mg ha⁻¹ de palha nos meses de agosto (I) e novembro (II).



O período de precipitação desta lâmina no mês de novembro foi 26 horas superior ao período de chuva no mês de agosto. A ocorrência desta maior lâmina precipitada é explicada pelo fenômeno *El Niño*. No mês de novembro as precipitações na região central do estado do RS ficaram acima do padrão climatológico do mês (INMET, 2015a), enquanto que as precipitações para o mês de agosto permaneceram dentro do padrão climatológico do mês (INMET 2015b).

A Tar média no mês de agosto (20,26 °C) foi superior a Tar média no mês de novembro (20,0 °C). Mesmo com maior Rad no mês de novembro, esta não se converteu em calor sensível, conseqüentemente não provocou o aumento da Tar (Figura 20I e 20II) e isso provavelmente se deve aos maiores volumes de precipitação que ocorreram no período. Quando da presença de água na superfície, grande parte da Rad líquida é destinada para os processos de calor latente (evaporação de água) e conseqüentemente reduz o potencial de aquecimento do ar. Por exemplo, na região centro-oeste do Brasil, o fluxo de calor sensível aumenta, enquanto que o fluxo de calor latente diminui durante a estação seca, entretanto na estação chuvosa os fluxos se invertem (NEVES et al., 2013). Outro elemento meteorológico que pode explicar a menor Tar no mês de novembro em relação a agosto é a UR. A UR no mês de novembro foi superior a de agosto, provocando aumento no calor específico da massa de ar, isso resulta na necessidade de maior quantidade de energia para alterar sua temperatura.

As Tsup estimadas (Figura 20) são dependentes da Tar e Rad, conforme discussão no item 5.2. Nos dias 6 a 9 de agosto (144 às 216 horas), a Tar permaneceu entre os 25 e 30 °C, provavelmente devido à entrada de uma massa de ar quente, que conseqüentemente resultou em erros na estimativa da Tsup deste período (Figura 20). Este erro pode ser melhor evidenciado na estimativa da Tsup do solo coberto (Figura 20 BI, CI, DI). No mês de novembro, são observadas maiores amplitudes na Tsup, resultando em subestimativa da Tsup máxima em solo descoberto e com 3 Mg ha⁻¹ de palha (Figura 20 AII e 20 BII).

As condições de contorno usadas (C1 e C2) não modificaram o desempenho da simulação do θ avaliadas por meio da RQME (Tabela 9), sendo que dentro de cada quantidade de palha foram obtidos valores iguais de RQME em ambas condições de contorno. Isto indica que o desempenho da simulação da Ts está sendo influenciada somente pela variação da condição de contorno pois os valores de θ simulados em C1 e C2 foram idênticos (Apêndices D e E).

Tabela 9 - Raiz quadrada média do erro obtida nas simulações do conteúdo de água e temperatura do solo utilizando como condição de contorno a temperatura da superfície medida (C1) e a temperatura da superfície estimada (C2).

Palha Mg,ha ⁻¹	C1			C2			C1			C2		
	Agosto						Novembro					
	Profundidade (cm)											
	5	15	30	5	15	30	5	15	30	5	15	30
	Conteúdo volumétrico de água do solo (cm ³ cm ⁻³)											
0	0,013	0,011	0,010	0,013	0,011	0,010	0,014	0,015	0,015	0,014	0,015	0,016
3	0,015	0,012	0,010	0,015	0,012	0,010	0,017	0,016	0,017	0,017	0,016	0,017
6	0,014	0,012	0,008	0,014	0,012	0,008	0,014	0,017	0,016	0,014	0,017	0,016
9	0,020	0,010	0,008	0,020	0,010	0,008	0,030	0,011	0,011	0,030	0,011	0,011
	Temperatura do solo (°C)											
0	0,35	1,10	0,79	2,00	1,54	0,82	0,67	1,52	1,06	2,19	2,31	1,27
3	0,30	0,80	0,63	2,56	1,60	0,84	0,65	1,01	0,87	2,28	1,70	1,04
6	0,30	0,59	0,56	2,75	1,60	0,83	0,36	0,94	0,80	1,69	1,22	0,87
9	0,23	0,57	0,51	2,80	1,60	0,81	0,39	0,85	0,69	1,50	0,90	0,72

Fonte: O Autor.

A Ts simulada no C1 teve melhor desempenho no mês de agosto em comparação a novembro em todas as profundidades (Tabela 9). Este resultado pode estar associado a amplitude térmica da Ts observada que foi menor no mês de agosto. As menores amplitudes térmicas são resultado do ângulo de incidência da radiação solar. No C1, a presença e incremento na Qrv melhorou o desempenho das simulações, resultado esse evidenciado pela redução nos valores da RQME em todas as profundidades. Isso também é resultado da menor amplitude térmica do solo, que foi proporcionada pela cobertura do solo. A palha em cobertura atua principalmente na redução dos picos de temperatura máxima (SILVA et al., 2006), além de reduzir a evaporação de água do solo (PERES et al., 2010) e isto proporciona aumento no calor específico, reduzindo assim as variações de temperatura.

A RQME foi menor nas simulações da Ts no C2 para solos com palha no mês de novembro, apesar da maior amplitude térmica deste mês (Tabela 9). Isso ocorreu porque a Tsup foi estimada com menor acurácia no mês de agosto em relação ao mês de novembro. Está menor acurácia é evidenciada facilmente no período de 6 a 9 de agosto (144 às 216 horas deste mês) momentos em que ocorreram erros até 7,9; 7,6 e 8,5 °C em relação ao valor de Tsup medido para solos com 3, 6 e 9 Mg ha⁻¹, respectivamente.

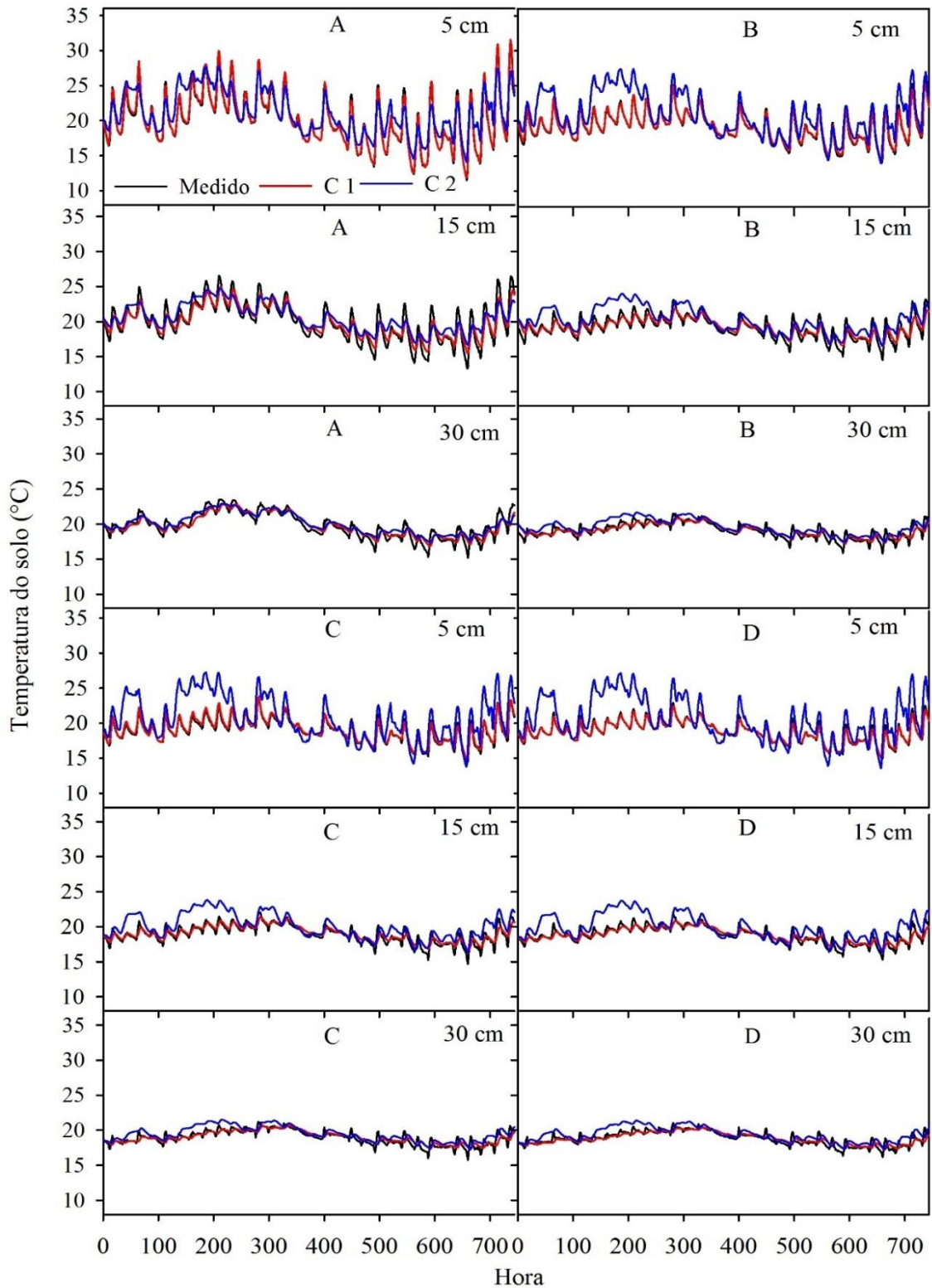
A RQME variou de 0,23 a 1,52 °C no S1 e de 0,8 a 2,8 °C no C2. A tolerância dos erros é dependente da finalidade da simulação. Assim, erros entre 2 e 3 °C são aceitáveis em se

tratando de simulações de Ts, sendo estes erros em muitos casos menores do que a variabilidade espacial na Ts causado pela irrigação ou pelo vento (TIMLIN et al., 2002). Os valores de RQME em simulações de Ts reportados na literatura usando Hydrus e indicando como bom o desempenho na simulação da Ts estão entre 0,5 e 2,2 °C (BANIMAHD e ZAND - PARSA, 2013), 0,94 e 1,06 °C (DEB, et al., 2011a), 2,9 e 4,4 °C (DEB et al., 2011b) e 1,7 e 3,1 °C (DEB et al., 2013), sendo alguns destes superiores aos encontrados no presente trabalho, indicando que as Ts simuladas em C1 e C2 concordam com valores medidos a campo.

Nas profundidades de 5 cm e 30 cm e para ambos os meses, a Ts simulada em C1 ficou próxima da Ts medida (Figura 21 e Figura 22). Porém na profundidade de 15 cm, os valores simulados se afastam dos valores medidos, que acabam causando o incremento no valor da RQME para esta profundidade. Este resultado pode estar associado à proximidade do limite da primeira para a segunda camada de solo que ocorre a 21 cm de profundidade.

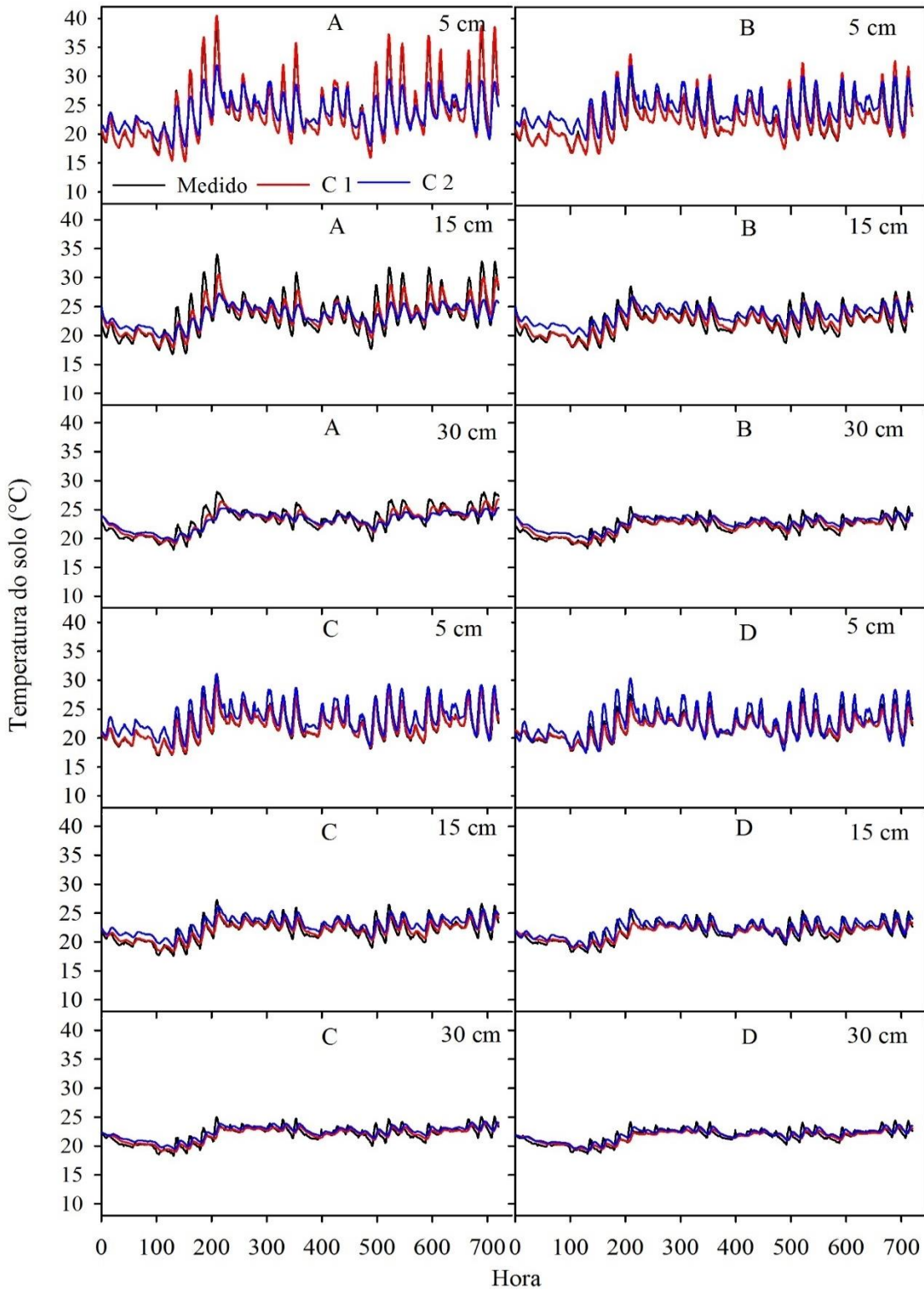
Na profundidade de 5 cm, a Ts máxima no mês de agosto foi de 30,5 °C e a Ts mínima foi de 11,5 °C foram medidas no solo descoberto. No solo com essa condição também foi observada a maior amplitude térmica (14 °C) no dia 30 de agosto. No mês de novembro a Ts máxima foi de 38 °C, a Ts mínima foi de 15,44 °C e a amplitude térmica máxima de 17,16 °C dia 22, todas em solo descoberto. As amplitudes térmicas a 5 cm de profundidade foram bem representadas pela simulação da Ts no S1, tanto no mês de agosto (Figura 21) como no mês de novembro (Figura 22), demonstrando que a simulação da Ts com o Hydrus-1D concordam com os valores medidos.

