

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA**

**ESTUDO DO BALANÇO DE ENERGIA EM UM
CULTIVO DE TRIGO NO SUL DO BRASIL**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Gisele Cristina Dotto Rubert

Santa Maria, RS, Brasil.

2013

ESTUDO DO BALANÇO DE ENERGIA EM UM CULTIVO DE TRIGO NO SUL DO BRASIL

Gisele Cristina Dotto Rubert

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Área de Concentração em Micrometeorologia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Meteorologia.**

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Débora Regina Roberti

Santa Maria, RS, Brasil.

2013

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

Dotto Rubert, Gisele Cristina
Estudo do balanço de energia em um cultivo de trigo no sul do Brasil / Gisele Cristina Dotto Rubert.-2013.
70 p. ; 30cm

Orientadora: Débora Regina Roberti
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, RS, 2013

1. Eddy Covariance 2. Balanço de energia 3. Evapotranspiração I. Roberti, Débora Regina II. Título.

© 2013

Todos os direitos autorais reservados a Gisele Cristina Dotto Rubert. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.
E-mail: girubert@gmail.com

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Naturais e Exatas
Programa de Pós-Graduação em Meteorologia**

A comissão examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**ESTUDO DO BALANÇO DE ENERGIA EM UM CULTIVO DE
TRIGO NO SUL DO BRASIL**

elaborada por
Gisele Cristina Dotto Rubert

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Meteorologia

COMISSÃO EXAMINADORA:


Débora Regina Roberti, Dra (UFSM)
(Presidente/Orientadora)


Evandro Zanini Righi, Dr. (UFSM)


Luis Gustavo Gonçalves de Gonçalves, PhD (CPTEC/INPE)

Santa Maria, 06 de agosto de 2013

A Joel Rubert

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Meteorologia
Universidade Federal de Santa Maria

ESTUDO DO BALANÇO DE ENERGIA EM UM CULTIVO DE TRIGO NO SUL DO BRASIL

Autor: GISELE CRISTINA DOTTO RUBERT

Orientadora: DÉBORA REGINA ROBERTI

Data e local da defesa: Santa Maria, 06 de Agosto de 2013.

Neste estudo, o fluxo de calor sensível (H), fluxo de calor latente (Le), evapotranspiração (ET), foram investigados utilizando o método de covariância de vórtices durante o período de cultivo de trigo em 2011. A estimativa usando a equação de Penman-Monteith também foi realizada. A influência dos diferentes sistemas de cultivo, convencional e direto, na fenologia de trigo foi realizada utilizando os dados de índice de área foliar (IAF) e produtividade. O experimento foi realizado no município de Cruz Alta-RS, em uma área agrícola localizada na Cooperativa Central Gaúcha Ltda –Tecnologia. Durante o período de cultivo do trigo foram coletados dados fenométricos e micrometeorológicos. O fluxo de energia na forma de calor latente (Le) foi responsável pela utilização da maior parte da energia disponível, principalmente nos períodos em que o índice de área foliar (IAF) do trigo é maior. Os valores médios diários para o período de cultivo do trigo para H é de $7,8 \text{ Wm}^{-2}$, para Le de $73,17 \text{ Wm}^{-2}$, para G de $-1,72 \text{ Wm}^{-2}$ e para R_n de $70,95 \text{ Wm}^{-2}$. Além do subsolo aquecer a superfície, também houve uma advecção de mais de 15 Wm^{-2} no período para esta região. A evapotranspiração experimental acumulada foi de 256 mm, enquanto que a precipitação total foi de 799 mm. Contudo, a evapotranspiração acumulada obtida utilizando a equação de Penman-Monteith foi de 282,72 mm. As médias para as resistências aerodinâmica e de superfície foram $39,54 \text{ sm}^{-1}$ e $378,98 \text{ sm}^{-1}$, respectivamente. Com relação à fenologia da cultura agrícola, para o sistema de cultivo convencional o trigo obteve maior produtividade, além de maior IAF.

Palavras-chave: *Eddy Covariance*. Evapotranspiração. Balanço de energia. *Triticum aestivum* L. Thell.

ABSTRACT

Masters Dissertation
Meteorology Post-Graduation Program
Universidade Federal de Santa Maria

ENERGY BALANCE STUDY IN A WHEAT CULTIVE IN THE SOUTH OF BRAZIL

Author: GISELE CRISTINA DOTTO RUBERT
Adviser: DÉBORA REGINA ROBERTI
Defense local and date: Santa Maria, August 06th, 2013.

In this study, the sensible heat flux (H), latent heat flux (Le), evapotranspiration (ET), were investigated under wheat growing season using the eddy covariance technique during 2011 cropping periods. A estimative using the Penman-Monteith equation was also performed. The influence of the different tillage systems, conventional tillage and no tillage, in the wheat phenology was performed using the leaf area index (LAI) data and productivity. The experiment site was instaled in Cruz Alta-RS city, in an agricultural area located at Cooperativa Central Gaúcha Ltda –Tecnologia. During the wheat growing season, phenometric and micrometeorologic data were collected. The latent heat flux (Le) was responsible for the use of the major part of the available energy, mainly in the periods in which the leaf area index (LAI) of the wheat is higher. The daily mean values in the wheat growing season was $7,8 \text{ Wm}^{-2}$, H for Le is $73,17 \text{ Wm}^{-2}$, for G is $-1,72 \text{ Wm}^{-2}$ and for R_n is $70,95 \text{ Wm}^{-2}$. Further than the subsoil heating the surface, there was also advection of more than 15 Wm^{-2} in the period for this region. The accumulated experimental evapotranspiration was of more than 256 mm, while the total precipitation was 799 mm. However, the accumulated evapotranspiration obtained using the Penman-Monteith equation was 282,72 mm. The means for the aerodynamic and surface resistances were $39,54 \text{ sm}^{-1}$ and $378,98 \text{ sm}^{-1}$, respectively. Relating to the agricultural culture phenology, for the tillage planting system the wheat had the higher productivity, as well as higher LAI.

Keywords: *Eddy Covariance*. Evapotranspiration. Energy Balance. *Triticum aestivum* L. Thell.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** – Localização geográfica e vista aérea do sítio experimental em Cruz Alta – RS 17
- Figura 2** – Croqui do sítio experimental em Cruz Alta – RS, destacando o sistema de manejo do solo utilizado durante o experimento de cultivo do trigo nos dois sistemas de cultivo, no período de 14 de junho a 09 de novembro de 2011 18
- Figura 3** – Trigo no sistema de cultivo Convencional (SC) e direto (SD), em Cruz Alta-RS 18
- Figura 4** – Estádios fenológicos ao longo do desenvolvimento da cultura do trigo 20
- Figura 5** – Equipamento Portable Area Meter Li-Cor Model Li-3000A que mede experimentalmente a área foliar 21
- Figura 6** – Torre micrometeorológica instalada na parcela de com sistema de cultivo direto durante período de cultivo do trigo, em Cruz Alta-RS 24
- Figura 7** – Representação simplificada da resistência de superfície (bulk) e resistência aerodinâmica para o fluxo de vapor de água 31
- Figura 8** – Temperatura média diária e precipitação diária acumulada durante o ciclo do Trigo em função dos Dias Após Semeadura (DAS) 34
- Figura 9** – (a) Umidade Relativa do ar e (b) Déficit de Pressão de Vapor durante o cultivo do trigo na área experimental de Cruz Alta no período de 14 de junho a 09 de novembro de 2011 35
- Figura 10** – Temperatura do ar e Temperatura do ponto de orvalho durante o cultivo do trigo na área experimental de Cruz Alta no período de 14 de junho a 09 de novembro de 2011 36
- Figura 11** – Distribuição de frequência percentual da Direção da velocidade do vento para o cultivo de Trigo na área experimental em Cruz Alta no período de 14 de junho a 09 de novembro de 2011 37
- Figura 12** – Índice de área foliar do trigo em função dos Graus-dia acumulados para o sistema de cultivo Convencional (SC) 38
- Figura 13** – Índice de área foliar do trigo em função dos Graus-dia acumulados para o sistema de cultivo Direto (SD) 38
- Figura 14** – Massa seca do trigo e altura média em função dos Graus-dia acumulados para o sistema de cultivo Convencional 39

Figura 15 – Massa seca do trigo e altura média em função dos Graus-dia acumulados para o sistema de cultivo Direto.....	40
Figura 16 – (a) Saldo de Radiação; Fluxo de energia na forma de calor (b) no Solo (c) Latente (d) Sensível para o cultivo de Trigo na área experimental de Cruz Alta no período de 14 de junho a 09 de novembro de 2011	41
Figura 17 – Ciclo diário médio do saldo de radiação e dos fluxos de calor sensível, latente e do solo para o cultivo de Trigo no período de 14 de junho a 09 de novembro de 2011.....	43
Figura 18 – Média diária dos fluxos de calor sensível, latente e do solo para o cultivo de Trigo no período de 14 de junho a 09 de novembro de 2011	44
Figura 19 – Diagrama de dispersão da subtração da energia disponível (R_n) e o fluxo de energia na forma de calor no solo (G) versus a soma dos fluxos de calor sensível (H) e latente (L_e) e para o cultivo de Trigo no período de 14 de junho a 09 de novembro de 2011.....	45
Figura 20 – Média diária da temperatura do solo medida a 3cm de profundidade para a cultura do trigo no sítio experimental de Cruz Alta-RS no período de 14 de junho a 09 de novembro de 2011.....	46
Figura 21 – Razão de Bowen para o cultivo de Trigo no período de 14 de junho a 09 de novembro de 2011	47
Figura 22 – (a) Ciclo diário médio das componentes do balanço de energia e (b) energia residual ($R_n - (H+L_e+G)$) para o Estádio fenológico de Emergência.....	49
Figura 23 – (a) Ciclo diário médio das componentes do balanço de energia e (b) energia residual ($R_n - (H+L_e+G)$) para o Estádio fenológico de Perfilhamento	50
Figura 24 – (a) Ciclo diário médio das componentes do balanço de energia e (b) energia residual ($R_n - (H+L_e+G)$) para o Estádio fenológico de Elongamento	51
Figura 25 – (a) Ciclo diário médio das componentes do balanço de energia e (b) energia residual ($R_n - (H+L_e+G)$) para o Estádio fenológico de Espigamento	52
Figura 26 – (a) Ciclo diário médio das componentes do balanço de energia e (b) energia residual ($R_n - (H+L_e+G)$) para o Estádio fenológico de Florescimento.....	53

Figura 27 – (a) Ciclo diário médio das componentes do balanço de energia e (b) energia residual ($R_n - (H+Le+G)$) para o Estádio fenológico de Amadurecimento	54
Figura 28 – Média diária da Evapotranspiração para o cultivo de Trigo no período de 14 de junho a 09 de novembro de 2011.....	55
Figura 29 – Evapotranspiração e Precipitação acumulada para o cultivo de Trigo no período de 14 de junho a 09 de novembro de 2011.....	56
Figura 30 – Evapotranspiração medida com Le (ET medido) e utilizando a equação de Penman-Monteith (ET-PM) para o cultivo de Trigo no período de 14 de junho a 09 de novembro de 2011.....	57
Figura 31 – édias diárias do parâmetro de estabilidade atmosférica (ζ), em que $\zeta < 0$ representa instabilidade, $\zeta = 0$ neutralidade (linha sólida vermelha) e $\zeta > 0$ representam estabilidade atmosférica durante o cultivo de trigo na área experimental de Cruz Alta no período de 14 de junho a 09 de novembro de 2011.....	58
Figura 32 – Média diária da Temperatura do ar em função da Temperatura do solo durante o cultivo de trigo na área experimental de Cruz Alta no período de 14 de junho a 09 de novembro de 2011.....	58
Figura 33 – Média diária da Velocidade de Fricção durante o cultivo de trigo na área experimental de Cruz Alta no período de 14 de junho a 09 de novembro de 2011	59