Figura 21 - Temperatura do solo medidas e simuladas em C1 e C2 nas profundidade a 5, 15 e 30 cm, para condição de solo descoberto (A), 3 (B), 6 (C) e 9 (D) Mg ha⁻¹ de palha em cobertura mês de agosto.



Fonte: O Autor.

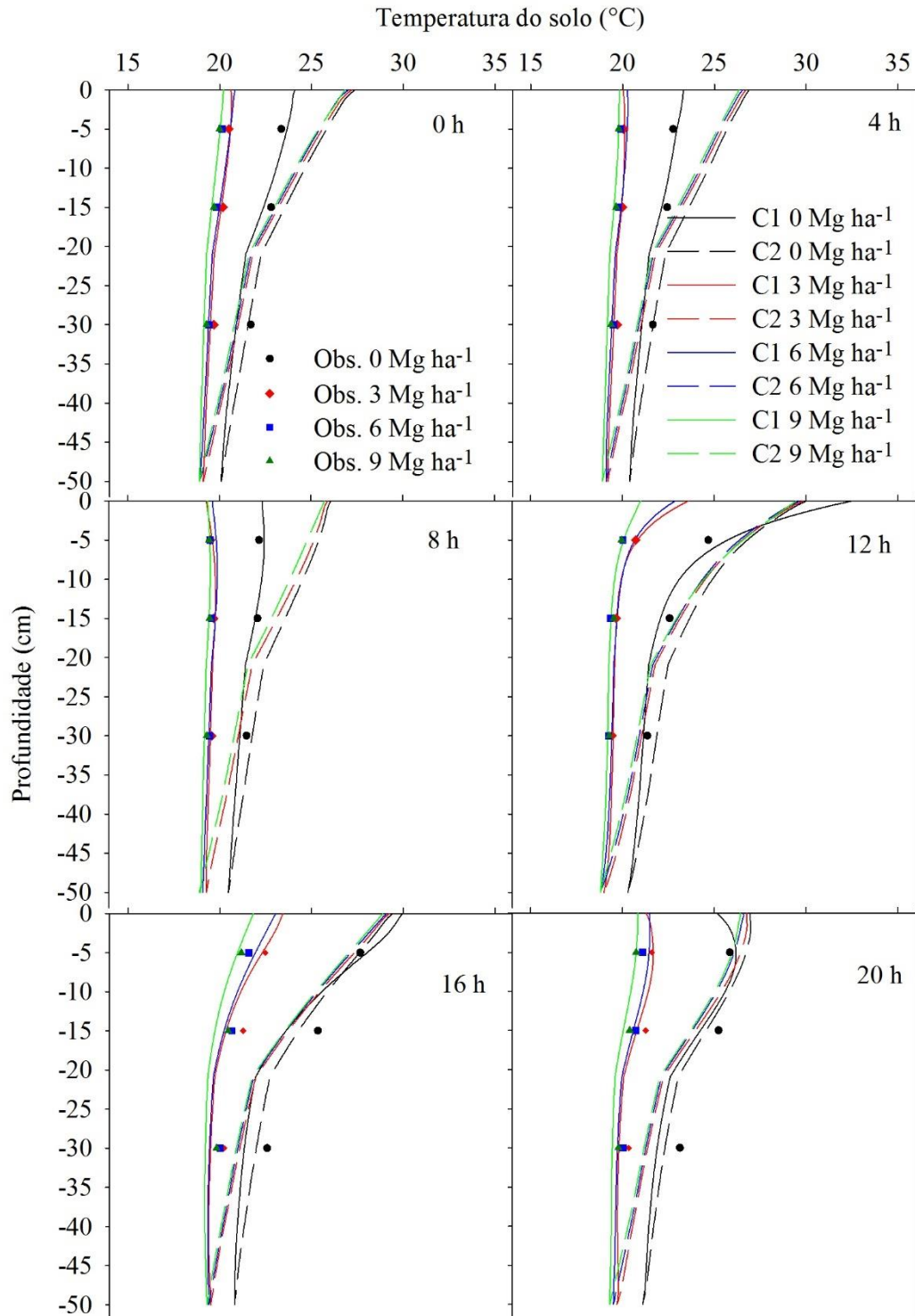
Figura 22 - Temperatura do solo medidas e simuladas em C1 e C2 nas profundidades de 5, 15 e 30 cm, para condição de solo descoberto (A), 3 (B), 6 (C) e 9 (D) Mg ha⁻¹ de palha em cobertura mês de novembro.



No período de 6 a 9 de agosto, correspondente das 144 às 216 horas de simulação, a simulação em C2 resultou em Ts superiores às Ts medidas. Em profundidade, o erro foi mais acentuado nas simulações da Ts do solo coberto (Figura 21B, 21C e 21D). Com o incremento em profundidade, o erro é reduzido em decorrência do amortecimento da onda de propagação do calor. As simulações em C2 até o dia 4 de novembro resultaram em superestimativa da Ts para todos os tratamentos (Figura 22), já para o solo descoberto, no mês de novembro ocorreu erros em subestimativa dos valores de Ts máxima diária e superestimativa dos valores de Ts mínima diária para as 3 profundidades simuladas. As simulações para solo coberto com 6 e 9 Mg ha⁻¹ de palha resultaram em superestimativa da Ts máxima diária.

A simulação da Ts no perfil do mês de agosto pode ser melhor analisada por meio das tautócronas das temperaturas do solo às 0, 4, 8, 12, 16 e 20 horas do dia 8 (Figura 23). A Ts do solo descoberto durante o dia 8 permaneceu superior a 20 °C, enquanto que as Ts do solo com cobertura foram menores. Efeito este evidenciado e detalhado no estudo descrito em 5.1. Nesta situação, ao longo do dia, em todas as profundidades, valores de Ts mais elevadas foram observadas nos tratamentos com 0 Mg ha⁻¹ de palha, sendo seguido pelos tratamentos com 3, 6 e 9 Mg ha⁻¹, corroborando resultados da literatura que indicam que o incremento na quantidade de palha proporciona redução nas temperaturas média diária do solo (SILVA et al., 2006; KNIES, 2010; ALMEIDA, 2011).

Figura 23 - Tautócronas da temperatura do solo simuladas com temperatura da superfície medidas (C1) e temperatura da superfície estimadas (C2) às 0, 4, 8, 12, 16 e 20 horas do dia 8 de agosto.



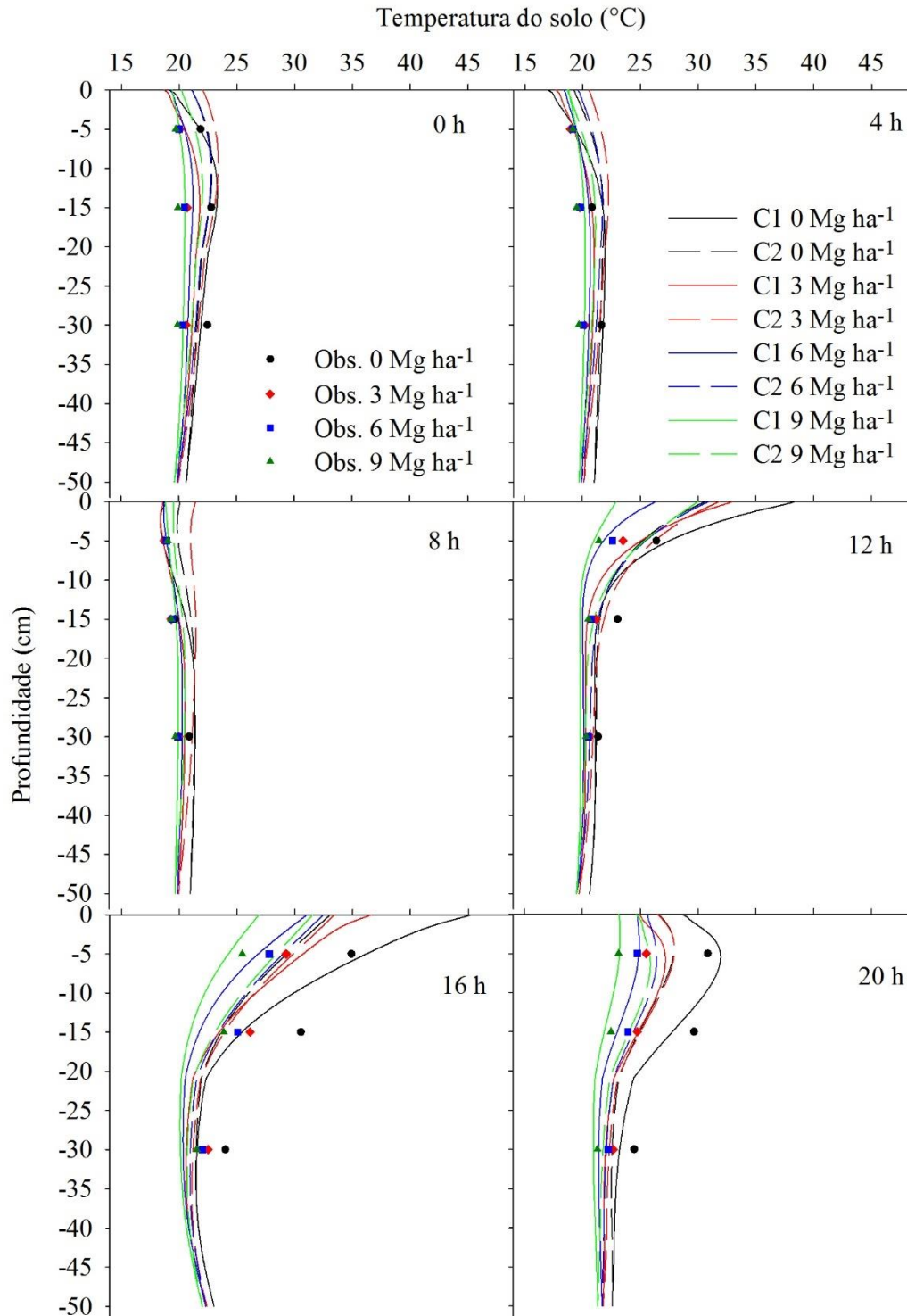
As simulações da T_s no C1 ficaram muito próximas dos valores observados nas profundidades de 5, 15 e 30 cm (Figura 23). Ainda, é importante destacar que a amplitude térmica do solo a 5 cm de profundidade foi de 3,8, 2,8 e 2,4 °C nos tratamentos com 3, 6 e 9 Mg ha⁻¹ de palha em cobertura, respectivamente, enquanto que no solo descoberto a amplitude térmica foi de 6 °C. As simulações no C1 foram eficientes na representação da variação da temperatura ao longo do dia, representando um acréscimo de temperatura das 8 às 16 horas com consequente redução da T_s nos demais períodos. A simulação descreveu o fluxo de calor no perfil, representando as maiores variações de temperaturas ao longo do dia, que ocorreram nos primeiros 20 cm de profundidade. As simulações em C2 no dia 8 de agosto resultaram em superestimativa dos valores de T_s . Esse erro é resultado direto da superestimativa da T_{sup} pela equação geral, o que indica a importância do estabelecimento da acurácia desejada na simulação para a escolha da T_{sup} utilizada na condição de contorno.

As tautócronas de T_s simuladas no dia 8 de novembro representaram com eficiência os fluxos de calor no solo, tanto para a condição C1 como para C2 (Figura 24). Durante a madrugada deste dia a T_{sup} sem palha atingiu valores abaixo dos 20°C, valor inferior ao da T_{inv} indicada no estudo 1 (item 5.1). Sendo assim os solos com cobertura apresentaram temperatura superior ao solo descoberto. Isto pode ser observado nos valores medidos e também nas tautócronas de T_s das 4 e 8 horas (Figura 24).

As tautócronas da T_s das 8 h indicam o início do processo de aquecimento do solo e aumento na T_s em profundidade. As tautócronas de T_s das 12 h indicam o rápido aquecimento da superfície do solo descoberto, evidenciado pelo maior aquecimento das camadas superficiais do solo. Às 16 h foi registrado a maior T_s em solo descoberto, com T_{sup} medida de 45 °C e menor T_{sup} (27 °C) no solo com 9 Mg ha⁻¹ de palha. Neste horário as simulações subestimaram os valores de T_s na profundidade de 15 e 30 cm de todos os tratamentos, tanto no C1 quanto no C2. Nas simulações a 5 cm, as simulações no C1 apresentaram valores mais próximas das T_s medida que a T_s simulada em C2. Nas tautócronas deste horário pode-se analisar o efeito da equação 24 na estimativa da T_{sup} e seu efeito sobre as simulações.

Os erros discutidos em 5.2 em razão das horas são expressos na Figura 24. A T_{sup} estimada não acompanhou o pico de máxima da T_{sup} diária, consequentemente as simulações implicam em maiores erros da T_s em profundidade.

Figura 24 - Tautócronas das temperaturas do solo simuladas com temperaturas da superfície medidas (C1) e temperaturas da superfície estimadas (C2) às 0, 4, 8, 12, 16 e 20 horas do dia 8 de novembro.



As tautócronas de T_s das 20 h representam o processo de resfriamento da superfície do solo, e conseqüentemente ascensão do fluxo de calor do solo. Um rápido decréscimo da T_s é observado nas simulações em C1 para o solo descoberto.

As tautócronas de T_s simuladas no C2 para o dia 8 de novembro também representaram claramente os fluxos de calor na maioria dos horários. No entanto, nas simulações para as 16 h os valores de T_s foram subestimados, em função da subestimativa da T_{sup} pela equação 22. Reportando novamente que a adoção da equação deve levar em consideração a acurácia que se busca nas simulações.

6 CONCLUSÕES

A partir dos estudos realizados sobre a dinâmica e simulações da temperatura e conteúdo de água em solos com diferentes quantidades de palha em cobertura conclui-se que:

(i) A presença da cobertura de palha mantém o solo mais aquecido que o solo sem palha no início do dia, mas impede que ele se aqueça igual ao solo sem palha no restante do dia. Em relação à T_s descoberto, a percepção relativa é que a palha aquece e resfria o solo, respectivamente antes e depois que o solo descoberto atinge uma dada temperatura, que foi definida como temperatura de inversão do efeito da palha. A temperatura de inversão decresceu em profundidade, sendo que, em uma mesma profundidade, a temperatura de inversão não foi alterada pela quantidade de palha em superfície. Em relação ao solo nu, o aquecimento ou resfriamento do solo, respectivamente antes e após à temperatura de inversão, ocorreu até a profundidade de 50 cm, e foram mais intensos quanto maior a quantidade de palha em cobertura.

(ii) A temperatura da superfície do solo com diferentes quantidades de cobertura com palha de aveia preta pode ser obtida com o uso da equação senoidal, assim como também pode ser estimada em função da temperatura do ar e radiação solar incidente. A temperatura da superfície do solo coberto com palha é estimada adequadamente com o uso da equação senoidal, utilizando os valores de temperatura média e amplitude observadas, e com a equação específica. A equação específica para solos descobertos resultou em maior acurácia na estimativa da temperatura da superfície do solo. O uso das equações geral e específicas são uma alternativa para obtenção de temperatura da superfície do solo. Porém a escolha da equação a ser utilizada depende da acurácia desejada. As equações específicas estimam melhor a temperatura da superfície em solos com 0 e 9 Mg ha⁻¹. O uso da equação geral estima melhor a temperatura da superfície do solo com 3 e 6 Mg ha⁻¹ de resíduos vegetais, tendo como vantagem a possibilidade de variação na quantidade de resíduos vegetais em cobertura até 9 Mg ha⁻¹.

(iii) As simulações do conteúdo de água e temperatura do solo com o uso do Hydrus-1D, em um Argissolo Vermelho, utilizando os valores dos parâmetros mensuradas diretamente nas amostras de solo, resultaram em desempenho ruim na simulação do conteúdo de água do solo. A otimização dos parâmetros por meio da solução inversa proporciona melhor desempenho das simulações do conteúdo de água e temperatura do solo com o Hydrus-1D.

(iv) O modelo Hydrus-1D, parametrizado com os valores otimizados, obteve um desempenho satisfatório na simulação da temperatura do solo de resíduos vegetais em cobertura. Dessa forma, mostra-se como uma ferramenta útil para uso em estudos e análises

técnicas sobre temperatura no solo com diferentes quantidades de palha em cobertura. O uso da temperatura da superfície do solo medida proporcionou melhores simulações da T_s . O uso das equações de estimativa da temperatura da superfície do solo reduz a acurácia das simulações de T_s , causando maiores erros de simulação com o Hydrus-1D.

Sendo assim, a presença de palha em cobertura influencia a temperatura do solo, que pode ser simulada por meio do Hydrus-1D. Os efeitos das diferentes quantidades de palha na superfície do solo podem ser considerados por meio de medidas da temperatura da superfície do solo e abaixo da camada de palha ou por meio de equações de estimativa da temperatura da superfície do solo em função da temperatura do ar e radiação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R. G. et al. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO56 Penman-Monteith method. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.81, n.1, p.1-22, 2006.
- ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. FAO Irrigation and Drainage Paper N. 56. Roma, 1998.
- ALMEIDA, R. E. **Evaporação e temperatura em solos mantidos com diferentes quantidades de resíduos em superfície**. 2011. 116p. Tese (doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS-2011.
- ANDRADE, C. A.; OLIVEIRA, C.; CERRI, C.C. Cinética de degradação da matéria orgânica de biossólidos após aplicação no solo e relação com a composição química inicial. **Bragantia**, Campinas, v. 65, n. 4, p. 659-668, Dec., 2006.
- AZEVEDO, T. R. de; GALVANI, E. Ajuste do ciclo médio mensal horário da temperatura do solo em função da temperatura do ar, **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 11, n. 2, p. 123-130, 2003.
- BANIMAH, S. A.; ZAND-PARSA, S. Simulation of evaporation, coupled liquid water, water vapor and heat transport through the soil medium. **Agricultural Water Management**, v. 130, p. 168–177, 2013.
- BELTRAMI, H. On the relationship between ground temperature histories and meteorological records: a report on the Pomquet station. **Global and Planetary Change**, v.29, n. 3–4, p.327–348, 2001.
- BERGAMASCHI, H.; GUADAGNIN, M. R. Modelos de ajuste para médias de temperatura do solo, em diferentes profundidades, **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.1, n.1, p.95-99, 1993.
- BIASSUSSI, M. **Simulação do movimento da água no solo utilizando modelo numérico**, 2001, 84f. Tese (Doutorado em ciência do solo) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto alegre. 2001.
- 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.
- CARLESSO, R. & ZIMMERMANN, L.F. **Água no solo: parâmetros para dimensionamento de sistemas de irrigação**. Santa Maria, Imprensa Universitária, 2000. 88p.
- CARNEIRO, R. G. et al. Variabilidade da temperatura do solo em função da liteira em fragmento remanescente de mata atlântica, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.18, n.1, p.99-108, Jan, 2014.

CHUNG S. O.; HORTON, R. Soil heat and water flow with a partial surface mulch, **Water Resources Research**, Washington, v.23, n.12, p.2175-2186, dec. 1987.

COELHO, M. E. H, et al. Coberturas do solo sobre a amplitude térmica e a produtividade de pimentão. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 31, n. 2, p. 369-378, Jun. 2013.

DABACH, S. et al. Numerical investigation of irrigation scheduling based on soil water status, **Irrigation Science**, v.31, p.27–36, 2013

DAHIYA, R.; INGWERSEN, J.; STRECK, T. The effect of mulching and tillage on the water and temperature regimes of a loess soil: experimental findings and modeling. **Soil and Tillage Research**, v. 96, n. 1–2, p. 52–63, out. 2007.

DALMAGO, G. A. et al. Evaporação da água na superfície do solo em sistemas de semeadura direta e convencional de milho. In: **XIII Congresso brasileiro de agrometeorologia, 2003**, Santa Maria. Anais... Santa Maria: SBA./UFMS/UNIFRA, 2003. V.1. p. 295-296. CD-ROM.

DALMAGO, G.A. et al. Soil temperature in maize crops as function of soil tillage systems. In: **ISCO 2004 - International soil conservation organization conference, 23.**, Brisbane, 2004. Resumos expandidos. Brisbane, ISCO, 2004. 4p.

DAVIDSON, E. A.; JANSSENS, I. A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change, **Nature**, v. 440, n.7081, p. 165–173, 2006.

DE VRIES, D.A. Thermal properties of soils. In: VAN WIJK, W.R. (Ed.) **Physics of plant environment**. Amsterdam: North Holland Publ., 1963. cap.7, p.210-235.

DEB, S. K. et al. Evaluation of spatial and temporal root water uptake patterns of a flood-irrigated pecan tree using the HYDRUS (2D/3D) Model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.139, n.8, p.599–611, 2013.

DEB, S. K.; et al., Coupled liquid water, water vapor, and heat transport simulations in an unsaturated zone of a sandy loam field. **Soil Science**, v. 176, n. 8, p. 387–398, 2011. b

DEB, S. K.; SHUKLA, M. K.; MEXAL, J. G. Numerical modeling of water fluxes in the root zone of a mature pecan orchard. **Soil Science Society of America Journal**, v.75, n. 5, p. 1667, 2011. a

DERPSCH, R. et al. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v.3, n.1, p. 1-21, 2010.

DERPSCH, R.; SIDIRAS, N.; HEINZMANN, F. X. Manejo do solo com coberturas verde de inverno. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 20, n. 7, p. 761 – 773, 1985.

DONG, Y.; MCCARTNEY, J. S.; LU, N. Critical review of thermal conductivity models for unsaturated soils. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 33, n. 2, p. 207–221, 2015.

DOURADO, E. R. G. **Simulação do transporte bidimensional de urânio em solo típico da região de Caetité-BA**, 2014, 107 p., Dissertação (Mestrado em Energia Nuclear), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2014.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Manual de métodos de análises de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230p.

FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTIO DIRETO NA PALHA (Febrapdp). **Evolução da área de plantio direto no Brasil**. 2012. Disponível em: <http://febrapdp.org.br/download/PD_Brasil_2013.I.pdf> Acesso em: 23 dez. 2016.

FURLANI, C. E. A. et al. Temperatura do solo em função do preparo do solo e do manejo da cobertura de inverno. **Revista Brasileira de Ciência dos Solos**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 375-380, Jan/Feb. 2008

GALVANI, E.; ESCOBEDO, J. F.; PEREIRA, A. B. Balanço de radiação e fluxo calor no solo em ambiente natural e protegido cultivado com pepineiro, **Bragantia**, Campinas, v.60, p.139-147, 2001.

GARDNER, W.R.; HILLEL, D.I. The relation of external evaporative conditions to the drying of soils, **Journal of geophysical research**, v. 67, n.11, p. 4319-4325, oct 1962

GASPARIM, E. et al. Temperatura no perfil do solo utilizando duas densidades de cobertura e solo nu, **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v.27, n.1, p.107-115, jan./mar, 2005.

GONÇALVES, M. C. et al., Multicomponent solute transport in soil lysimeters irrigated with waters of different quality. **Water Resources Research**, Washington, v. 42, W08401, 2006.

GONZÁLEZ, M. G. et al. Modelling soil water dynamics of full and deficit drip irrigated maize cultivated under a rain shelter. **Biosystems Engineering**, v.132, p.1-18, 2015.

GUBIANI, P. I. **Tempo para a ocorrência da resistência à penetração restritiva ao feijoeiro em solo com diferentes estados de compactação**, 2008. 108p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS-2008.

HANSSON, K. et al. Water flow and heat transport in frozen soil: numerical solution and freeze– thaw applications, **Vadose Zone Journal**, Michigan, v.3, 693–704, May. 2004.

HILLEL, D. Environmental soil physics. San Diego: Academic Press, 1998. 771p.

HU, G. et al. An analytical model for estimating soil temperature profiles on the Qinghai-Tibet Plateau of China. **Journal of Arid Land**, v.8, n.2, p.232–240, 2016.

INMET (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA). **BOLETIM CLIMÁTICO (2015)– Prognóstico JANEIRO – FEVEREIRO - MARÇO (2016)**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/portal_antigo/clima/prog_clima_rs/pdf/bol_dez2015.pdf> acesso em 26/12/2016.

INMET (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA). BOLETIM CLIMÁTICO (2015)– **Prognóstico OUTUBRO – NOVEMBRO - DEZEMBRO (2015)**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/portal_antigo/clima/prog_clima_rs/pdf/bol_set2015.pdf> acesso em 26/12/2016.

JANKOSZ, A. V. **Avaliação do modelo matemático Hydrus 1-D para lixiviação de nitrato em colunas com solos do Paraná**, 2008. 89f. Dissertação (Mestrado em Solos) Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2008.

JONG VAN LIER, Q.; WENDROTH, O.; VAN DAM, J. C. Prediction of winter wheat yield with the SWAP model using pedotransfer functions: An evaluation of sensitivity, parameterization and prediction accuracy. **Agricultural Water Management**, v. 154, p. 29–42, 2015.

KAISER, D. R. **Estrutura e água em argissolo sob distintos preparos na cultura do milho**, 2010. 150p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2010.

KANG, S. et al. Predicting spatial and temporal patterns of soil temperature based on topography, surface cover and air temperature. **Forest Ecology and Management**, v. 136, n. 1–3, p. 173–184, 2000.

KLEIN, V. A. et al. Textura do solo e a estimativa do teor de água no ponto de murcha permanente com psicrômetro, **Ciência Rural**, Santa Maria, v.40 n.7, p.1550-1556, Jul. 2010.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: BLACK, C.A., ed. **Methods of Soil Analysis. I. Physical and mineralogical methods**. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. p. 635-662.

KNIES A. E. **Temperatura e umidade de um solo franco arenoso cultivado com milho**. 2010. 104p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria - Santa Maria, 2010.