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1** – Informações sobre o uso do solo, desde a implantação do Projeto Sulflux, no sítio experimental de Cruz Alta 19
- Tabela 2** – Valores acumulados mensais para a precipitação durante o ciclo de trigo/2011 e média climatológica de Cruz Alta-RS 34
- Tabela 3** – A data da coleta, dias após semeadura (DAS), graus-dia acumulados e o estágio fenológico do trigo na referida data para o sítio experimental de Cruz Alta no período de 14 de junho a 09 de novembro de 2011 40
- Tabela 4** – Médias do ciclo diário das componentes do balanço de energia para o cultivo de Trigo no período de 14 de junho a 09 de novembro de 2011 43
- Tabela 5** – Médias do ciclo diário das componentes do balanço de energia, H, Le, G e Rn, e precipitação acumulada para os estádios fenológicos do Trigo 48

LISTA DE ANEXOS

- ANEXO 1** – Informações do cultivar FUNDACEP 300 que foram extraídas do Catálogo de sementes CCGL-Tec 201169
- ANEXO 2** – Detalhamento dos estádios fenológicos para o trigo, de acordo com a escala de Feekes e Large70

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 METODOLOGIA	16
2.1 Descrição e localização da área de estudo.....	16
2.2 Medidas Fenométricas.....	20
2.3 Índice de área foliar.....	21
2.4 Graus-Dia	22
2.5 Instrumentação e medidas atmosféricas	23
2.6 Método de covariância de vórtices turbulentos	24
2.7 Balanço de energia	26
2.8 Evapotranspiração	28
2.8.1 Preenchimento dos dados	28
2.8.2 Evapotranspiração real do trigo	29
2.8.3 Evapotranspiração utilizando a equação de Penman-Monteith	30
3 RESULTADOS.....	33
3.1 Condições Meteorológicas.....	33
3.2 Dados Fenométricos.....	37
3.3 Balanço de energia	41
3.4 Balanço de energia para os estádios fenológicos	47
3.4.1 Emergência.....	48
3.4.2 Perfilhamento.....	49
3.4.3 Elongamento.....	50
3.4.4 Espigamento	51
3.4.5 Florescimento	52
3.4.6 Amadurecimento.....	53
3.5 Evapotranspiração	54
4 CONCLUSÃO	60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62
ANEXOS	69

1 INTRODUÇÃO

Para compreender as trocas de energia, massa e momentum entre um ecossistema e a atmosfera é necessário entender os processos de interação entre a superfície e a atmosfera, ou seja, estudar a Camada Limite Planetária (CLP). Quantificar o balanço de energia acima do dossel é essencial para uma melhor compreensão das mudanças nos padrões climáticos regionais. Com isso, o interesse nas culturas agrícolas tem incentivado o desenvolvimento de estudos experimentais e de modelagem sobre a variação dos fluxos de energia nestas culturas. A quantificação das componentes do balanço de energia é essencial para o planejamento dos recursos hídricos, especialmente para o planejamento de irrigação de culturas agrícolas. O balanço de energia torna-se importante, pois ele permite dimensionar as trocas de massa e energia no sistema solo-planta-atmosfera, através do estudo da partição do saldo de radiação (R_n) nos processos que ocorrem na superfície (RAMIREZ et. al. 2010). Além de permitir avaliar as variações no microclima da vegetação devido às condições do solo e da atmosfera durante, por exemplo, os estádios de desenvolvimento de uma cultura agrícola. Uma melhor compreensão dos processos de troca de energia e água, que ocorrem na superfície-atmosfera permite uma melhor avaliação da evapotranspiração e fotossíntese, as quais afetam diretamente a acumulação de biomassa e a produtividade dos cultivos agrícolas (ROLIM et. al., 2008).

O conhecimento das interações do sistema solo-planta-atmosfera vem sendo difundido por vários estudos experimentais sobre trocas de água, energia e carbono, com destaque para a técnica de covariância dos vórtices, que representa uma 'medida direta' destas trocas na atmosfera. Diferentes cultivos agrícolas tem sido estudados mundialmente através desta técnica entre eles, o milho (SOEGARD et al., 2003; SUYKER et al., 2004; MEYERS e HOLLINGER, 2004; SUYKER et al., 2005; VERMA et al., 2005; SUYKER e VERMA, 2010; KAR e KUMAR, 2010), o arroz (CAMPBELL et al., 2001; ALBERTO et al. 2011; HATALA et al. 2012), soja (MEYERS e HOLLINGER, 2004; VERMA et al., 2005; SUYKER e VERMA, 2010) e o trigo (ANTHONI et al. 2004; MOUREAUX et al. 2008; BÉZIAT et al. 2009; TALLEC et al. 2013). No Brasil, estudos envolvendo covariância dos vórtices em áreas

agrícolas, ainda são escassos (SAKAI et. al. 2004; CABRAL et. al. 2012), principalmente em regiões subtropicais. Desta forma, um dos objetivos deste trabalho é caracterizar as trocas de energia e água no cultivo de trigo (*Triticum aestivum* L. Thell) no sul do Brasil, através de dados experimentais obtidos pelo método covariância dos vórtices.

O trigo é uma das culturas agrícolas mais antigas do mundo. No Brasil, o cultivo desse cereal iniciou por volta do ano 1531 na Capitania Hereditária de São Vicente, hoje Estado de São Paulo. Devido a fatores climáticos, o trigo começou a ser cultivado em outras regiões do Brasil, porém, foi no sul que encontrou as condições adequadas de clima e solo. Em 2011, o Brasil foi considerado o segundo maior produtor, após a Argentina, e sua produção anual oscila entre 5 e 6 milhões de toneladas. O trigo é cultivado nas regiões Sul, Sudeste (MG e SP) e Centro-oeste (MS, GO e DF), sendo que 90% da produção de trigo está no sul do Brasil (Embrapa, 2012). A área total cultivada no Brasil em 2011 era de 2,16 milhões de hectares, com uma produtividade de 2.672 kg ha^{-1} (Conab, 2012).

O cultivo de trigo no Brasil ocorre principalmente no sistema de cultivo Direto, com mais de 90% da área cultivada. Neste sistema de manejo do solo, não há revolvimento do solo antes da semeadura das culturas agrícolas. O mínimo revolvimento do solo e a semeadura direta trazem benefícios para cultura, como por exemplo, a redução de perdas de água por erosão e por evaporação, a preservação da fertilidade física e biológica do solo e a promoção do sequestro de carbono no solo (BLEVINS et al. 1990; MIELNICZUK et al. 1996; STIPESEVIC e KLADIVKO, 2005; De VITA et al. 2007; VERKLER et al. 2008; ALMARAZ et al. 2009). De acordo com West e Post (2002), diversos trabalhos têm sido realizados mundialmente, focando principalmente na maior eficiência no sequestro de carbono no solo pelo sistema de cultivo Direto em comparação com o cultivo Convencional. Na região sul do Brasil trabalhos semelhantes também vêm sendo realizados para comparar o sequestro de carbono em rotação de cultura, sendo o trigo um cultivo no inverno (BODDEY et al., 2010).

Embora existam trabalhos que caracterizam as trocas de energia e água no cultivo de trigo na Europa e Ásia (ANTHONI et al, 2004; QIU et. al. 2008; MOUREAUX et al. 2008; BÉZIAT et al. 2009; TALLEC et. al. 2013; BÉZIAT et. al. 2013), a forma de cultivo nestes países é diferente do Brasil. Em países de clima frio, a cultivar passa pelo processo de vernalização, ou seja, as plantas são

induzidas a florescer através da exposição a temperaturas baixas não congelantes. Enquanto que no Brasil esse processo não ocorre, embora o trigo seja cultivado no inverno, a semente é colocada diretamente no solo e logo germina. Além disso, enfocando o sul do Brasil, temos, em geral, dois cultivos anuais, sendo soja ou milho no verão e trigo ou aveia no inverno. Assim, uma caracterização do cultivo de trigo no sul do Brasil dos processos de troca entre a superfície e atmosfera torna-se diferente daqueles praticados na Europa, visto que aqui o cultivo de trigo possui um ciclo 'semestral', enquanto que lá é 'anual'.

As condições atmosféricas locais, a energia disponível, a disponibilidade hídrica, e os fatores biológicos das plantas, entre outros fatores, controlam a evapotranspiração de um agroecossistema (SUYKER e VERMA, 2008). Existem diferentes métodos para estimativa de fluxos turbulentos, sendo atualmente a covariância dos vórtices um dos mais utilizados. No entanto, o uso de modelagem para descrever a evapotranspiração é uma necessidade crescente, haja vista a dificuldade em se obter a evapotranspiração experimentalmente (PEREIRA et. al., 1997). Neste sentido, neste trabalho também se pretende: (i) estimar a evapotranspiração em um agroecossistema de trigo na região subtropical do Brasil, (ii) utilizar a equação de Penman-Monteith para a estimativa de evapotranspiração, (iii) apresentar influência dos diferentes sistemas de cultivo na fenologia do trigo.

2 METODOLOGIA

2.1 Descrição e localização da área de estudo

O experimento foi conduzido na Cooperativa Central Gaúcha Ltda Tecnologia (CCGL-Tec), com coordenadas geográficas (28°36'S, 53°40'W, 425 m de altitude), localizada no município de Cruz Alta, que situa-se no noroeste do Rio Grande do Sul, a cerca de 347 km a oeste de Porto Alegre, a capital do Estado. A vegetação original da região da área experimental era composta por floresta aberta de araucária e pastagens naturais formadas por gramíneas, com predomínio de *Paspalum notatum* Fluegge. A partir da década de 1950 a região foi desmatada e convertida em lavouras comerciais, onde a sucessão trigo-soja foi cultivada em sistema de cultivo convencional. Em 1985, na CCGL-Tec foi instalado um experimento com o objetivo de comparar sistemas de cultivo direto e convencional, e este vem sendo realizado até hoje. As Figuras 1 e 2 mostram, respectivamente, a localização da área experimental e o croqui da área especificando a adubação utilizada. A montagem experimental na área consiste de uma matriz de 40m x 60m com parcelas dispostas aos pares, uma com o sistema de cultivo direto (SD) e a outra com o sistema de cultivo convencional (SC), Figura 3. Na parcela do SD foi instalada uma torre micrometeorológica do Projeto Sulflux ([www. sulflux.ufsm.br](http://www.sulflux.ufsm.br)), no centro desta parcela. Esta torre, pertencente ao Laboratório de Micrometeorologia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), tem a finalidade de estudar e monitorar as trocas de energia, água e CO₂ entre os agroecossistemas e a atmosfera. Medições de solo e de variáveis atmosféricas têm sido realizadas ao longo de vários anos, e essas medidas têm apoiado diferentes estudos (AMADO et al., 2006; CHAVEZ et al., 2009; FABRIZZI et al., 2009; BODDEY et al., 2010; ESCOBAR et al., 2010). A tabela 1 mostra o histórico das culturas agrícolas anteriores na área experimental desde a implantação do Projeto Sulflux.