KRČMÁŘOVÁ J. et al. Specifics of soil temperature under winter wheat canopy. **Contributions to Geophysics and Geodesy**, v.43, n.13, p.209–223, 2013.

LEHNERT, M. Factors affecting soil temperature as limits of spatial interpretation and simulation of soil temperature. **Acta Universitatis Palackianae Olomucensis – Geographica**, v.45, n.1, p.5–21, 2014.

LEHNERT, M. The soil temperature regime in the urban and suburban landscapes of olomouc, czech republic. **Moravian Geographical Reports**, v.21, n.3, p.27–36, 2013.

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

LIU C.M., ZHANG X.Y., ZHANG Y.Q. Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat and maize by large-scale weighing lysimeter and microlysimeter. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.111, p.109-120, 2002.

- LIU, Y. et al. Straw mulching reduces the harmful effects of extreme hydrological and temperature conditions in citrus orchards. **PLoS ONE**, v.9, n.1, p.e87094, 2014
- LU, H. et al. Effect of gravel-sand mulch on soil water and temperature in the semiarid loess region of northwest china, **Journal of Hydrologic Engineering**, v.8, p.1484-1494, 2013.
- LUO, Y.; LOOMIS, R. S.; HSIAO, T. C. Simulation of soil temperature in crops, **Agricultural and Forest Meteorology**, v.61, n.1-2, p.23–38, 1992.
- MALLMANN, F. J. K. et al. Soil tillage to reduce surface metal contamination – model development and simulations of zinc and copper concentration profiles in a pig slurry-amended soil, Agriculture, **Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v.196, p.59-68, Oct. 2014.
- MALLMANN, F.J.K. et al. Modeling field-scale vertical movement of zinc and copper in a pig slurry-amended soil in Brazil. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v.243, p. 223–231, Dec. 2012
- MANNICH, M.; GUETTER, A. K. Erros numéricos da equação de richards utilizando o método dos volumes finitos, **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.16 n.4 - p.109-118, Out/Dez, 2011 a.
- MANNICH, M.; GUETTER, A. K. Solução analítica da equação de richards, **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.16, n.1, p.47-54, Jan/Mar. 2011b.
- MELO, T.M.; LOUZADA, J.A. Aplicação e avaliação dos modelos Swap e Hydrus 1D em diferentes cenários agrícolas, **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.6, n.4, p.261 - 270, 2012.
- MIHALAKAKOU, G. et al. On the application of the energy balance equation to predict ground temperature profiles. **Solar Energy**, v.60, n.3–4, p.181–190, 1997.
- MIHALAKAKOU, G. On estimating soil surface temperature profiles. **Energy and Buildings**, v.34, n.3, p.251–259, 2002.
- MINELLA, J. P. G. et al. Simulação do fluxo de água em coluna de areia com o Hydrus-2D. In: **XVIII Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água**, 2010, Teresina. Novos caminhos para a agricultura conservacionista no Brasil, 2010.
- MIYASAKA, S. et al. Efeitos da cobertura e da incorporação ao solo, imediatamente antes do plantio, de diferentes formas de matéria orgânica não decomposta, na cultura do feijoeiro. **Bragantia**, v.25, p.349-363, 1966.
- MORENO, J. A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 1961.
- NAGARE, R. M. **Coupled heat and water transport in frozen organic soils**, thesis (Doctor of Philosophy), The University of Western Ontario, London, Ontario, Canada, 2011.
- NETO, L. M.; ANDRIULO, A.; TRAGHETTA, D. G. **Fracionamento físico da matéria orgânica do solo e caracterização por espectroscopia de EPR**. Embrapa comunicado técnico nº 10, p.1-7. 1996.

NEVES, D. J. D.; ARAÚJO, R. S.; ARAVÉQUIA, J. A. Análise da água precipitável e dos fluxos de calor latente / sensível no início da estação chuvosa das regiões sudeste e centro-oeste do Brasil. **Ciência e Natura**, v. Edição Esp, p. 202–206, 2013.

NEVES, R., P.; LEITÃO, C.; LEITÃO, P. C. Modelação numérica da circulação da água no solo. O modelo MOHID, **Pedologia**, Oeiras v.28, p.46-55, 2000.

NOVAIS, J. W. Z. **Dinâmica geotérmica do solo de uma floresta de cambarás no pantanal Mato-Grossense**, 2011. 54 f. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental), Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2011.

NURUDDIN, A.A.; TOKIMAN, L. Air and soil temperature characteristics of two sizes forest gap in tropical forest, **Asian Journal of Plant Sciences**, v.4, n. 2, p.144-148, 2005.

PARLANGE, J.Y. et al. Analytical approximation to the solutions of Richards' equation with applications to infiltration, ponding, and time compression approximation, **Advances in Water Resources**, Southampton, v.23, n.2, p.189-194, Oct. 1999.

PAUL, K. I. et al. Soil temperature under forests: A simple model for predicting soil temperature under a range of forest types. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.121, n.3–4, p. 167–182, 2004.

PEREIRA A. B. et al. Estimativa do balanço de energia radiante em função de elementos climáticos. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.6, n.2, p.201-206, 1998.

PERES, J. G.; SOUZA, C. F.; LAVORENTI, N. A. Avaliação dos efeitos da cobertura de palha de cana-de-açúcar na umidade e na perda de água do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.30, n.5, p.875-886, Oct. 2010.

PIKUL, J. J. L. Estimating soil surface temperature from meteorological data. **Soil Science**, v.151, n.3, p.187–195, 1991.

PINHO, R.E.C.; MIRANDA, J.H. Avaliação do modelo Hydrus-1D na simulação do transporte de água e potássio em colunas preenchidas com solos tropicais, **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.34, n.5, p. 899-911, set./out. 2014.

PREVEDELLO, C. L. Energia térmica do solo, In: Van Lier, Q.J **Física do solo**, Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010, 298p.

PREVEDELLO, C.L. **Física do solo com problemas resolvidos**. Curitiba, Salesward-Discovery, 1996. 446 p.

RAMOS, T. B. et al. Estimation of soil hydraulic properties from numerical inversion of tension disk infiltrometer data, **Vadose Zone Journal**, v.5, 2006.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Coluna de areia para medir a retenção de água no solo – protótipos e teste. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, p.1931-1935, Nov/Dez. 2006.

RHEINHEIMER, D.S. et al. Prospective modeling with Hydrus-2D of 50 years Zn and Pb movement in metal contaminated agricultural soils. **Journal of Contaminant Hydrology**, v.145, p.54–66. 2013.

RIBAS, G. G. et al. Temperatura do solo afetada pela irrigação e por diferentes coberturas. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 35, n. 5, p. 817-828, Oct. 2015 .

RODRIGUES, H. J. B. et al. Variabilidade quantitativa de população microbiana associada às condições microclimáticas observadas em solo de floresta tropical úmida. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v.26, p.629-638, Dez. 2011.

ROODENBURG, J. Estimating 10-cm soil temperatures under grass. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.34, n.1, p. 41-52, 1985.

RUBIO, C.M.; POYATOS, R. Applicability of hydrus-1d in a mediterranean mountain area submitted to land use changes, **International Scholarly Research Network**, v. 2012, p. 1-7. 2012.

SAITO, H.; SIMUNEK, J.; MOHANTY, B. P. Numerical analysis of coupled water, vapor, and heat transport in the vadose zone. **Vadose Zone Journal**, Michigan, v.5, p.784–800, May. 2006.

SAKAI, M.; TORIDE, N.; SIMUNEK, J. Water and vapor movement with condensation and evaporation in a sandy column, **Soil Science Society of America Journal**, v.73, n. 3, p. 707-717, May–Jun, 2009.

SANTOS, H. G. dos, et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2013. 353 p. a

SANTOS, M. A. F.; SILVA, F. M.; TAVEIRÓS, F. E. V. Estimativa de fluxo de calor no solo em Natal/RN baseado na derivada temporal fracionária de meia ordem, **Sociedade e Território**, Natal, v. 25, n. 2, p. 1-16, Jul./Dez. 2013 b.

SENA, J. et al. Simulação do comportamento da temperatura do solo através da temperatura do ar, **Revista Ciência e Natura**, Santa Maria, Edição Esp. Dez. p. 258 – 261, 2013.

SILVA, V. R.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Variação na temperatura do solo em três sistemas de manejo na cultura do feijão, **Revista Brasileira de Ciência dos Solos**, Viçosa, v.30, p.391-399, Mai/Jun. 2006.

SIMUNEK J., M. TH. VAN GENUCHTEN; M. ŠEJNA, Recent Developments and Applications of the HYDRUS Computer Software Packages. **Vadose Zone Journal**, v.15, n.7, p. 25, 2016.

SIMUNEK J., WENDROTH, O.; VAN GENUCHTEN, M. TH. Parameter estimation analysis of the evaporation method for determining soil hydraulic properties, **Soil Science Society of America Journal**, v.62, n.4, p.894-905, 1998.

SIMUNEK, J.; VAN GENUCHTEN, M.TH.; SEJNA, M. Hydrus: model use, calibration, and validation, **Transactions of the ASABE**, v.55, n.4, p.1261-1274, 2012.

SIMUNEK, M. et al. **The Hydrus 1-D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media**, v. 4.17. Riverside, 2013, 240 p.

SOUTO, P. C. et al. Comunidade microbiana e mesofauna edáficas em solo sob caatinga no semi-árido da Paraíba. **Revista Brasileira de Ciência dos Solos**, Viçosa, v.32, n.1, p.151-160 Feb. 2008.

SRIVASTAVA, R.; JIM YEM, T. C. Analytical solutions for one-dimensional, transient infiltration toward the water table in homogeneous and layered soil, **Water Resources Research**, Washington, v.27, n.5, p.753-762, May, 1991.

STRECK, N. A.; SCHNEIDER, F. M.; BURIOL, G. A. Modificações físicas causadas pelo mulching, **Revista Brasileira Agrometeorologia**, Santa Maria, v.2, p.131-142, 1994.

TIMLIN, D. J., et al. Error analysis of soil temperature simulations using measured and estimated hourly weather data with 2DSOIL. **Agricultural Systems**, v. 72, n. 3, p. 215–239, 2002.

TORRES, J. L. R. **Estudo das plantas de cobertura na rotação milho-soja em sistema de plantio direto no cerrado, na região de Uberaba-MG**. Tese (Doutorado em Agronomia – Produção Vegetal) – Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2003.

VAN DONK, S. J.; TOLLNER, E. W.; STEINER, J. L.; EVETT, S. R. Soil temperature under a dormant bermudagrass mulch: simulation and measurement. **Transactions of the ASAE**, v. 47, n. 1, p. 91–98, 2004.

VAN GENUCHTEN, M. TH. A Closed-Form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, p.892-897, 1980.

WAZILEWSKI, W. T.; WERNER, O. V.; MEDEIROS, M. Influência da temperatura do perfil do solo no desenvolvimento da cultura da soja na região oeste do Paraná, **Cultivando o Saber**, Cascavel, v.4, n.3, p.66-76, 2011.

WEBLER, G. et al. Efeitos de uma camada de palha no comportamento térmico do solo. **Ciência e Natura**, v. 38, p. 7, 2016.

WENDLAND, E.; PIZARRO, M. L. P. Modelagem computacional do fluxo unidimensional de água em meio não saturado do solo, **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.30, n.3, p. 424-434, Jun. 2010.

WU, Y.; PERRY, K. B.; RISTAINO, J. B. Estimating temperature of mulched and bare soil from meteorological data. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 81, n. 3–4, p. 299–323, 1996.

XIANG, L. et al. Evaluating coupled water, vapor, and heat flows and their influence on moisture dynamics in arid regions, **Journal of Hydrologic Engineering**, v.17, p.565-577, 2012.

ZHAO, Y. et al. Modeling grazing effects on coupled water and heat fluxes in Inner Mongolia grassland, **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 109, p.75-86, Aug. 2010.

ZHENG, D.; HUNT Jr, E.R.; RUNNING, S.W. A daily soil temperature model based on air temperature and precipitation for continental applications, **Climate Research**, v.2, p.183-191, 1993.

ZONG-CHANG, Y. Fourier analysis-based air temperature movement analysis and forecast. **IET Signal Processing**, v. 7, n. 1, p. 14–24, 2013.

ZWIRTES, A. L. et al. Simulação da temperatura e conteúdo de água no solo utilizando o Hydrus-1D. In: XX Congreso Latinoamericano y XVI Congreso Peruano de la Ciencia del Suelo, 2014, CUSCO - PERÚ. **Anais do XX Congreso Latinoamericano y XVI Congreso Peruano de la Ciencia del Suelo**, p. 1-4. 2014.

APÊNDICES:

Apêndice A - Conteúdo volumétrico de água do solo, medido em laboratório a partir de coletas de solo e mensurado a campo pelas sondas WCR CS616 para os dias 23 de janeiro, 24 de abril e 5 de setembro de 2015.

23 de janeiro de 2015			
Parcela (trat)	prof. cm	medido cm ³	sonda cm ⁻³
A (6 Mg ha ⁻¹)	5	0,249	0,229
	15	0,250	0,215
	30	0,220	0,223
	50	0,232	0,199
B(0 Mg ha ⁻¹)	5	0,198	0,208
	15	0,207	0,208
	30	0,211	0,214
	50	xx	xx
23 de janeiro de 2015			
C (9 Mg ha ⁻¹)	5	0,306	0,251
	15	0,222	0,218
	30	0,255	0,228
	50	0,229	0,194
D (3 Mg ha ⁻¹)	5	0,223	0,205
	15	0,217	0,196
	30	0,161	0,211
	50	0,155	0,206
24 de abril 2015			
K(6 Mg ha ⁻¹)	5	0,243	0,216
	15	0,207	0,198
	30	0,215	0,218
	50	0,223	0,198
L(0 Mg ha ⁻¹)	5	0,217	0,193
	15	0,201	0,205
	30	0,216	0,222
	50	0,223	0,194
05 de setembro de 2015			
A (6 Mg ha ⁻¹)	5	0,220	0,231
	15	0,240	0,224
B(0 Mg ha ⁻¹)	5	0,213	0,225
	15	0,213	0,224
G (3 Mg ha ⁻¹)	5	0,235	0,186
H (6 Mg ha ⁻¹)	5	0,219	0,203
I (9 Mg ha ⁻¹)	5	0,238	0,181
	15	0,221	0,224

Apêndice B - Conteúdo volumétrico de água do solo, medido em laboratório a partir de coletas de solo e mensurado a campo pelas sondas WCR CS616 para o dia 17 de março de 2016.