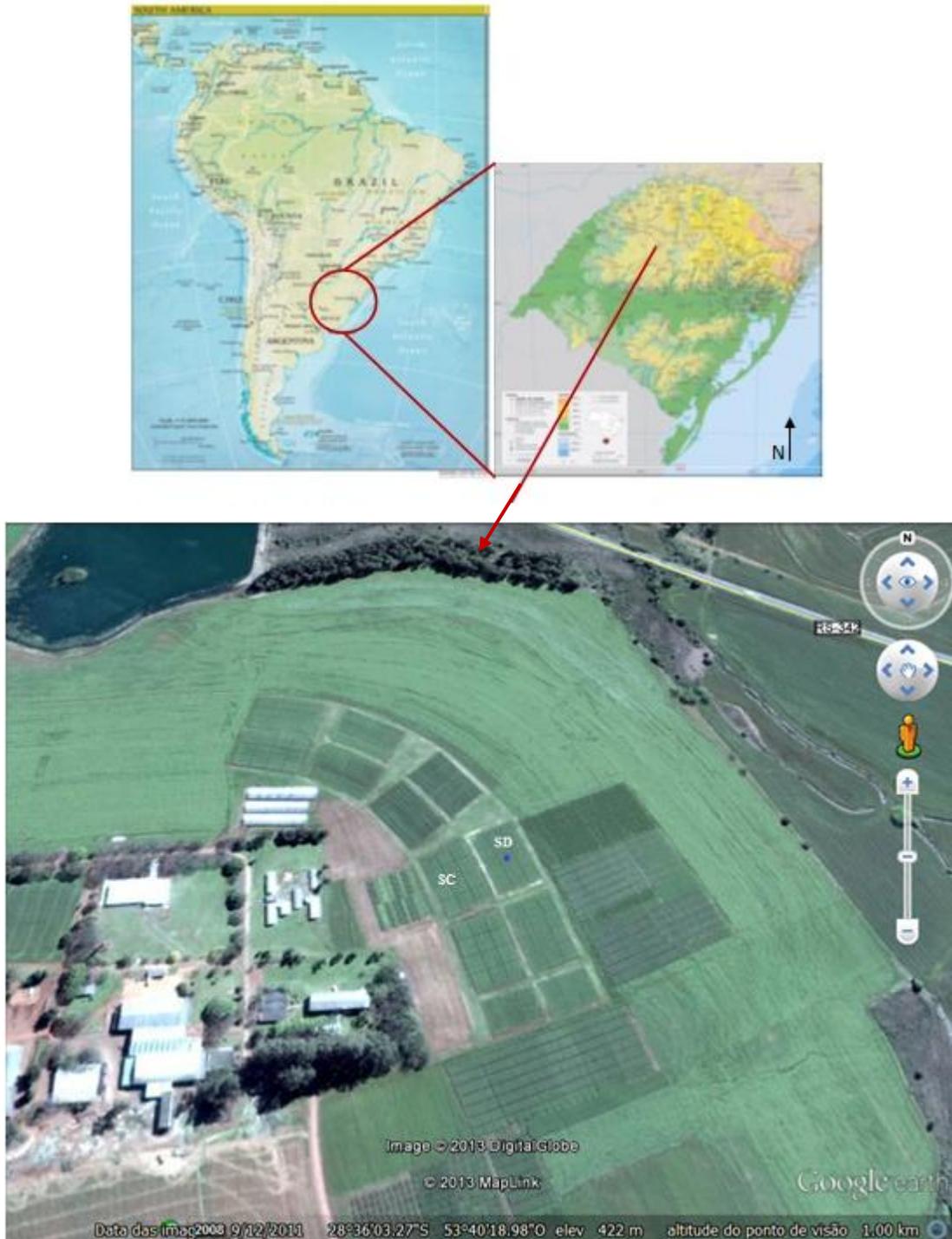


Figura 1 – Localização geográfica e vista aérea do sítio experimental em Cruz Alta – RS. Destacando as parcelas dos sistemas de cultivo convencional (SC) e direto (SD), sendo o ponto azul a representação da torre micrometeorológica. A figura não foi obtida na época da realização do experimento estudado nesta dissertação, a data da imagem é de 09 de dezembro de 2011.

Fonte: Google Earth.

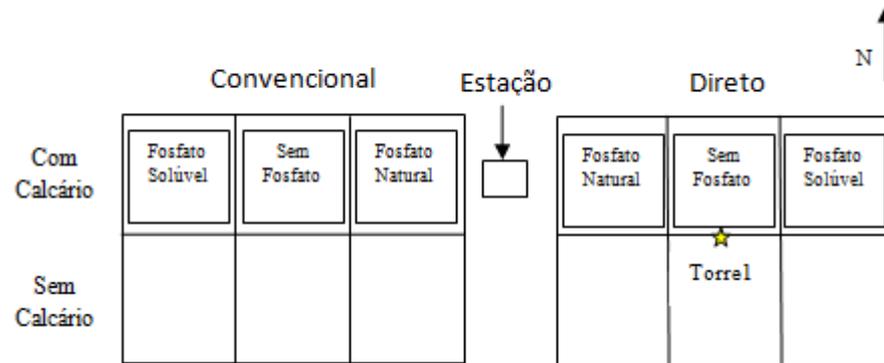


Figura 2 – Croqui do sítio experimental em Cruz Alta – RS, destacando o sistema de manejo do solo utilizado durante o experimento de cultivo do trigo nos dois sistemas de cultivo, no período de 14 de junho a 09 de novembro de 2011. A estrela representa a torre micrometeorológica instalada na parcela de SD.



(a)



(b)

Figura 3 – Trigo no sistema de cultivo: (a) Convencional (SC), observa-se a ausência dos resíduos culturais (palhada) sobre a superfície e (b) direto (SD), onde observa-se a presença dos resíduos culturais (palhada) sobre a superfície, em Cruz Alta-RS.

Tabela 1 – Informações sobre o uso do solo, desde a implantação do Projeto Sulflux, no sítio experimental de Cruz Alta.

Data	Procedimento
28/11/2008	Semeadura da soja
15/04/2009	Colheita da soja
15/06/2009	Semeadura da aveia preta
06/11/2009	Colheita da aveia preta
14/12/2009	Semeadura da soja
28/04/2010	Colheita da soja
13/05/2010	Semeadura da aveia e ervilhaca
20/09/2010	Dessecação da aveia e ervilhaca
10/01/2011	Semeadura do Milho
04/03/2011	Colheita do Milho
11/03/2011	Semeadura do Nabo forrageiro
30/05/2011	Dessecação do Nabo forrageiro
14/06/2011	Semeadura do trigo
09/11/2011	Maturação do trigo

O solo na região de estudo é classificado como latossolo vermelho distrófico típico (Embrapa, 1997; Rhodic Hapludox (FAO)). No final do ciclo da soja (2009/2010) foi realizada uma análise das propriedades físicas do solo, nas parcelas monitoradas, que resultou nas seguintes características: 520 gkg⁻¹ de argila; 240 gkg⁻¹ de silte; 240 gkg⁻¹ de areia. O manejo da área é realizado a cada nova cultura, sendo que a aplicação de calcário, fósforo (P) e potássio (K) ocorre uma vez por ano. Em maio de 2011 foi reaplicado calcário (7tha⁻¹), corrigindo PRNT (“Poder Relativo de Neutralização Total”) com 5t. As parcelas que não utilizavam calcário continuaram sem aplicação.

2.2 Medidas Fenométricas

A semeadura do trigo estudado nesta dissertação, nas parcelas monitoradas, foi realizada em 14 de junho de 2011 utilizando o cultivar FUNDACEP 300¹, na proporção de 60 sementes por metro linear com espaçamento entre linhas de 0,17m, e a colheita ocorreu em 09 de novembro de 2011, fechando um ciclo de 149 dias. Ao longo deste ciclo foram realizadas avaliações de biomassa e de área foliar, aproximadamente a cada 15 dias, totalizando oito coletas. A cada coleta de dados foram retiradas amostras de dez plantas de cada sistema de cultivo, convencional e direto, das parcelas adubadas com calcário e fosfato natural (Figura 2). As medidas de biomassa foram realizadas em duas etapas. A primeira retirando a planta verde em sua totalidade (parte aérea e raiz) e pesando cada parte (raiz, folha, caule, resíduo e espiga) separadamente. A segunda etapa, a pesagem era realizada após a secagem em estufa com temperatura controlada de 60°C. Os estádios fenológicos do trigo² foram definidos segundo a escala de Feekes e Large (LARGE, 1954), divididos nas fases de emergência, perfilhamento, crescimento, alongamento, espigamento, florescimento e amadurecimento (Figura 4).

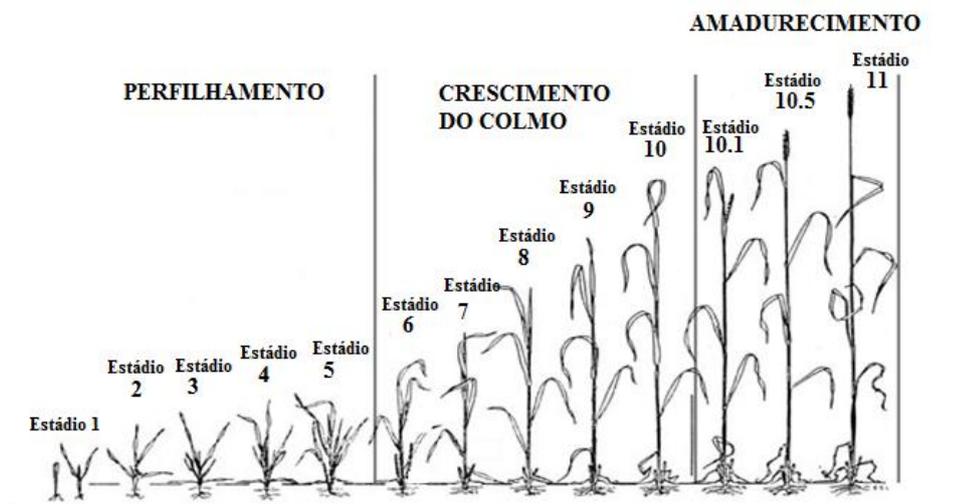


Figura 4 – Estádios fenológicos ao longo do desenvolvimento da cultura do trigo.

Fonte: Adaptado de Large, E.C. 1954. Growth stages in cereals, Plant Pathol. 3:128-129

¹ Anexo 1: Informações do cultivar extraídas do Catálogo de sementes CCGL-Tec 2011.

² Anexo 2: Detalhamento dos estádios fenológicos para o trigo, de acordo com a escala de Feekes e Large.

2.3 Índice de área foliar

O índice de área foliar (IAF) é um importante parâmetro de crescimento para uma cultura, e este é definido como a relação entre a área das folhas e a área de solo ocupada pela planta (REICHARDT et al, 2004). O IAF varia de acordo com o desenvolvimento da cultura, sendo menor na emergência e à medida que as plantas crescem atinge um valor máximo e na senescência, quando as plantas começam a perder folhas verdes, este índice diminui. O balanço de energia e a capacidade fotossintética, por exemplo, são diretamente influenciados por este parâmetro de crescimento. O IAF foi obtido utilizando a medida da área foliar de cada folha, medida pelo equipamento Portable Area Meter Li-Cor Model Li-3000A, figura 5. Considerando a área do solo como 1m^2 , a população nesta área representativa foi de 330 plantas. Como toda medida experimental, as medidas do IAF podem conter fontes de incerteza, porém o IAF é uma informação que permite comparar o desenvolvimento da cultura em cada sistema de cultivo e verificar o efeito dos fatores agrônômicos e climáticos na cultura agrícola.



Figura 5 – Equipamento Portable Area Meter Li-Cor Model Li-3000A que mede experimentalmente a área foliar.

2.4 Graus-Dia

O conceito de graus-dia baseia-se em observação de que o crescimento e o desenvolvimento das plantas em diversos ecossistemas, principalmente agrícolas, estão relacionados com o acúmulo de temperatura acima de um valor base (SOUZA, 1996). Ele é definido como o acúmulo diário da energia acima da condição mínima e abaixo da máxima exigida pela planta (OMETTO, 1981). Esta é a energia necessária para que a planta se desenvolva em um ciclo completo ou em fases fenológicas e é representada pela temperatura. A condição mínima ou máxima é definida como temperatura de base, que é a temperatura acima da qual há crescimento vegetal. O uso de graus-dia admite uma relação linear entre o acréscimo de temperatura do ar e a taxa de desenvolvimento vegetal, o que permite adotar uma temperatura-base para todo o período da cultura (CAMARGO, 1987). Muitos autores vêm utilizando este conceito com o objetivo de estimar a duração dos estádios fenológicos para várias culturas no Brasil.

Os Graus-dia de crescimento (GD) foram obtidos através da equação:

$$GD = \sum_{i=1}^n (\bar{T}_i - T_B) \quad (1)$$

sendo que: \bar{T}_i é a temperatura média diária (°C), T_B é a temperatura base para o trigo (°C) e n é o número de dias do cultivo. A temperatura de base utilizada neste trabalho foi de 5°C. Segundo Mota (1989), esta é a temperatura mínima para o crescimento do trigo.