Parcela (trat)	Prof, (cm)	Medido cm^3	Sonda cm^{-3}	Parcela (trat)	Prof, (cm)	Medido cm^3	Sonda cm^{-3}	Parcela (trat)	Prof, (cm)	Medido cm^3	Sonda cm^{-3}
A (6 Mg ha ⁻¹)	5	0,237	0,186	E (0 Mg ha ⁻¹)	5	0,234	0,186	I (9 Mg,ha ⁻¹)	5	0,208	0,2
	15	0,165	0,204		15	0,211	0,204		15	0,208	0,209
	30	0,218	0,217		30	0,216	0,221		30	0,224	0,223
	50	0,203	0,201		50	0,211	0,184		50	0,215	0,198
B (0 Mg ha ⁻¹)	5	0,189	0,198	F (9 Mg ha ⁻¹)	5	0,205	0,194	J (3 Mg,ha ⁻¹)	5	0,204	0,181
	15	0,213	0,207		15	0,214	0,2		15	0,216	0,201
	30	0,220	0,215		30	0,106	0,22		30	0,226	0,223
	50	0,215	0,19		50	0,215	0,186		50	0,221	0,192
C (9 Mg ha ⁻¹)	5	0,257	0,235	G (3 Mg ha ⁻¹)	5	0,236	0,171	K (6 Mg ha ⁻¹)	5	xx	xx
	15	0,215	0,21		15	0,212	0,183		15	0,206	0,186
D (3 Mg ha ⁻¹)	5	0,225	0,199	H (6 Mg ha ⁻¹)	5	0,211	0,134	L (0 Mg ha ⁻¹)	5	0,194	0,175
	15	0,209	0,192		15	0,209	0,185		15	0,203	0,194

Apêndice C – Representação das temperaturas da superfície medida e estimada em cada quantidade de palha em cobertura,

As figuras C.1 até C.12 descrevem os valores de T_{sup} medidos e estimados com as equações senoidal, geral e específicas dentro de cada quantidade de palha e exemplificam a distribuição dos erros que ocorrem ao longo das horas que foram discutidas no estudo 2, Sendo possível observar melhor os erros que ocorrem em superestimativa e subestimativas nas diferentes quantidades de palha (Figura 7) e ao longo das horas do dia (Figura 8), demonstrando ainda a concordância que existe entre os valores medidos e os estimados com as equações,

Cabe ressaltar ainda que no período de 6 a 9 de agosto (correspondente das 1081 à 117 horas) ocorreu entrada de uma massa de ar quente sobre o a área do experimento o que acabou proporcionando maiores erros em estimativa da T_{sup} com o uso da equação geral e específicas em solos com cobertura vegetal podendo estes erros ser facilmente identificadas nas Figuras C.5, C.6, C.8, C.9, C.11 e C.12,

Figura C.1 - Temperatura da superfície do solo medida e estimada, utilizando a equação senoidal em solo descoberto para o período de 22 de junho à 06 de dezembro de 2015.

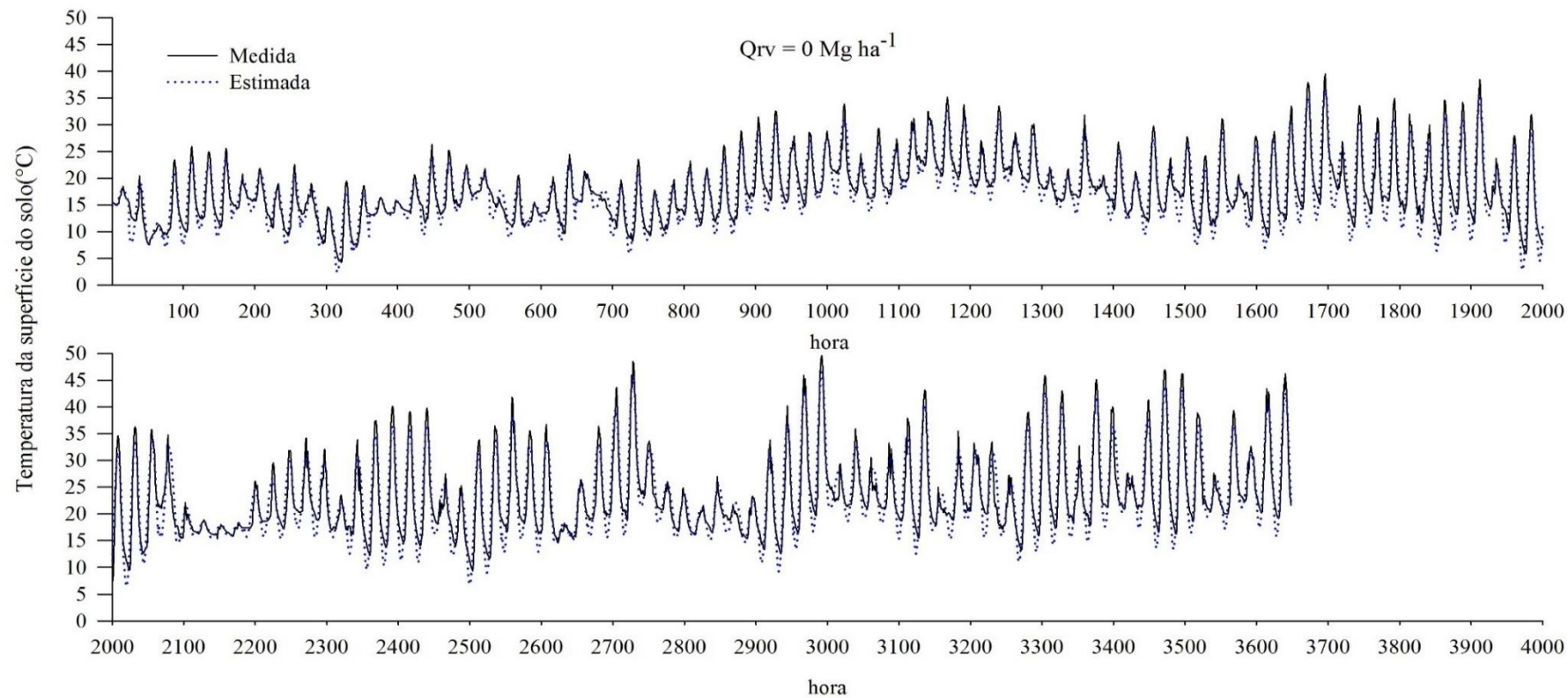


Figura C.2 - Temperatura da superfície do solo medida e estimada, utilizando a equação geral ($T_{\text{sup}} = 10,87 - 3,5 \cdot D + 0,68 \cdot T_{\text{ar}} + 0,0016 \cdot \text{Rad} - 0,0005 \cdot \text{Rad} \cdot D - 0,31 \cdot Q_{\text{rv}} + 0,25 \cdot Q_{\text{rv}} \cdot D$) em solo descoberto para o período de 22 de junho à 06 de dezembro de 2015.

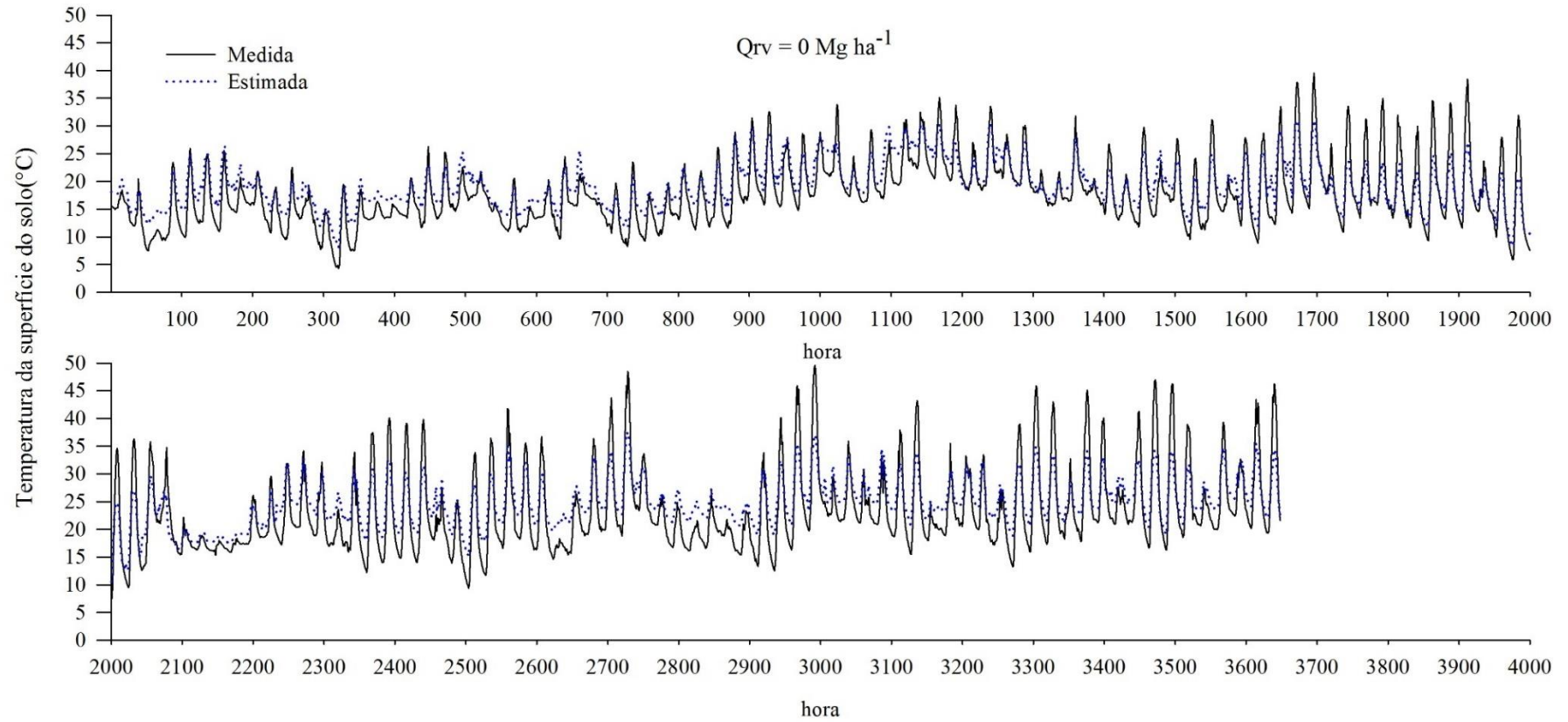


Figura C.3 - Temperatura da superfície do solo medida e estimada, utilizando a equação específica ($T_{sup} = 1,7 + 1,19*D + 1,01*T_{ar} - 0,13*T_{ar}*D + 0,003*Rad - 0,0007*Rad*D$) em solo descoberto para o período de 22 de junho à 06 de dezembro de 2015.

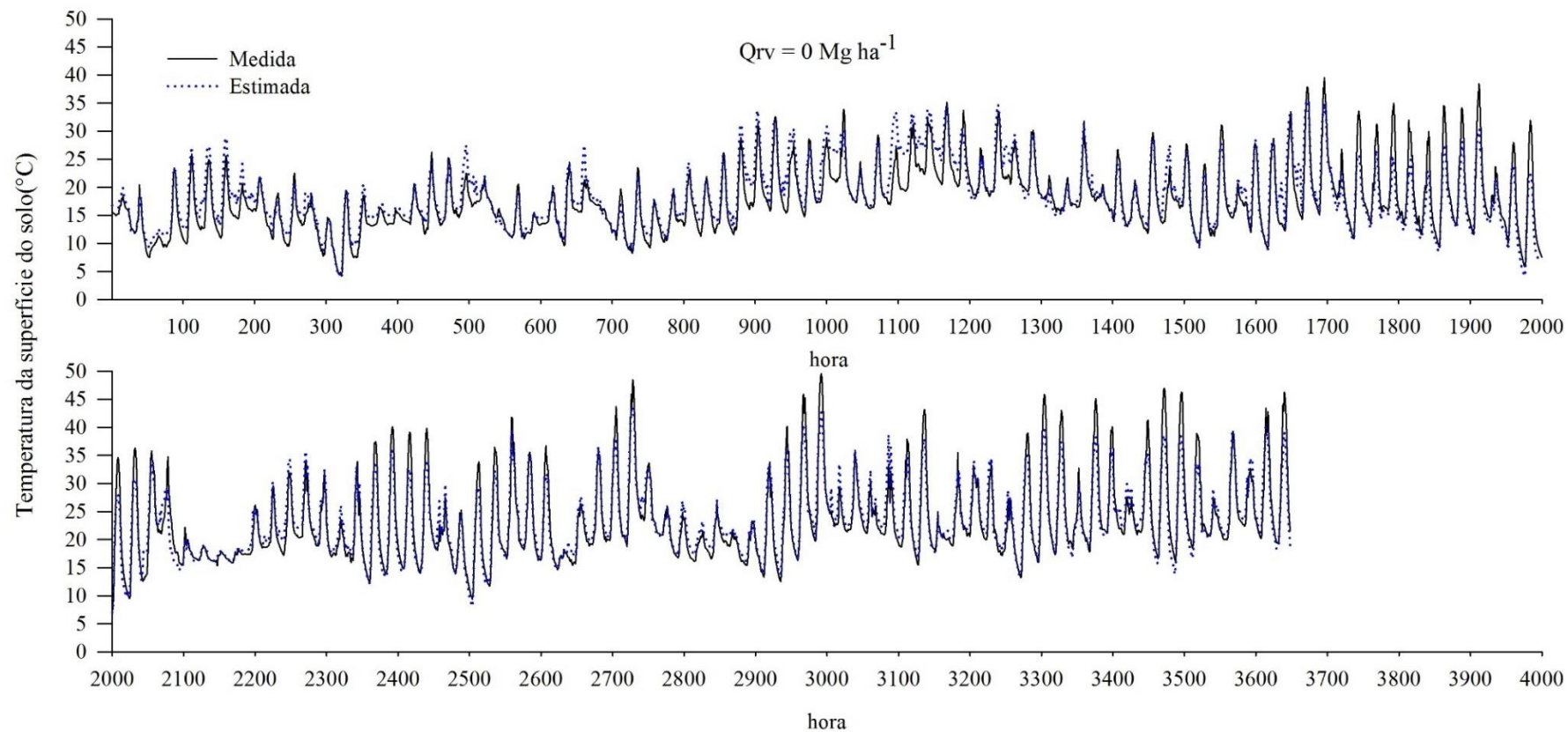


Figura C.4 - Temperatura da superfície do solo medida e estimada, utilizando a equação senoidal em solo com 3 Mg ha^{-1} para o período de 22 de junho à 06 de dezembro de 2015.