2.5 Instrumentação e medidas atmosféricas

Os fluxos de energia na forma de calor sensível, latente e do solo foram estimados experimentalmente com janelas de 30 minutos utilizando o método de covariância dos vórtices descrito na seção 2.6. Sensores para a covariância turbulenta na torre incluíram um anemômetro sônico 3D (CSAT 3, Campbell Scientific Inc., Logan, UT, EUA) para as medições das componentes turbulentas de vento e um analisador de gás infravermelho de caminho aberto (LI7500; LI-COR Inc., Lincoln, NE, EUA) para medir as concentrações de vapor d'água, fixados a uma altura de 2.5 m e amostrados a uma frequência de 10 Hz. A figura 6 mostra a torre micrometeorológica instalada na área experimental durante a cultura do trigo.

Foram realizadas também medidas de temperatura do solo em dois níveis (4 e 3 cm de profundidade) pelo Campbell Scientific - Termopar tipo E e TCAV-L e dois sensores Kipp&Zonen – HMP01SC foram utilizados na medição dos dados de fluxo energia na forma de calor no solo, a uma profundidade de 1 cm e 4 cm. Neste trabalho foram utilizados os dados de fluxo na profundidade de 4 cm. Os dados de temperatura do ar, umidade relativa do ar, direção e intensidade do vento, precipitação e temperatura do ponto de orvalho foram coletados pela estação automática do Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet), (28.6036°W, 53.6736°S, 432m), localizada a aproximadamente 400m das parcelas experimentais.



Figura 6 – Torre micrometeorológica instalada na parcela com sistema de cultivo direto durante o período de cultivo do trigo, em Cruz Alta-RS.

2.6 Método de covariância de vórtices turbulentos

Os fluxos de energia na forma de calor latente (L_e) e calor sensível (H) foram estimados utilizando o método de covariância de vórtices (*Eddy Covariance*, em inglês). Este é um método de medição ‘direta’ que propicia uma estimativa da troca líquida de massa e energia entre a superfície e a atmosfera. É realizado calculando a correlação entre as flutuações temporais de alta frequência da velocidade vertical do vento com as flutuações temporais da velocidade do vento horizontal (fluxo de momentum), da temperatura do ar (fluxo de calor sensível), da umidade do ar (fluxo de calor latente) e da concentração de (CO_2) (fotossíntese, respiração e fotorrespiração).

Para um escalar o fluxo pode ser escrito como:

$$F_c = \overline{w\bar{c}} \quad (2)$$

sendo F_c a densidade do fluxo de c e w a componente vertical da velocidade do vento. A barra acima do termo da direita representa a média do produto das variáveis wc . Porém, como é registrada uma grande quantidade de flutuações nas medidas de velocidade do vento, temperatura e concentração, nos estudos de turbulência atmosférica, consideram-se estas variáveis como uma soma de uma componente média e outra turbulenta (BALDOCCHI et. al., 1988; MONCRIEFF et. al., 1997). Essa técnica é conhecida como decomposição de Reynolds.

Para a velocidade do vento e a concentração, aplicando esta técnica, pode-se escrever:

$$w = \bar{w} + w' \quad (3)$$

$$c = \bar{c} + c' \quad (4)$$

sendo \bar{w} e \bar{c} as componentes médias e w' e c' as componentes turbulentas da velocidade vertical do vento e da concentração da grandeza escalar c , respectivamente.

Substituindo as equações (3) e (4) em (2), temos:

$$F_c = \overline{w\bar{c}} + \overline{w'c'} \quad (5)$$

Assim o termo $\overline{w\bar{c}}$ representa o transporte pelo escoamento médio e $\overline{w'c'}$ o transporte turbulento do escoamento. A média temporal do produto de duas componentes de flutuação $\overline{w'c'}$ chama-se de fluxo turbulento. De acordo com Oke (1987), o valor médio de w é considerado nulo para superfícies planas e homogêneas. Por convenção, o valor da flutuação de w (w') é positivo no caso de movimento ascendente e negativo no caso contrário. Aplicadas as devidas simplificações (ARYA e HOLTON, 2001), obtém-se de (5) a equação de estimativa do fluxo turbulento:

$$F_c = \overline{w'c'} \quad (6)$$

O fluxo de uma grandeza escalar F_c é definido como a média do produto das flutuações da velocidade vertical (w') e da grandeza que está sendo transportada (c'). Na prática, essa técnica consiste em fazer observações em alta frequência das variáveis envolvidas no produto da equação (6). A partir de um grande número de amostras de ambas variáveis calcula-se a covariância estatística entre as duas variáveis.

Partindo-se deste princípio, os fluxos turbulentos de calor sensível (H) e latente (Le) podem ser obtidos conforme as equações a seguir (ARYA e HOLTON, 2001):

$$H = \rho c_p \overline{w'T'} \quad (7)$$

$$Le = \rho L_v \overline{w'q'} \quad (8)$$

sendo ρ a densidade do ar à pressão constante, c_p o calor específico do ar também à pressão constante, L_v o calor latente de vaporização da água, T' e q' os desvios em relação à média da temperatura do ar (K) e da umidade específica do ar (kgkg^{-1}), respectivamente.

2.7 Balanço de energia

A Camada Limite Planetária (CLP), definida como a porção da atmosfera onde os efeitos diretos da superfície sobre o processo de transporte turbulento são apreciáveis (BUSINGER, 1981), é caracterizada por movimentos turbulentos que são gerados por forçantes mecânicos e térmicos. O primeiro diz respeito ao cisalhamento do campo de velocidade do escoamento e o segundo aos efeitos térmicos gerados pelo aquecimento da superfície devido à incidência de radiação eletromagnética proveniente do Sol. A transferência de energia na forma de calor para os níveis inferiores do solo é um processo molecular que ocorre por condução, e fica restrito a pequenas profundidades, raramente atingindo alguns metros. Quando aquecidas estas camadas mais baixas da atmosfera, os processos de

convecção transferem energia para níveis elevado da CLP. Estes mecanismos responsáveis pela transferência de energia da superfície para a atmosfera são denominados fluxos turbulentos, ou seja, fluxo de energia na forma calor sensível (H) e fluxo de energia na forma de calor latente (Le).

O balanço de energia na superfície, fundamentado no princípio de conservação da energia, pode ser representado pela transferência de energia na forma de calor para aquecer a atmosfera (sensível), condensação de vapor d'água ou evaporação de água da superfície e transpiração das plantas (latente) e pela transferência de energia por condução para aquecer o solo. Assim, o balanço de energia pode ser expresso como:

$$R_n - G = H + Le \quad (9)$$

sendo R_n (Wm^{-2}) o saldo de radiação, G (Wm^{-2}) o fluxo de energia no solo, H (Wm^{-2}) o fluxo de energia na forma de calor sensível e Le (Wm^{-2}) o fluxo de energia na forma de calor latente. Como convenção, H , Le e G são positivos quando a transferência de energia é no sentido superfície-atmosfera e negativos no sentido inverso. Os lados direito e esquerdo em eq. (9) são convencionalmente definidos como a energia disponível ($R_n - G$) e fluxos turbulentos ($H + Le$), respectivamente.

A energia residual disponível (*resíduo*) foi calculada utilizando as componentes do balanço de energia conforme Ramirez et al. (2010), pela equação:

$$Resíduo = R_n - G - H - Le \quad (10)$$

O particionamento da energia em H e Le é diretamente relevante para o estudo da CLP. A relação entre estes fluxos é dada pela Razão de Bowen (β), (OKE, 1987):

$$\beta = \frac{H}{Le} \quad (11)$$

que descreve a razão entre a energia utilizada para aquecer a atmosfera e para evaporar a água. Valores médios típicos de β são de 0.1 para os oceanos tropicais;

0.1 a 0.3 para selvas úmidas tropicais; 0.4 a 0.8 para as florestas temperadas e pastagens; 2.0 a 6.0 para áreas semi-áridas, e maiores do que 10 para desertos.

Os dados podem apresentar falhas que ocorrem devido a problemas de falta de energia, problemas nos sensores e até mesmo falha humana. Neste trabalho essas falhas ocorreram e não foram preenchidas para a análise da caracterização das componentes do balanço de energia, evitando-se assim, que dados inseridos por técnicas de preenchimento influenciassem nos resultados. O preenchimento só foi utilizado para o estudo da razão de Bowen e para a estimativa da evapotranspiração experimental. A técnica utilizada para este preenchimento está descrita na seção 2.8.1. Também foi realizada filtragem nos dados para períodos que apresentaram dados fisicamente inconsistentes ou que foram superiores a média para o período do Saldo de Radiação (R_n). Os dados filtrados foram valores maiores que 500 Wm^{-2} e menores que -150 Wm^{-2} para H , valores maiores que 700 Wm^{-2} e menores que -50 Wm^{-2} para Le , e valores maiores que 600 Wm^{-2} e menores que -200 Wm^{-2} para G . Também foram retirados dados de H e Le nos horários em que houve precipitação, devido ao método utilizado para estimar estes fluxos. A percentagem de dados que resultaram desta filtragem, foi de 89.7% para H e de 88.1% para Le , ou seja, pouco mais de 10% dos dados foram descartados, o que demonstra a boa qualidade dos dados observados, visto que em vários estudos esta porcentagem é ainda maior (MOFFAT et. al., 2007, ALBERTO et. al. 2009).

2.8 Evapotranspiração

2.8.1 Preenchimento dos dados

Para a estimativa da evapotranspiração do período foi utilizada a técnica de preenchimento de dados com redes neurais. Uma rede neural é um conjunto de neurônios artificiais que utilizam algoritmos e funções matemáticas, a fim de reproduzir um neurônio biológico e suas ligações sinápticas. A arquitetura de uma rede neural pode variar bastante, conforme a aplicação e as necessidades dos usuários, bem como o algoritmo de aprendizagem utilizado para o treinamento da

rede, pois assim como o cérebro humano, a rede neural deve ser treinada, no intuito de encontrar uma relação desejada entre os dados. A rede neural pode ser modificada em sua estrutura, com o propósito de obter o resultado desejado, em alguns aspectos tais como: quantidades de neurônios; número de camadas; função de transferência e algoritmos de aprendizagem.

A técnica de preenchimento de dados utiliza a função de aprendizagem Backpropagation Levenberg-Marquardt sem realimentação. Os dados de entrada para o treinamento da rede foram saldo de radiação, temperatura e umidade relativa do ar, tendo como alvo o fluxo de energia na forma de calor latente (Le). A rede foi treinada para períodos de 10 dias, e após este treinamento utilizavam-se novamente os valores de entrada. Considerando os períodos em que não havia dados de Le , os dados modelados a partir da rede neural treinada, obtiveram um coeficiente de determinação de 92%, que conforme a classificação proposta por Moffat et. al. 2007 é qualificada como uma aproximação muito boa. Entretanto este método não foi capaz de preencher todas as falhas. E, como também não havia dados completos de saldo de radiação global na torre experimental e no Inmet, foram utilizados dados de saldo de radiação da Reanálise NCEP/NCAR (KALNAY et. al. 1996) para completar este preenchimento, conforme descrito em Papale (2011). Este conjunto de dados foi ajustado com os dados observados de saldo de radiação da torre micrometeorológica do sítio experimental em estudo. Com a realização das correções, encontrou-se a relação linear entre os dados da Reanálise e o Le experimental, para então estimar a evapotranspiração em média diária.

2.8.2 Evapotranspiração real do trigo

A taxa de evapotranspiração é controlada principalmente pelas condições atmosféricas locais, energia disponível, disponibilidade hídrica, e pelos fatores biológicos da planta (SUYKER e VERMA, 2008). O termo evapotranspiração refere-se à perda de água para a atmosfera por evaporação e transpiração dos ecossistemas.

A Evapotranspiração experimental foi estimada a partir da média de 30 minutos de Le , em Wm^{-2} , através da relação:

$$ET = \frac{Le}{L_v \rho_w} (1000)(86400) \quad (12)$$

sendo L_v o calor latente de vaporização ($2.45 \times 10^6 \text{ Jkg}^{-1}$), ρ_w é a densidade da água (998 kgm^{-3}) e a unidade para evapotranspiração é mmdia^{-1} .

2.8.3 Evapotranspiração utilizando a equação de Penman-Monteith

A Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (*Food and Agriculture Organization –FAO*) recomenda o uso do método de Penman-Monteith para a estimativa de evapotranspiração, conforme boletim FAO 56 (Allen *et al.*, 1998). A equação de Penman-Monteith associa aspectos aerodinâmicos e termodinâmicos, que incluem a resistência ao calor sensível e do vapor de água no ar, e resistência da superfície para descrever a transferência de vapor de água entre a superfície e a atmosfera. A evapotranspiração foi estimada utilizando a equação de Penman-Monteith (ET-PM) que é definida por:

$$ET - PM = \left(\frac{\Delta(Rn - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\left(\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right) \right)} \right) \quad (13)$$

sendo Rn (Wm^{-2}) o saldo de radiação na superfície, G (Wm^{-2}) o fluxo de energia na forma de calor no solo, ρ_a (kgm^{-3}) a densidade média do ar pressão constante, c_p ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$) o calor específico do ar, e_s (kPa) a pressão de vapor de saturação, e_a (kPa) pressão real de vapor, $(e_s - e_a)$ (kPa) o déficit de pressão de saturação de vapor, Δ ($\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$) a inclinação da curva de pressão de vapor, r_s (sm^{-1}) a resistência de superfície, r_a (sm^{-1}) a resistência aerodinâmica.

A estimativa da equação de Penman-Monteith resulta uma evapotranspiração em Wm^{-2} . Assim, para quantificar ET-PM em unidades de mmdia^{-1} é necessária a conversão destas unidades, conforme Anexo 1, do boletim FAO 56 (ALLEN *et al.*, 1998).

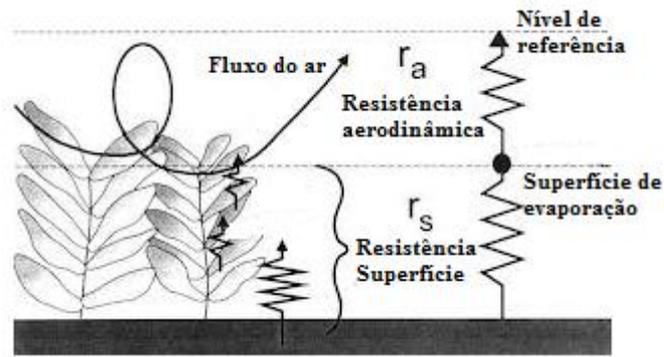


Figura 7 – Representação simplificada da resistência de superfície (bulk) e resistência aerodinâmica para o fluxo de vapor de água.

Fonte: Adaptado de FAO: (http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e06.htm#fao_penman_monteith_equation)

A resistência aerodinâmica ao transporte de calor e vapor d'água entre o dossel e a altura de referência, acima da vegetação, pode ser definida como:

$$r_a = \frac{\ln \left[\frac{z-d}{z_{0m}} \right] \ln \left[\frac{z-d}{z_{0h}} \right]}{k^2 u_z} \quad (14)$$

sendo z a altura em que é medido a velocidade do vento, d o plano de deslocamento zero parametrizado como 0,7 da altura do dossel, z_{0m} o comprimento de rugosidade do *momentum* parametrizado com 0,1 da altura da cultura, z_{0h} o comprimento de rugosidade para o vapor d'água parametrizado como 0,1 de z_{0m} , k a constante de Von Kármán, u_z a velocidade horizontal do vento na altura do sensor z .

Segundo a FAO, a equação (14) deve ser utilizada para condições neutras de estabilidade atmosférica. Sendo assim, foi realizada a correção da estabilidade atmosférica de acordo com Brutsaert (1992), com as funções Ψ_M e Ψ_H , que correspondem os fatores de correção de estabilidade para momento e calor sensível, respectivamente. Assim, a equação utilizada neste trabalho para o cálculo de resistência aerodinâmica foi:

$$r_a = \frac{\ln \left[\frac{z-d}{z_{0m}} - \Psi_M \right] \ln \left[\frac{z-d}{z_{0h}} - \Psi_H \right]}{k^2 u_z} \quad (15)$$

Para o estudo das condições atmosféricas foi utilizado o parâmetro de estabilidade ζ , conforme descrito em Campbell & Norman (1998), estimado a partir da taxa de convecção que produz turbulência mecânica do ar.

$$\zeta = -\frac{kgzH}{\rho_a c_p T u_*^3} \quad (16)$$

sendo g a aceleração da gravidade, H o fluxo de energia na forma de calor sensível, T a temperatura do ar e u_* a velocidade de fricção do ar. Atmosfera estável corresponde valores positivos de ζ , instáveis valores negativos de ζ e neutralidade atmosférica foram utilizados valores no intervalo $0 < \zeta < |0.0325|$ (LYRA & PEREIRA, 2007).

A resistência do dossel é definida como:

$$r_s = \frac{r_l}{IAF_{at}} \quad (17)$$

sendo r_l a resistência estomática, admitida neste trabalho sendo 100sm^{-1} e IAF_{at} o índice de área foliar ativo, obtido por $IAF_{at} = 0,5IAF$, sendo IAF o índice de área foliar descrito na seção 2.3 e interpolado linearmente para todos os dias de cultivo do trigo.

3 RESULTADOS

3.1 Condições Meteorológicas

Variação diária das variáveis meteorológicas precipitação acumulada e a temperatura média no período do estudo (de 14 Junho 2011 a 09 Novembro 2011) é apresentada na figura 8. A temperatura média do ar aumentou durante o período de cultivo, que teve início nos últimos dias do outono e término na primavera. A média foi de 16°C, ficando abaixo da média climatológica que é de 19°C. A temperatura mínima horária registrada foi de -1,2°C e a máxima de 33,5°C durante o ciclo do trigo. Na sementeira a temperatura estava em torno dos 10°C e na colheita por volta dos 27,5°C.

As chuvas não foram bem distribuídas ao longo do ciclo do trigo. O período que compreende o estágio de perfilhamento foi o de maior precipitação com 355,4 mm, o que corresponde a 44,4% de toda a precipitação para o período de cultivo do trigo. Contudo, entre os estágios de alongamento (81 DAS, Dias após Sementeira) e espigamento (93 DAS) houve o menor acumulado para a precipitação, de 12,2 mm. Durante o período analisado, de 149 dias, a precipitação acumulada foi de 799,6 mm, enquanto a média climatológica é de 882 mm. Os meses de julho e agosto tiveram precipitação acima da média, de 210,8 mm e 202,8 mm, respectivamente. Setembro foi o mês com menor precipitação acumulada, 49,4 mm. A tabela 2 mostra os valores de precipitação acumulada mensal. O dia mais chuvoso foi 37 DAS, no mês de julho com 82,6mm.

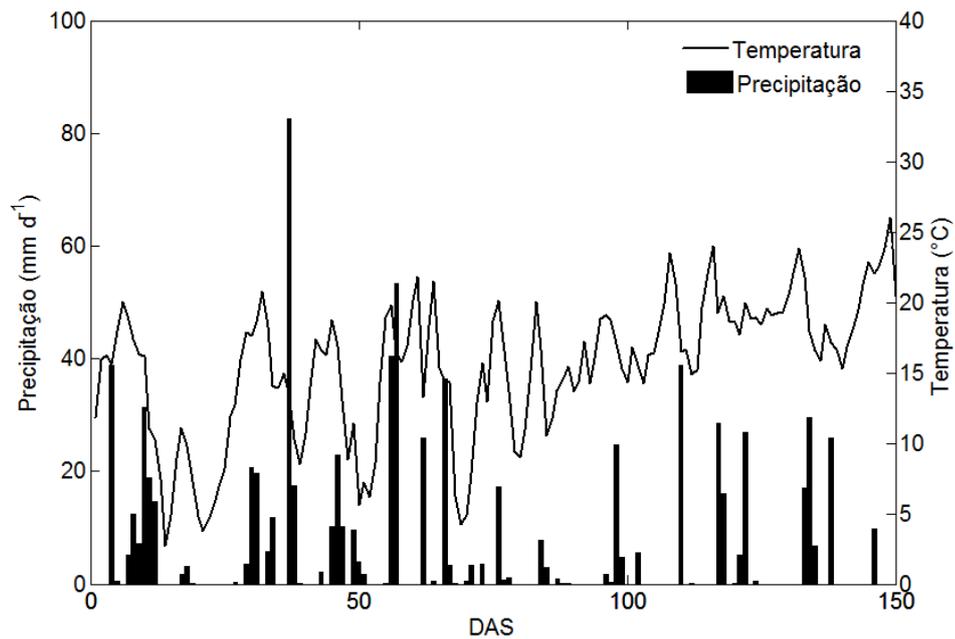


Figura 8 – Temperatura média diária e precipitação diária acumulada durante o ciclo do Trigo em função dos Dias Após Semeadura (DAS).

Tabela 2 – Valores acumulados mensais para a precipitação durante o ciclo de trigo/2011 e média climatológica de Cruz Alta-RS.

Mês	Média climatológica (mm/mês)	Precipitação acumulada (mm/mês) Trigo/2011
Junho	168	166,8*
Julho	124	210,8
Agosto	126	202,8
Setembro	158	49,4
Outubro	186	196
Novembro	120	83*

Nota. Valores acumulados para o mês, não correspondem ao período de cultivo. Para os dias de cultivo do trigo nos meses de junho (14 a 30 de junho) e novembro (01 a 09 de novembro) a precipitação acumulada foi de 130,8 mm e de 9,8 mm, respectivamente.

A umidade relativa (UR) (Figura 9a) possui uma forte dependência com a temperatura do ar. No início do ciclo de cultivo a temperatura do ar foi menor e por consequência valores maiores de UR foram registrados, mas na média para todo o

ciclo, a UR foi de 75%. Contudo, sua variação foi entre 48% e 95%, tendo valores menores no final da cultura devido a valores de temperatura do ar mais elevadas na primavera. Os valores do déficit de pressão de vapor (DPV) (Figura 9b) expressa a variação inversa da umidade relativa, ou seja, apresenta a mesma variação da temperatura do ar durante todo o período. A temperatura do ar e a temperatura do ponto de orvalho estão representadas na figura 10, na qual se pode observar que no início da cultura as duas possuem uma variação muito próxima, indicando que ar estava mais saturado. Mais para o final da cultura o ar fica menos saturado, umidade relativa do ar mais elevada, e a variação de temperatura do ar e de orvalho torna-se maior.

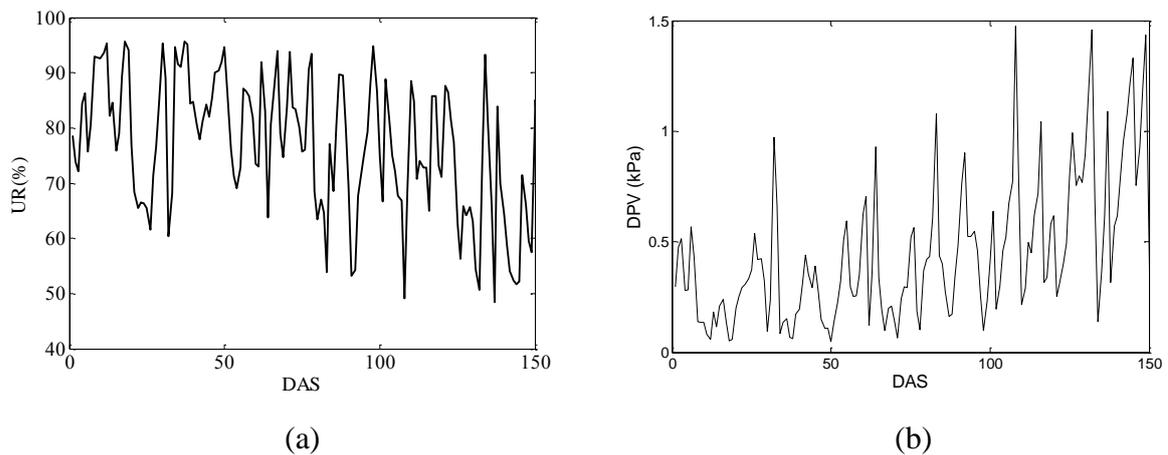


Figura 9 – (a) Umidade Relativa do ar e (b) Déficit de Pressão de Vapor durante o cultivo do trigo na área experimental de Cruz Alta no período de 14 de junho a 09 de novembro de 2011.