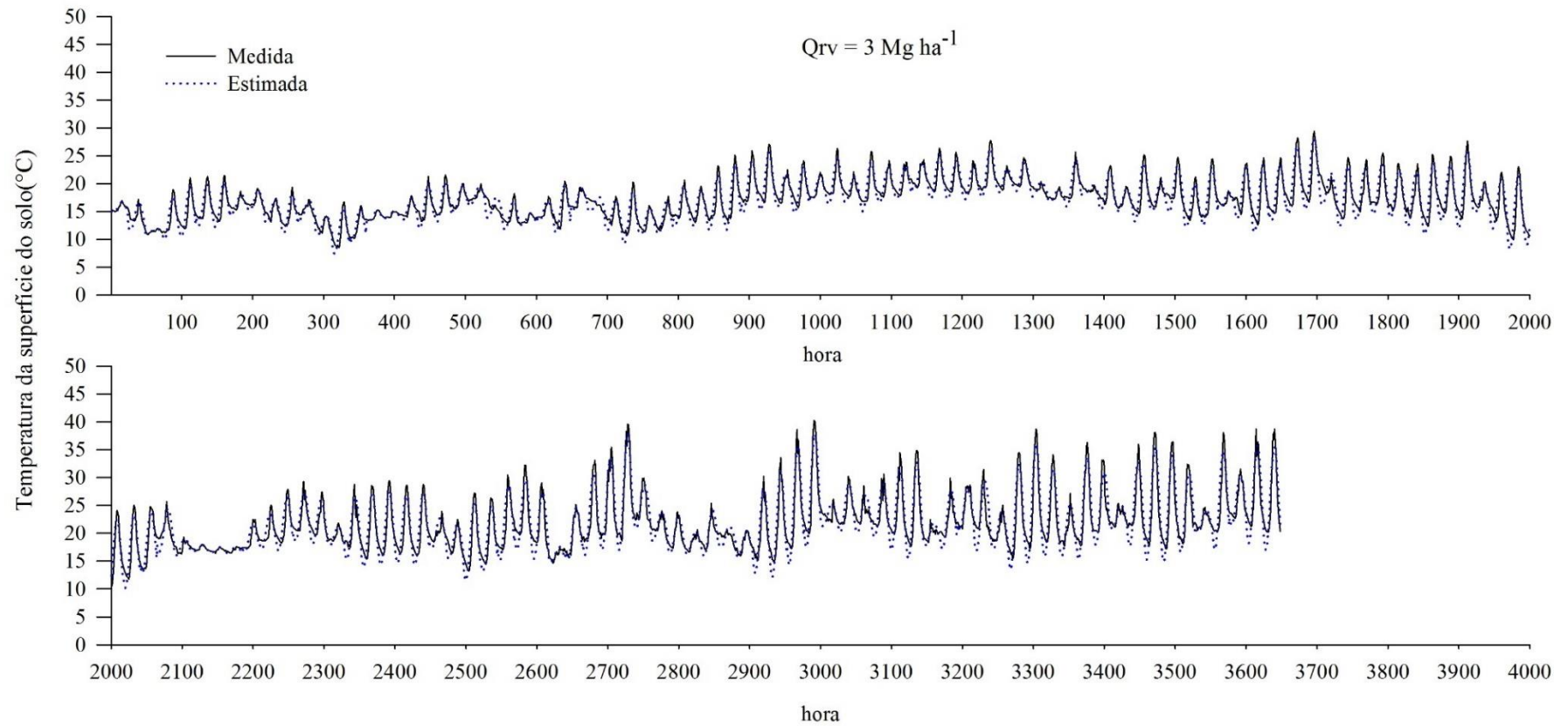


Figura C.5 - Temperatura da superfície do solo medida e estimada, utilizando a equação geral ($T_{sup} = 10,87 - 3,5*D + 0,68*Tar + 0,0016*Rad - 0,0005*Rad*D - 0,31*Q_{rv} + 0,25*Q_{rv}*D$) em solo com 3 Mg ha^{-1} para o período de 22 de junho à 06 de dezembro de 2015.

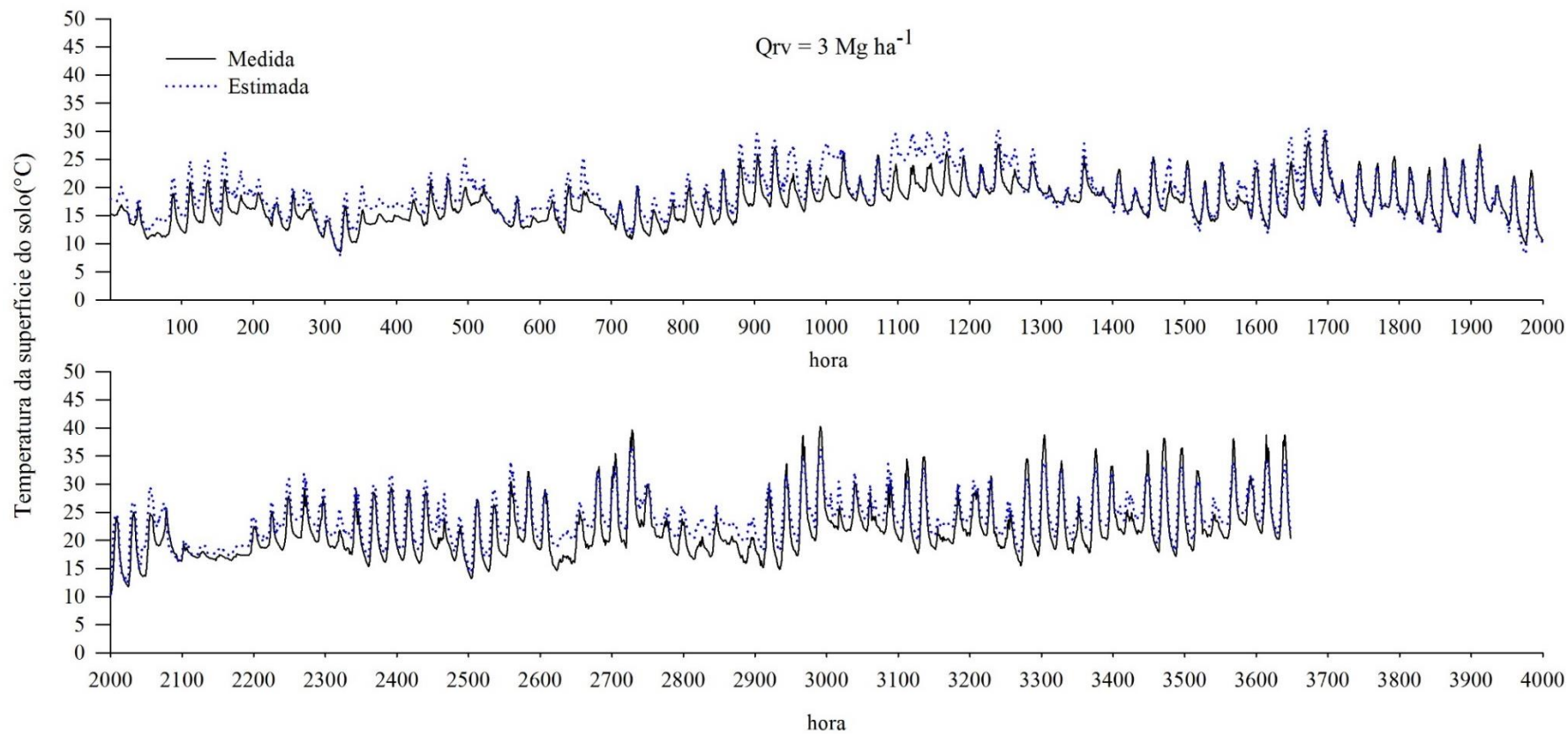


Figura C.6- Temperatura da superfície do solo medida e estimada, utilizando a equação específica ($T_{sup} = 10 - 2,63*D + 0,65*T_{ar} + 0,001*Rad - 0,0003*Rad*D$) em solo com 3 Mg ha^{-1} para o período de 22 de junho à 06 de dezembro de 2015.

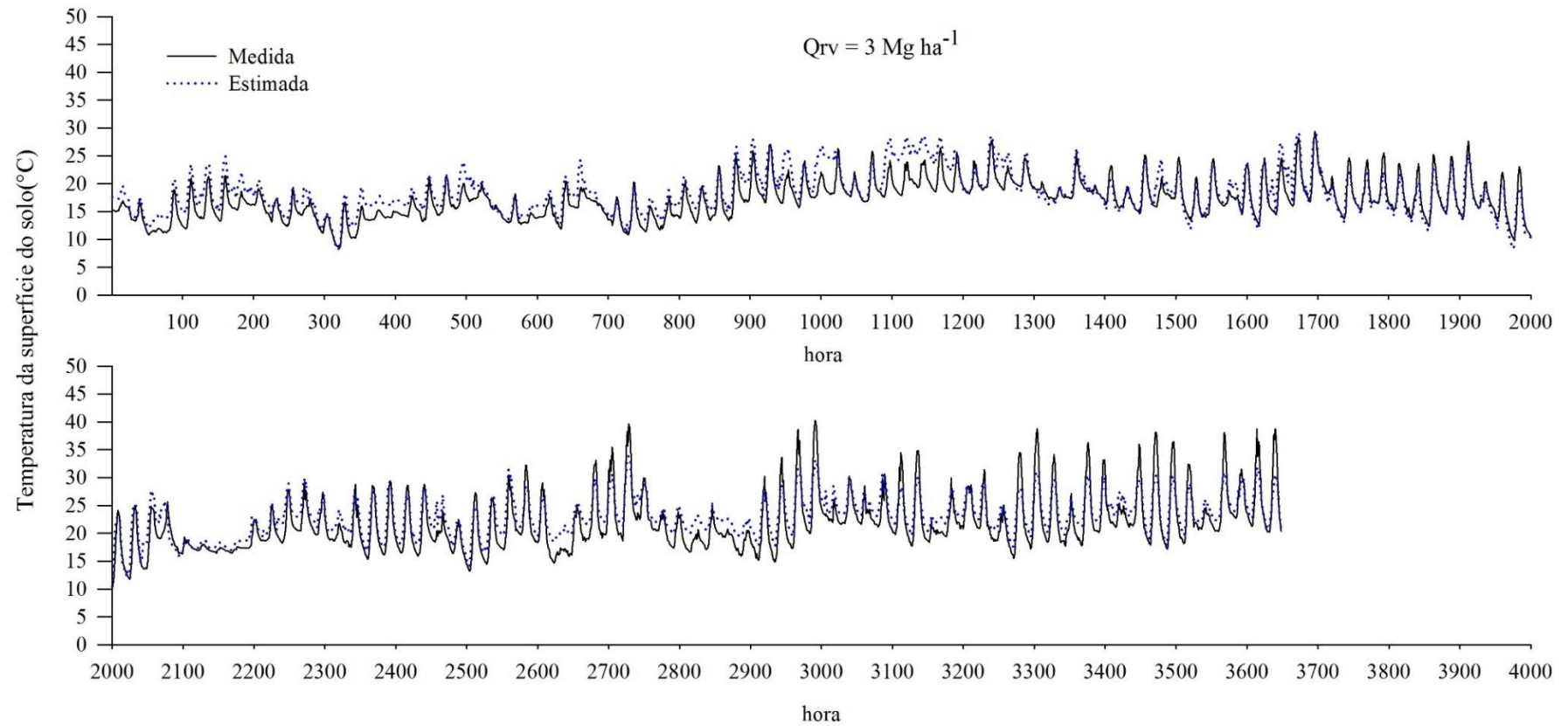


Figura C.7- Temperatura da superfície do solo medida e estimada, utilizando a equação senoidal em solo com 6 Mg ha^{-1} para o período de 22 de junho à 06 de dezembro de 2015.