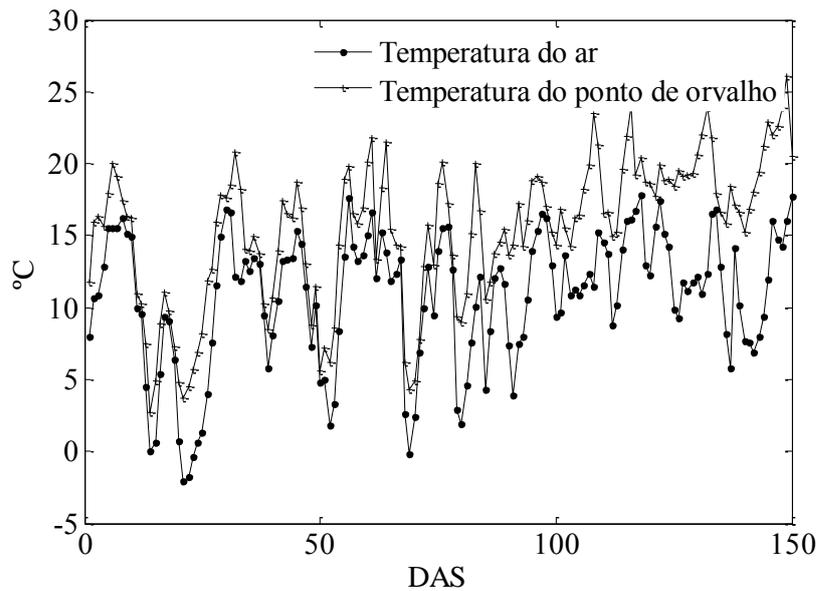


Figura 10 – Temperatura do ar e Temperatura do ponto de orvalho durante o cultivo do trigo na área experimental de Cruz Alta no período de 14 de junho a 09 de novembro de 2011.

O estudo da direção da velocidade do vento, em distribuição percentual está representado na figura 11. Observa-se o predomínio da direção da velocidade do vento na direção leste (L) com 24,7%, seguido de sudeste (SE) com 18%, nordeste (NE) com 15%. Em seguida, norte (N) e sul (S), com 8% e sudoeste (SO), oeste (O) e noroeste (NO) com 4,73%, 4,13% e 4,03%, respectivamente. A velocidade do vento predominante corresponde à faixa de $3,3 \text{ ms}^{-1}$ a $5,2 \text{ ms}^{-1}$, $1,7 \text{ ms}^{-1}$ a $3,3 \text{ ms}^{-1}$. Valores superiores a $7,4 \text{ ms}^{-1}$ não foram registradas nas direções norte (N) e noroeste (NO), na direção sudoeste (SO), a frequência foi de 0,05% por isso não aparece no gráfico. Em um diagnóstico mais detalhado da intensidade do vento, através da análise dos dados brutos, pode-se afirmar que não houve, durante o período de cultivo, ventos superiores a 13 ms^{-1} .

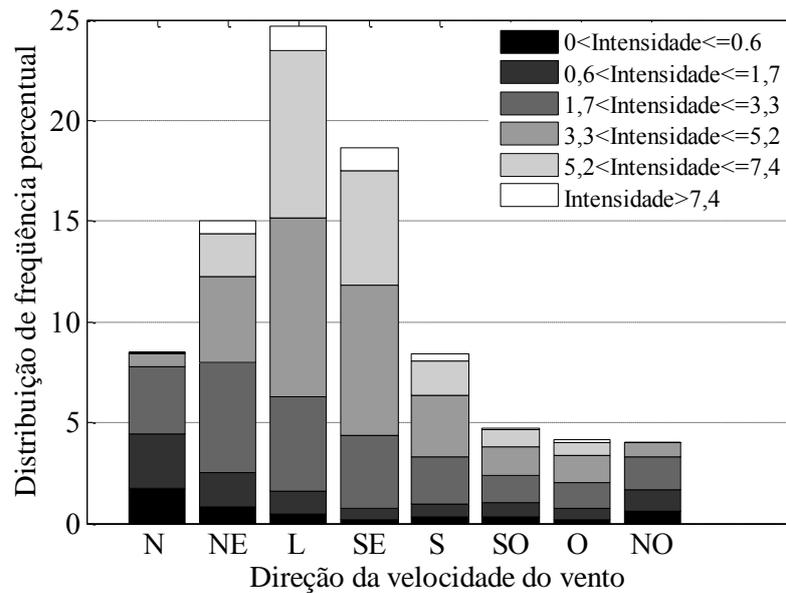


Figura 11 – Distribuição de frequência percentual da Direção da velocidade do vento para o cultivo de Trigo na área experimental em Cruz Alta no período de 14 de junho a 09 de novembro de 2011.

3.2 Dados Fenométricos

As figuras 12 e 13 mostram o índice de área foliar do trigo em função dos graus-dia acumulados para os dois sistemas de cultivo, SC e SD, respectivamente. Nota-se o crescimento do índice de área foliar até o estágio de florescimento, tendo atingido seu máximo na avaliação do dia 14 de setembro, com o IAF de 10,4 para o SD e de 12,8 para o SC. A partir deste máximo ocorreu um decréscimo de IAF até a maturação final devido à senescência das folhas, o que está de acordo com Formaggio (1989). Em geral os índices de área foliar foram maiores no SC quando comparado com o SD. As barras verticais referem-se ao desvio padrão das medidas, mostrando um maior desvio também no SC, possivelmente devido ao grande número de perfilhos, que por consequência traz um aumento no número de folhas em cada pé de trigo, resultando em uma área foliar grande. Contudo, estes valores se aproximam de estudos com cultivares de trigo como Riffkin et. al. (2001) e Tao et. al. (2004). Em comparação entre os sistemas de cultivo, o SC foi o que obteve maior produtividade com 4820 kg ha^{-1} , enquanto o SD foi de 4548 kg ha^{-1} .

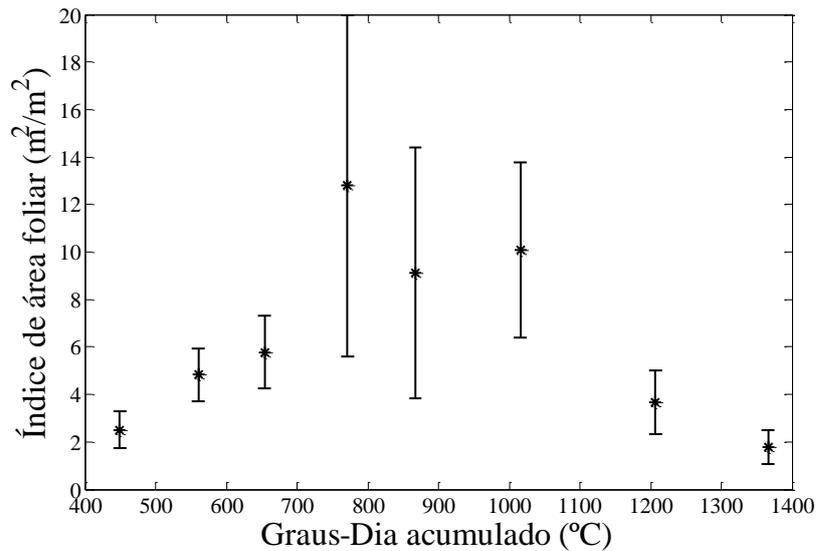


Figura 12 – Índice de área foliar do trigo em função dos Graus-dia acumulados para o sistema de cultivo Convencional (SC). As barras verticais representam o desvio padrão em relação à média.

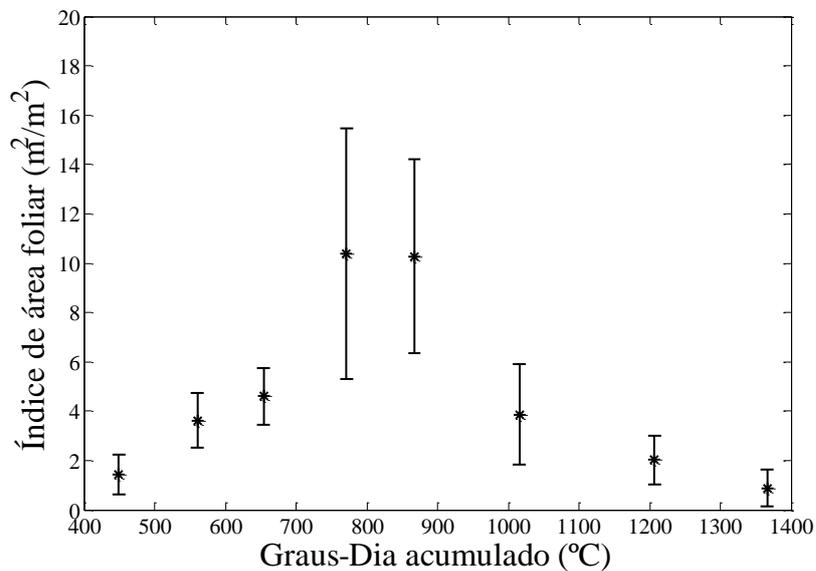


Figura 13 – Índice de área foliar do trigo em função dos Graus-dia acumulados para o sistema de cultivo Direto (SD). As barras verticais representam o desvio padrão em relação à média.

O material seco foi crescente da primeira avaliação, realizada dia 10 de agosto 2011, de $34,98 \text{ gm}^{-2}$ para o SD e $54,12 \text{ gm}^{-2}$ para o SC, até a última avaliação, dia 28 de outubro 2011, sendo de 1102 gm^{-2} para o SD e de 1670 gm^{-2}

para o SC nesta fase de maturação. As figuras 14 e 15 mostram a altura média da cultura e o material seco em função dos graus-dia acumulados para os sistemas de cultivo convencional e direto, respectivamente. Na quantificação do material seco não foi utilizado raiz, somente a parte aérea. No dia 09 de novembro, 149 DAS, não havia mais folhas verdes na cultura. Assim, neste dia foi realizada uma amostra de colheita. Foi retirado de uma área de 0,34 m², 336g de material seco sem raiz para o SC e de 396g para o SD. Nas últimas avaliações, 126 DAS até a colheita, houve ocorrência de acamamento da cultura nos dois sistemas de cultivo.

A altura máxima da planta foi de 0,85m para o SD e de 0,86 m para o SC, observando-se o crescimento da planta na medida em que os graus-dia acumularam-se, o que é esperado considerando que o conceito de graus-dia leva em consideração o efeito da energia do ambiente no desenvolvimento vegetal da planta. Os dados fenométricos foram associados a cada estágio fenológico de desenvolvimento do trigo. Na tabela 3 são apresentados os Graus-dia acumulados, no qual se pode perceber que foram necessários 1548,4 graus-dia para a cultura completar o ciclo, considerando uma temperatura base de 5°C.