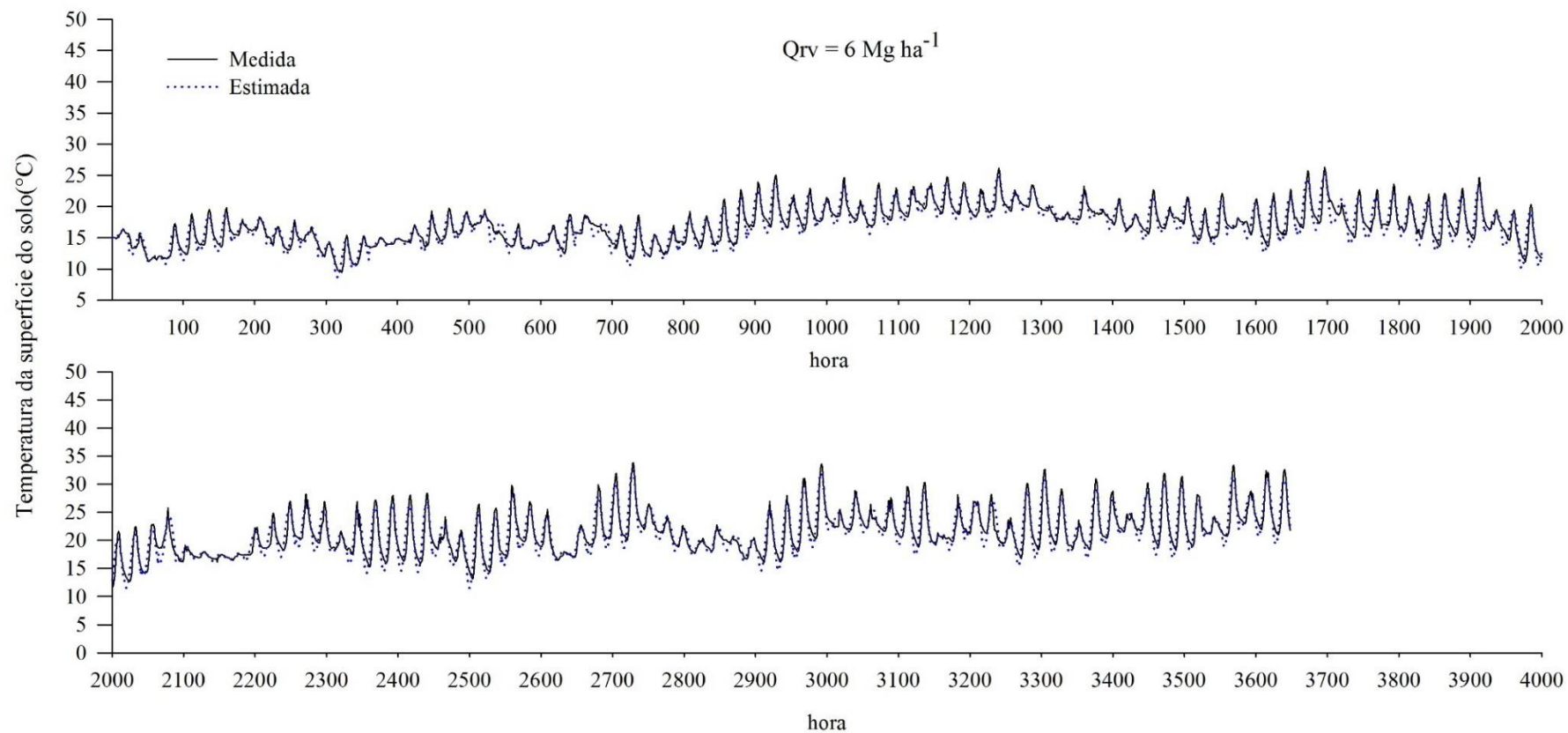


Figura C.8- Temperatura da superfície do solo medida e estimada, utilizando a equação geral ($T_{sup} = 10,87 - 3,5 * D + 0,68 * Tar + 0,0016 * Rad - 0,0005 * Rad * D - 0,31 * Q_{rv} + 0,25 * Q_{rv} * D$) em solo com 6 Mg ha^{-1} para o período de 22 de junho à 06 de dezembro de 2015.

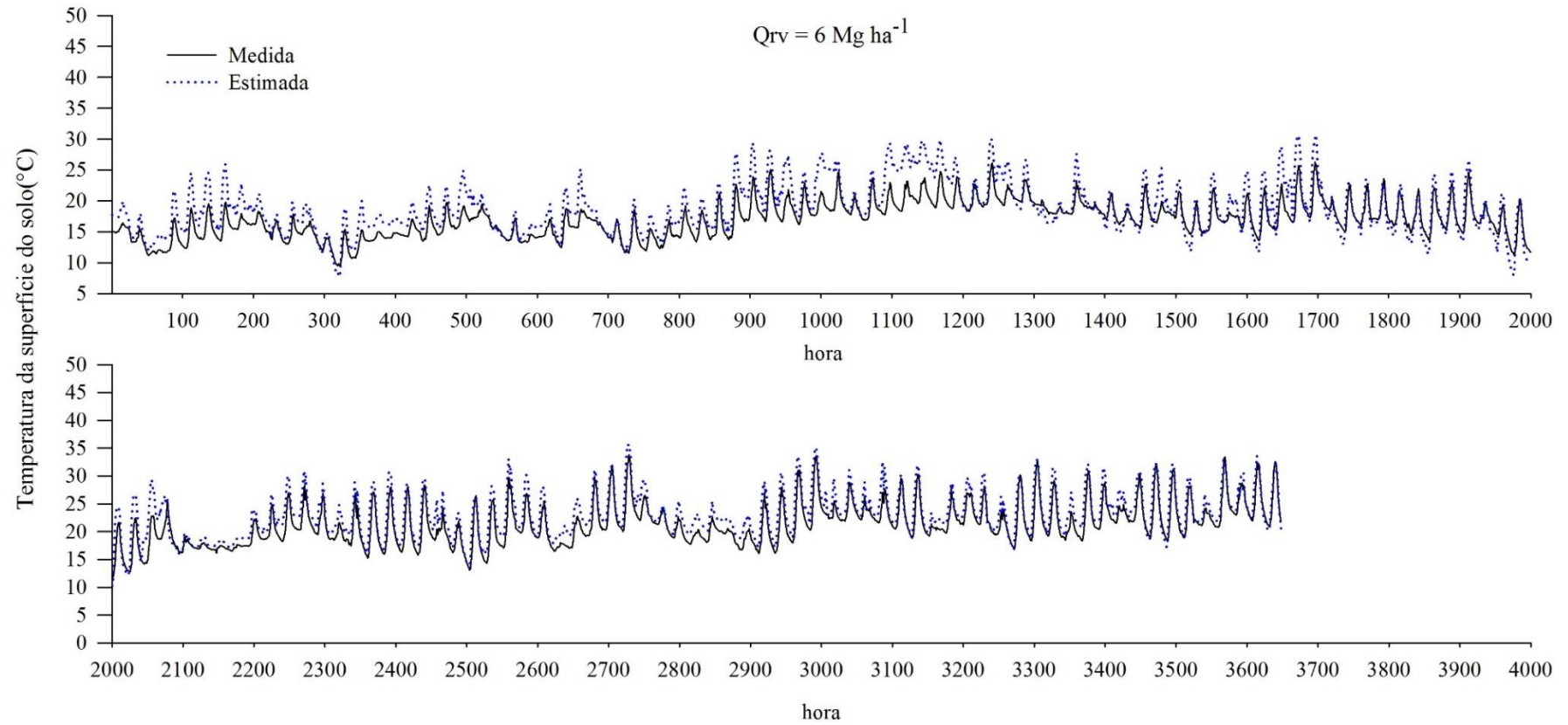


Figura C.9- Temperatura da superfície do solo medida e estimada, utilizando a equação específica ($T_{sup}=11,74 - 3,64*D + 0,59*T_{ar} + 0,05*T_{ar}*D + 0,0009*Rad - 0,0005*Rad*D$) em solo com 6 Mg ha^{-1} para o período de 22 de junho à 06 de dezembro de 2015.

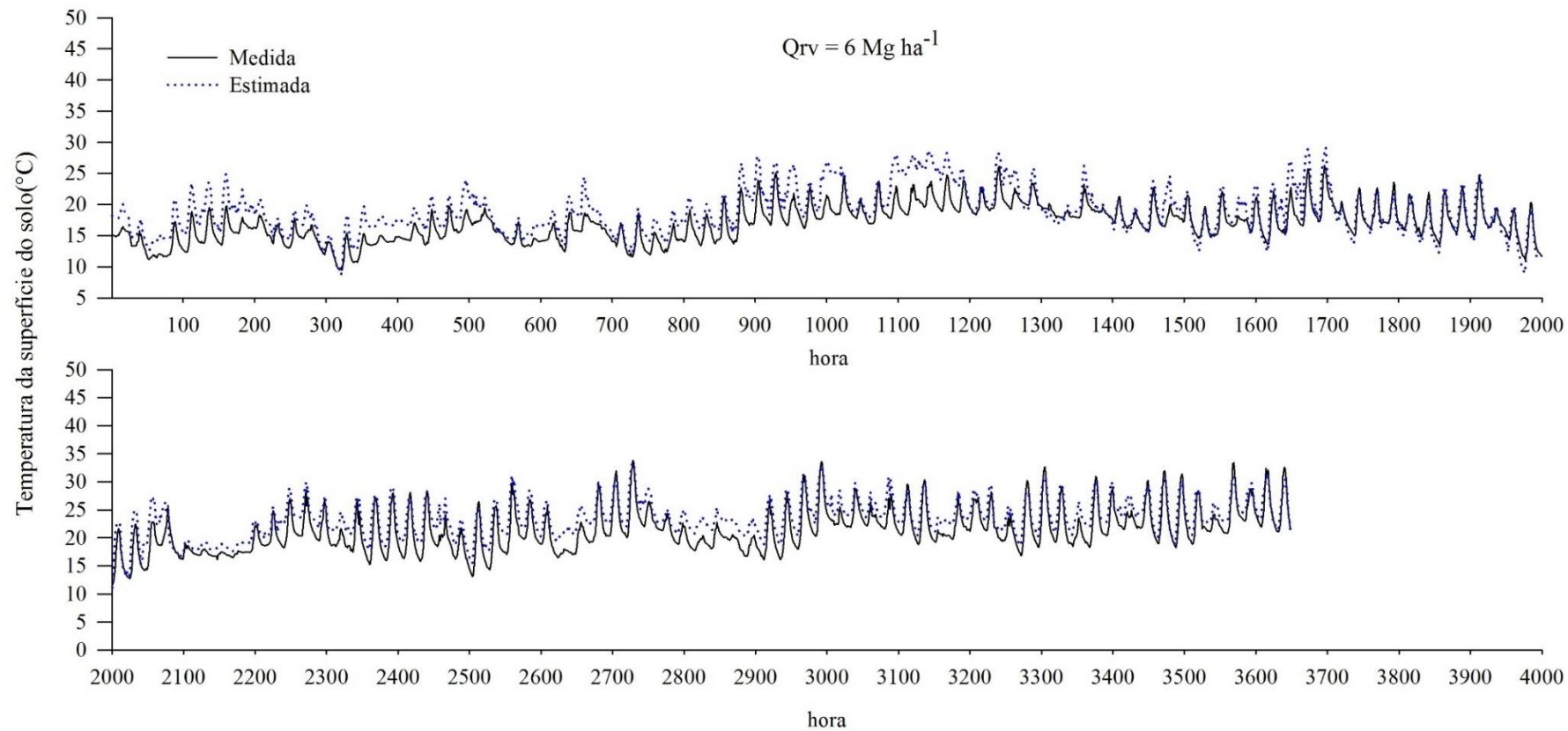


Figura C.10- Temperatura da superfície do solo medida e estimada, utilizando a equação senoidal em solo com 9 Mg ha⁻¹ para o período de 22 de junho à 06 de dezembro de 2015.

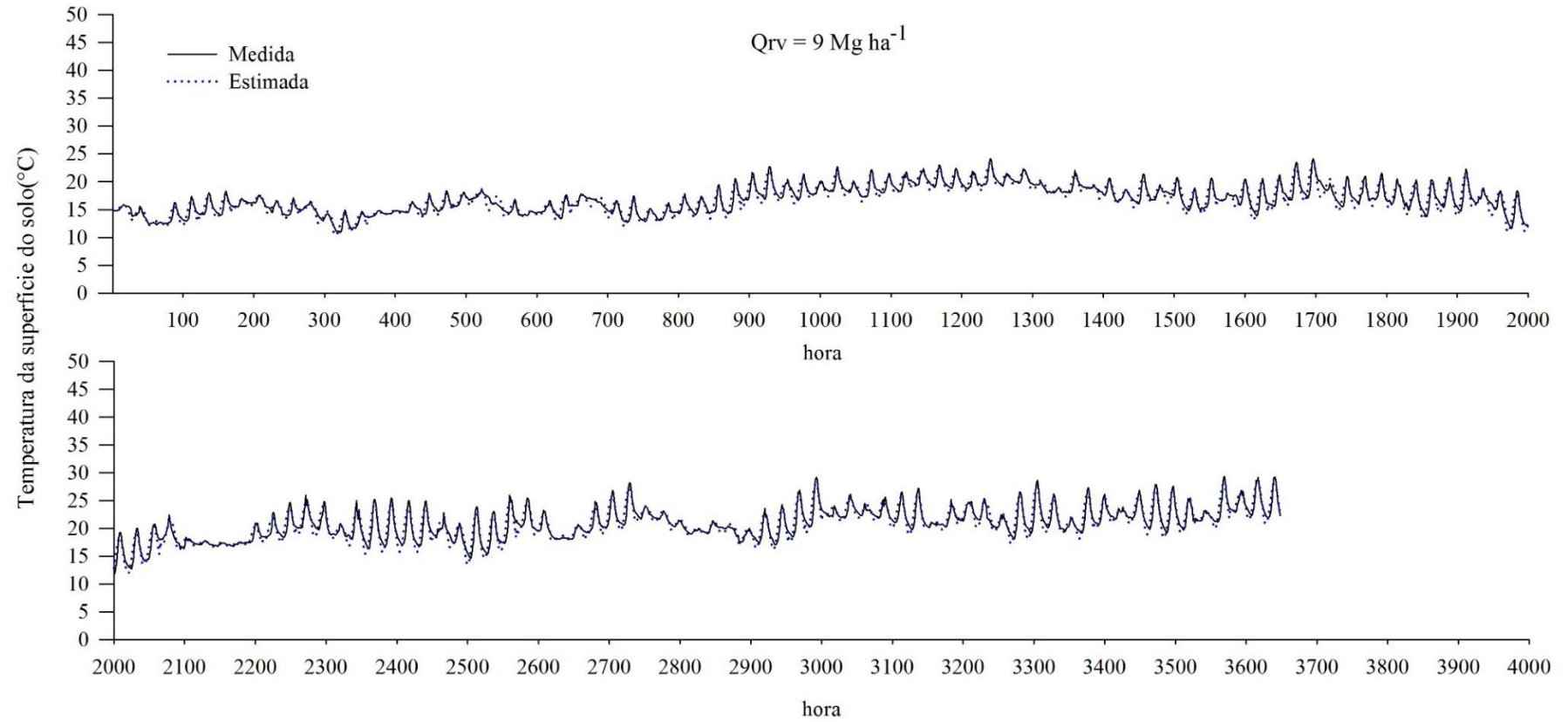


Figura C.11- Temperatura da superfície do solo medida e estimada, utilizando a equação geral ($T_{sup} = 10,87 - 3,5 * D + 0,68 * T_{ar} + 0,0016 * Rad - 0,0005 * Rad * D - 0,31 * Q_{rv} + 0,25 * Q_{rv} * D$) em solo com 9 Mg ha^{-1} para o período de 22 de junho à 06 de dezembro de 2015.