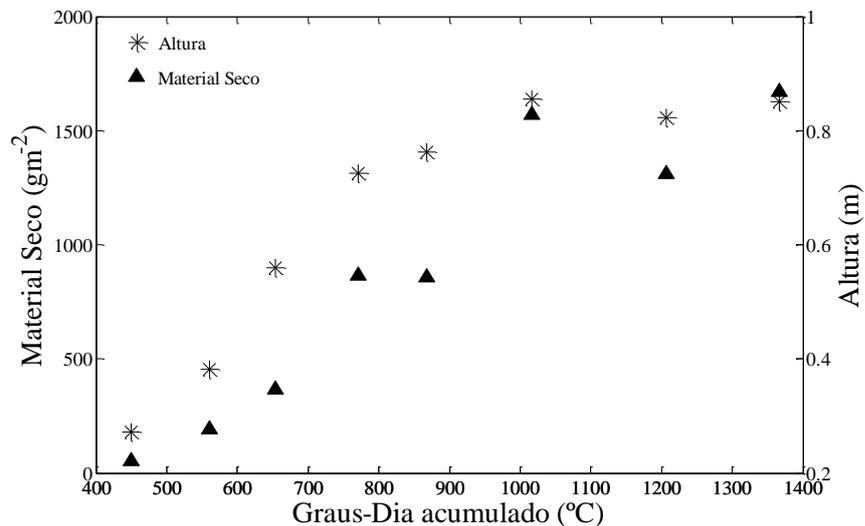


Figura 14 – Massa seca do trigo e altura média em função dos Graus-dia acumulados para o sistema de cultivo Convencional.

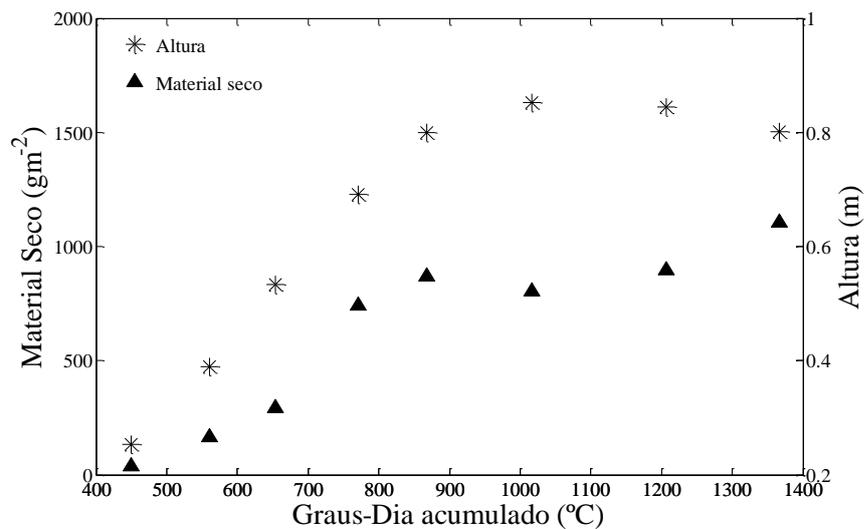


Figura 15 – Massa seca do trigo e altura média em função dos Graus-dia acumulados para o sistema de cultivo Direto.

Tabela 3 – A data da coleta, dias após semeadura (DAS), graus-dia acumulados e o estágio fenológico do trigo na referida data para o sítio experimental de Cruz Alta no período de 14 de junho a 09 de novembro de 2011.

Data	DAS	Graus-dia	Estádio Fenológico
10/08/2011	58	449,35	Perfilhamento (3)
22/08/2011	70	560,68	Elongamento (8)
02/09/2011	81	653,98	Elongamento (9)
14/09/2011	93	771,22	Espigamento (10.1)
22/09/2011	101	867,39	Espigamento (10.3)
04/10/2011	113	1016,00	Florescimento(10.5.1)
17/10/2011	126	1206,90	Amadurecimento (11.1)
28/10/2011	137	1366,50	Amadurecimento (11.2)
09/11/2011	149	1548,40	Maturação de colheita (11.4)

Nota. O número entre parênteses representa o estágio fenológico de desenvolvimento do trigo de acordo com a escala Feekes e Large descrito no anexo 2.

3.3 Balanço de energia

Os dados apresentados na figura 16 a - d são médias de 30 minutos para saldo de radiação, fluxo de energia na forma de calor no solo, calor latente e calor sensível, respectivamente. Para estas variáveis foram encontrados valores máximos de 303 Wm^{-2} para H , 519 Wm^{-2} para Le e 101 Wm^{-2} para G . Os limites inferiores para estes fluxos foram de -147 Wm^{-2} para H , -49 Wm^{-2} para Le e -58 Wm^{-2} para G . Valores médios horários são $7,66 \text{ Wm}^{-2}$, $75,1 \text{ Wm}^{-2}$ e $-1,77 \text{ Wm}^{-2}$ para H , Le e G , respectivamente. O saldo de radiação Rn , possui um máximo de 804 Wm^{-2} , mínimo de -165 Wm^{-2} e um valor médio de $70,3 \text{ Wm}^{-2}$. Os dados em médias de 30 minutos são as estimativas para os fluxos pelo método de covariância de vórtices. A partir destas figuras pode-se perceber que há alguns períodos de dados faltantes, porém para a análise de balanço de energia estes períodos não foram preenchidos.

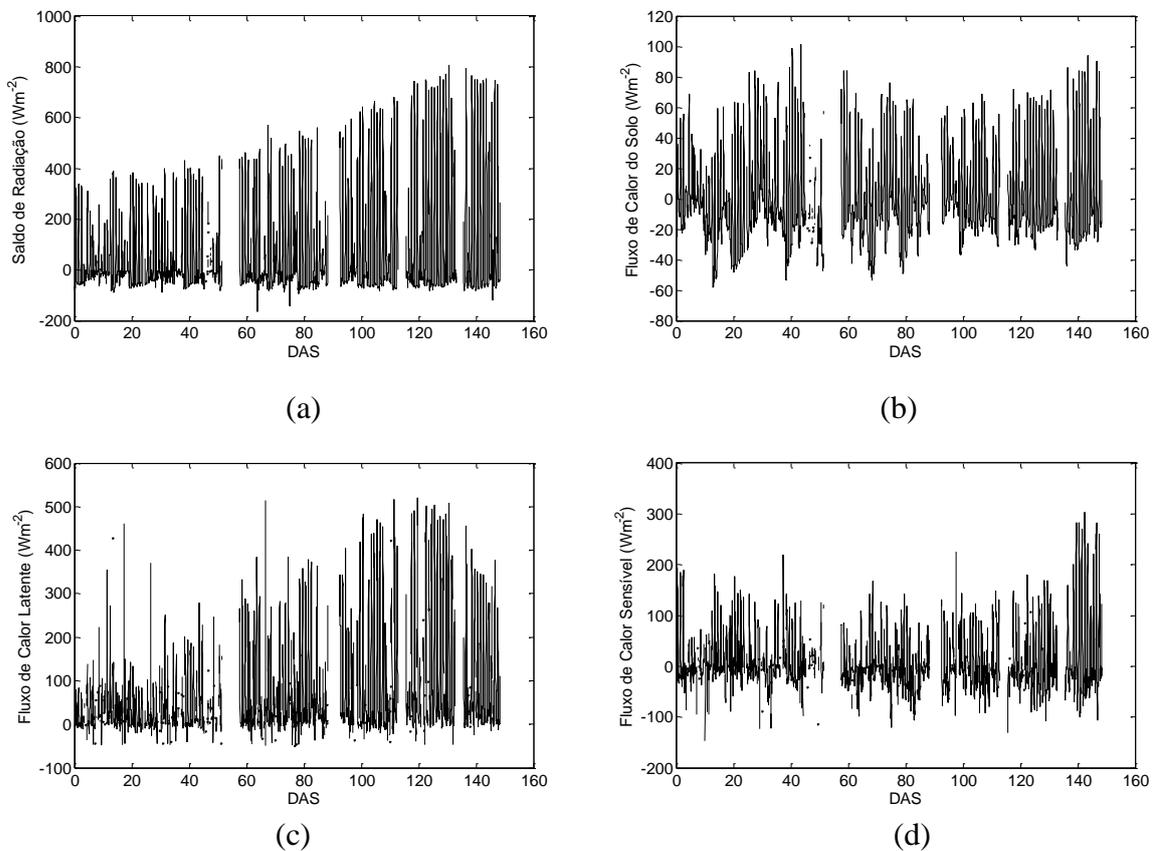


Figura 16 – (a) Saldo de Radiação; Fluxo de energia na forma de calor (b) no Solo (c) Latente (d) Sensível para o cultivo de Trigo na área experimental de Cruz Alta no período de 14 de junho a 09 de novembro de 2011.

A variação dos fluxos turbulentos em um ciclo diário médio é mostrada na figura 17. O fluxo de energia na forma de calor latente (Le), ou seja, a quantidade de energia disponível para evaporar a água é positiva durante todo o ciclo diário médio. Já o fluxo de energia na forma de calor sensível (H), possui um comportamento semelhante ao saldo de radiação, sendo à noite um fluxo de energia negativo, e durante o dia positivo, tendo uma transferência de energia da superfície para a atmosfera, este fato deve-se ao transporte de temperatura na vertical. O fluxo de energia na forma de calor no solo (G) foi positivo durante o dia, uma vez que a radiação solar aquece o solo durante o dia. Já para o período noturno este fluxo é no sentido inverso, sendo G negativo. Os valores máximos no ciclo diário médio para H é de $88,10 \text{ Wm}^{-2}$, para Le de $226,62 \text{ Wm}^{-2}$, para G de $44,6 \text{ Wm}^{-2}$ e para R_n de $367,3 \text{ Wm}^{-2}$. Já os valores mínimos encontrados são de $-25,1 \text{ Wm}^{-2}$ para H , de $7,61 \text{ Wm}^{-2}$ para Le , $-20,3 \text{ Wm}^{-2}$ para G e de -45 Wm^{-2} para R_n . As médias para o ciclo diário estão apresentadas na tabela 4, e com elas pode-se observar que além do subsolo aquecer a superfície, também houve uma advecção de mais de 15 Wm^{-2} no período de estudo para esta região. Com relação à partição de R_n , observa-se a maior fração destinada a evapotranspiração ($\frac{Le}{R_n}$). Esta fração em valor médio é de 1,03, enquanto que para $\frac{H}{R_n}$ este valor é de 0,08 e para $\frac{G}{R_n}$ é de -0,03.

O valor residual do fechamento do balanço de energia foi de menor que 3% nos estádios fenológicos e para toda a cultura foi de $-8,27 \text{ Wm}^{-2}$ na média para o ciclo diário. De acordo com Twine et. al. (2000) a falta do fechamento do balanço de energia pode estar associada com erros de estimativa nas medidas dos fluxos pelo método de covariância dos vórtices. Estudos numéricos e experimentais (KANDA et al., 2004; AUBINET et al., 2000; WILSON et al., 2002; KANEMASU et al., 1992) mostraram um não fechamento do balanço de energia em torno de 10-30%, tipicamente relacionado à subestimação dos fluxos de energia superficiais medidos pelo método de covariância dos vórtices. Aubinet et. al. (2000) relatam que o não fechamento total do balanço de energia é esperado, pois na contabilização dos resultados nem todas as trocas e processos envolvidos são considerados no sistema solo-planta-atmosfera.

O fenômeno do não fechamento do balanço de energia na superfície não é um problema técnico do método de covariância dos vórtices (FOKEN et al., 2012). Segundo os autores, este problema está relacionado com a heterogeneidade do

terreno e a sua influência sobre as trocas turbulentas. Eles ainda sugerem que os fluxos de calor sensível e latente podem ser corrigidos pelo uso da razão de Bowen, com a suposição de que a similaridade escalar é cumprida.