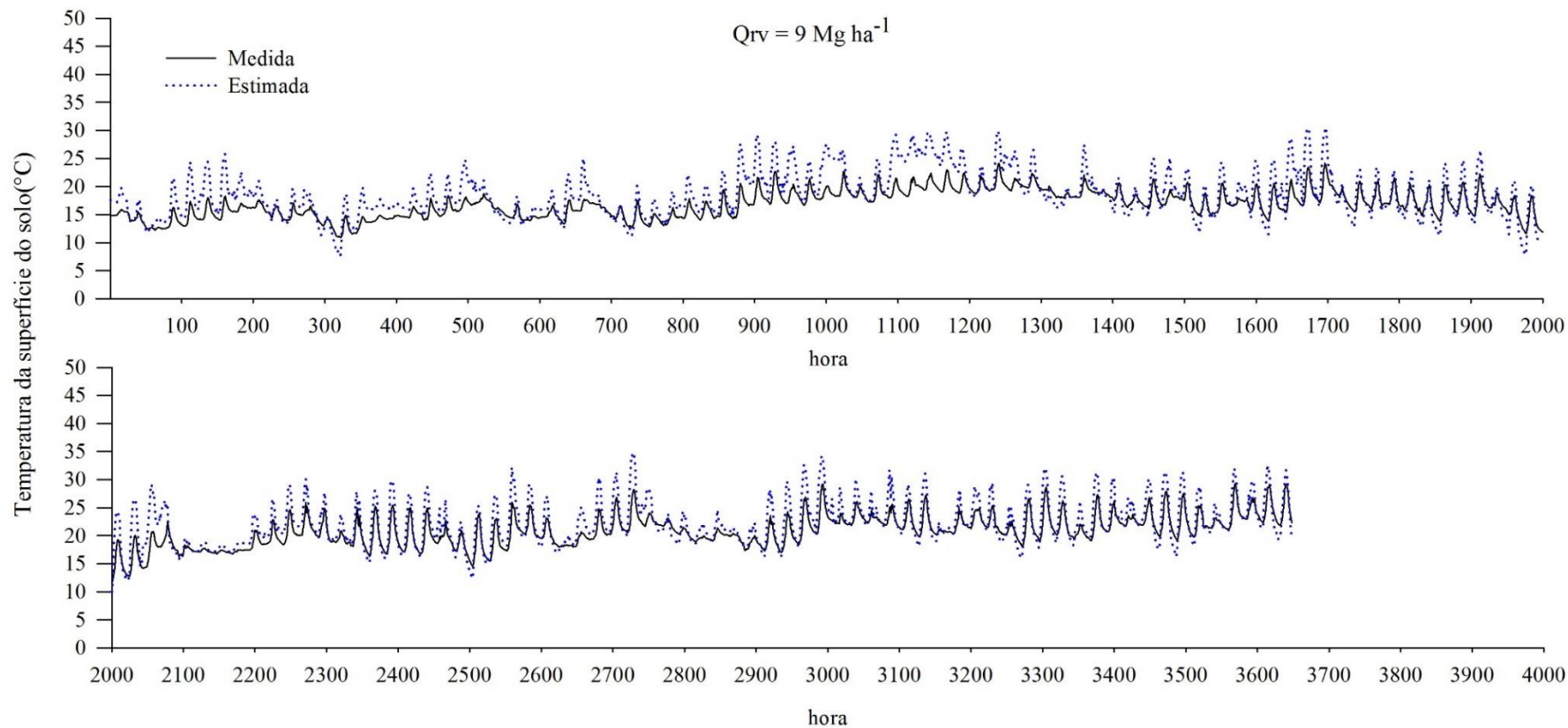
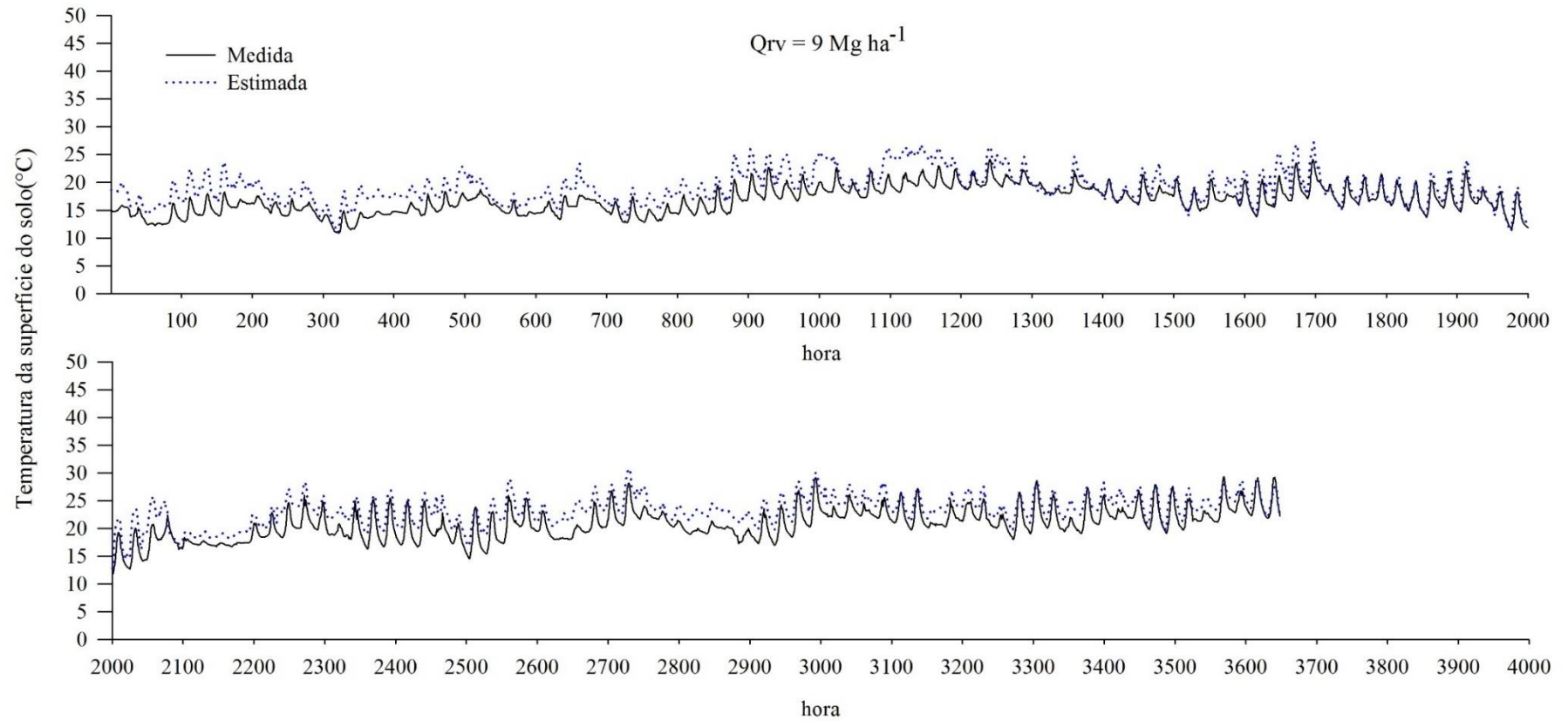
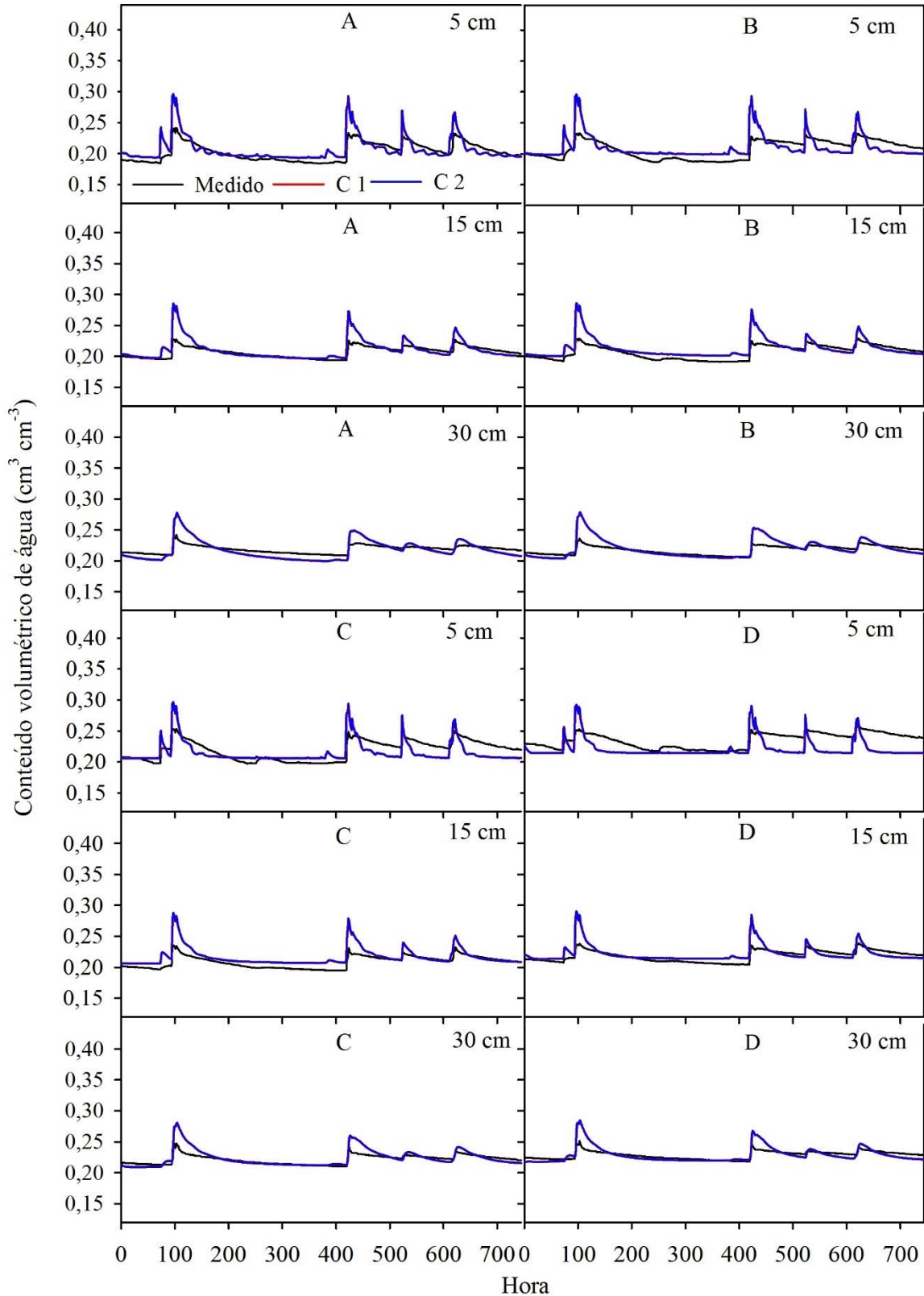


Figura C.12- Temperatura da superfície do solo medida e estimada, utilizando a equação específica ($T_{sup} = 13,54 - 3,12 * D + 0,52 * T_{ar} + 0,0001 * Rad$) em solo com 9 Mg ha^{-1} para o período de 22 de junho à 06 de dezembro de 2015.



Apêndice D - Conteúdo volumétrico de água no solo simulado na condição de contorno com T_{sup} medida (C1) e a T_{sup} estimada (C2) e medido à 5, 15 e 30 cm profundidade em solos com 0 (A), 3 (B), 6 (C) e 9 (D) $Mg\ ha^{-1}$ durante o mês de agosto de 2015.



Apêndice E - Conteúdo volumétrico de água no solo simulado na condição de contorno com T_{sup} medida (C1) e com T_{sup} estimada (C2) e medido à 5, 15 e 30 cm profundidade em solos com 0 (A), 3 (B), 6 (C) e 9 (D) $Mg\ ha^{-1}$ durante o mês de novembro de 2015.