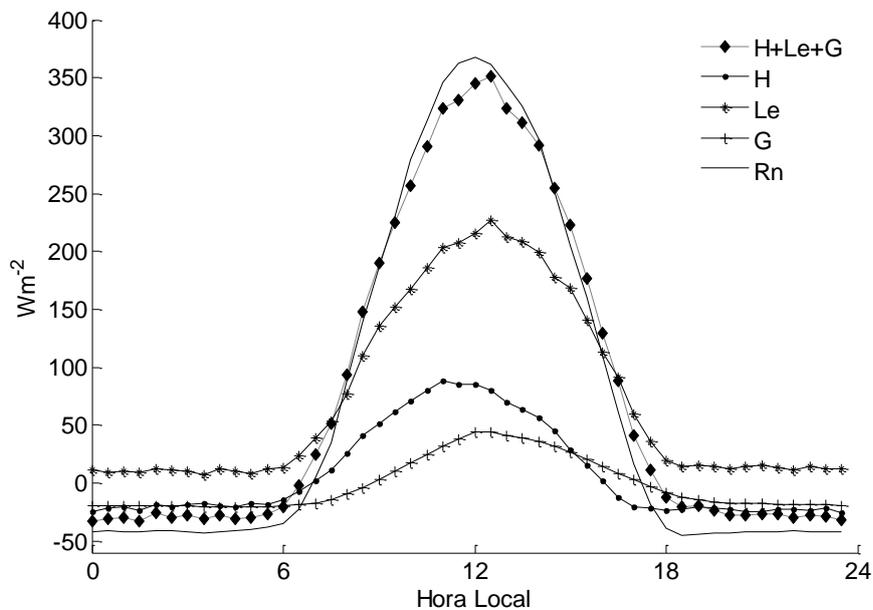


Figura 17 – Ciclo diário médio do saldo de radiação e dos fluxos de calor sensível, latente e do solo para o cultivo de Trigo no período de 14 de junho a 09 de novembro de 2011.

Tabela 4 – Médias do ciclo diário das componentes do balanço de energia para o cultivo de Trigo no período de 14 de junho a 09 de novembro de 2011.

	R_n (Wm^{-2})	Le (Wm^{-2})	H (Wm^{-2})	G (Wm^{-2})
Média	70,95	73,17	7,8	-1,72

Ao longo do período de cultivo pode-se observar que o fluxo de energia na forma de calor latente é sempre maior, há pouca contribuição para aquecer a atmosfera e assim, a energia disponível para o sistema foi utilizada basicamente para evapotranspiração. Este fato pode ser observado nas médias diárias para todo o período da cultura (Figura 18). Também se pode observar que no início do ciclo, quando a cobertura vegetal é menor e o solo está mais exposto, G possui maior magnitude quando comparado com o período onde a cobertura vegetal é maior.

Pois, à medida que a cobertura vegetal aumenta menor quantidade de radiação solar chega à superfície, uma vez que os mesmos são interceptados pelas folhas das plantas.

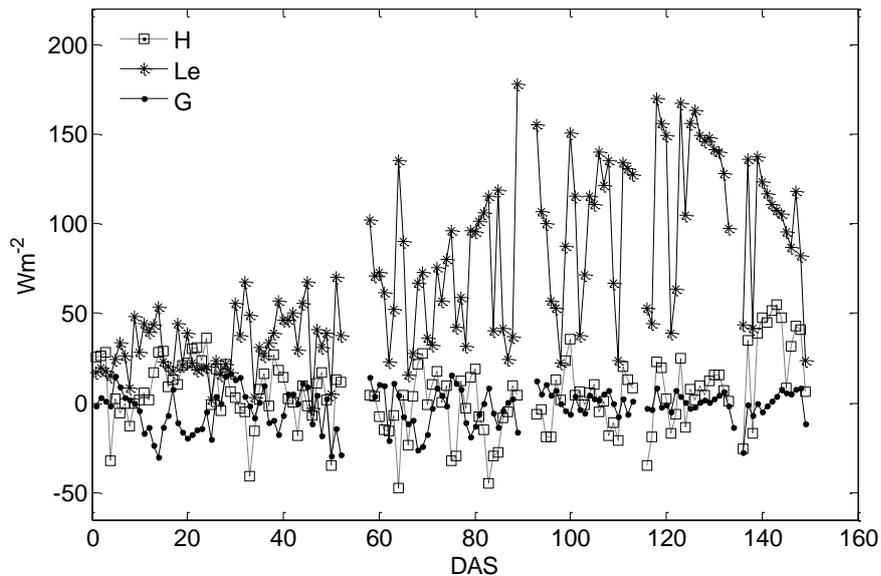


Figura 18 – Média diária dos fluxos de calor sensível, latente e do solo para o cultivo de Trigo no período de 14 de junho a 09 de novembro de 2011.

A dispersão dos fluxos turbulentos versus a energia disponível para o período, representando o fechamento do balanço de energia, é mostrada na figura 19. Pode se observar que a soma dos fluxos H e Le apresentam boa concordância com a energia disponível no sistema, portanto o balanço de energia é bem representado pelos dados experimentais. Em ambientes agrícolas, em geral, a maior parte da energia disponível é fracionada entre H ou Le . Sendo que se Le for predominante, as necessidades hídricas da cultura são atendidas (LEÃO et. al., 2007). Assim, como neste período de estudo Le é maior que H , pode-se associar que houve água disponível para a evapotranspiração da cultura. Para o período de cultura, a inclinação do ajuste linear foi de 0,84 com R^2 de 0,83. Isto indica que todo o saldo de radiação não pode ser contabilizado somente como fluxos de energia na forma de calor sensível, latente e do solo. Portanto, durante este experimento, pode-se inferir que outros fatores, como por exemplo, energia armazenada no dossel e advecção, contribuíram para uma superestimativa nos fluxos. Advecção pode resultar em

desequilíbrio energético, causando uma quantificação incompleta de fluxos turbulentos (FOKEN, 2008). Também Oncley et. al. (2007) relataram advecção em plantações de algodão como uma das principais causas para o desequilíbrio de energia. A figura 20 mostra a média diária da temperatura do solo ao longo do ciclo de cultura do trigo. Cabe ressaltar que os fluxos aqui representados foram estimados em um cultivo de trigo no SD, que permanece com resíduos das culturas anteriores (palha) durante todo o período, o que contribui para que a superfície permaneça por mais tempo úmida. A média para o período da temperatura do solo foi de 22°C, com máxima horária de 27°C e mínima de 3°C.

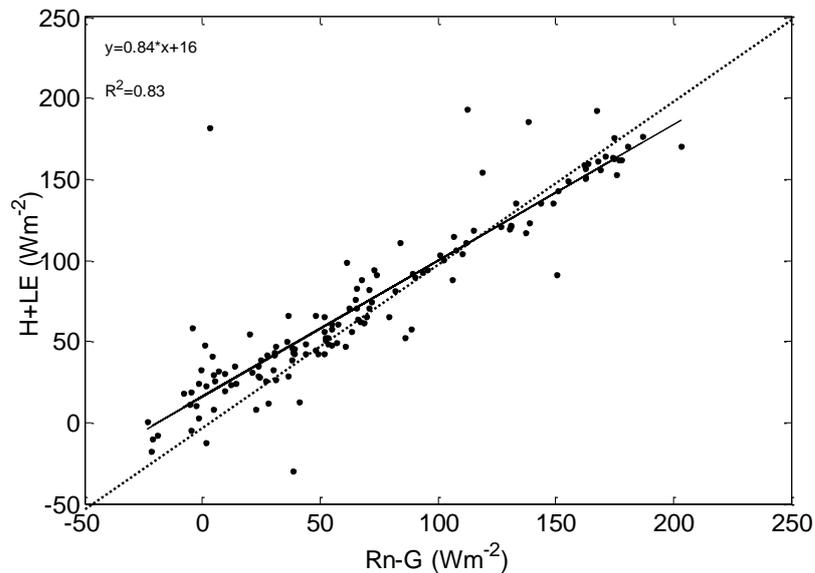


Figura 19 – Diagrama de dispersão da subtração da energia disponível (Rn) e o fluxo de energia na forma de calor no solo (G) versus a soma dos fluxos de calor sensível (H) e latente (Le) e para o cultivo de Trigo no período de 14 de junho a 09 de novembro de 2011. A linha sólida preta representa o ajuste linear dos dados. Para referência a linha 1:1 também é mostrada (linha tracejada).

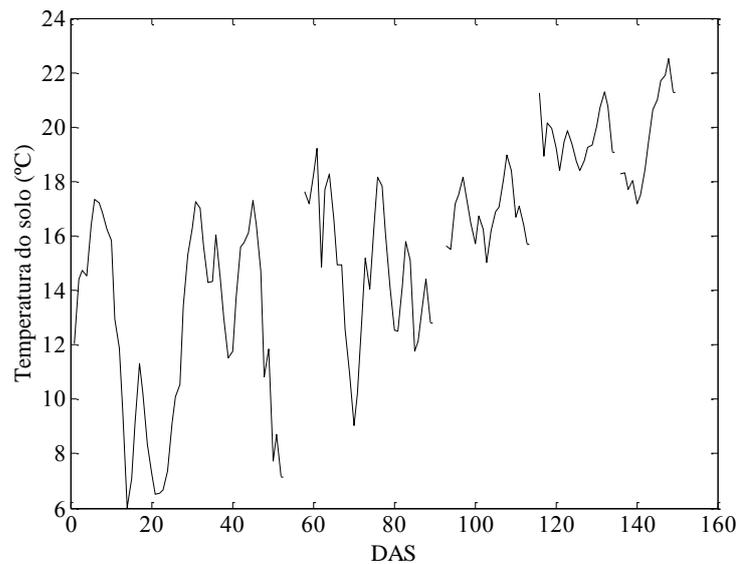


Figura 20 – Média diária da temperatura do solo medida a 3cm de profundidade para a cultura do trigo no sítio experimental de Cruz Alta-RS no período de 14 de junho a 09 de novembro de 2011.

A razão de Bowen (β) é mostrada na figura 21, e apresenta extremos entre -0,9 e 1,48. Há uma tendência de decréscimo durante o estágio de crescimento do trigo. No entanto, durante a emergência da cultura verifica-se uma instabilidade na partição da energia, quando ocorre uma grande variabilidade no β de -0,15 a 1,62. Após o dossel se desenvolver completamente, há uma estabilidade entre H e Le , e a variação até a senescência é de -0,8 a 0,4, o que representa tendências de β maiores, que segundo Suyker e Verma (2008), refletem o controle da área foliar sobre a partição de energia. Em geral, o β praticamente durante todo o período mantém-se abaixo de um, o que condiz com a análise dos fluxos, que nos mostram que o fluxo de energia na forma de calor latente é predominante sobre o fluxo de energia na forma de calor sensível, na média, a razão de Bowen é de 0,013. Pereira et. al. (1997) descreve que para superfícies úmidas, a razão de Bowen deve ser baixa, uma vez que a maior parte do Rn é utilizada para evaporar a água na superfície.

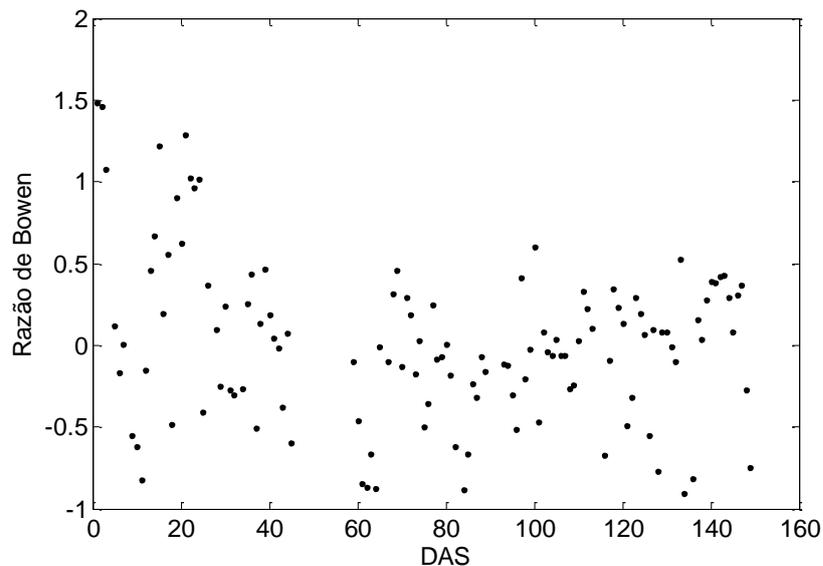


Figura 21 – Razão de Bowen para o cultivo de Trigo no período de 14 de junho a 09 de novembro de 2011.

3.4 Balanço de energia para os estádios fenológicos

As componentes do balanço de energia durante o cultivo de trigo foram caracterizadas em seis diferentes estádios: Emergência; Perfilhamento; Elongamento; Espigamento; Florescimento e Amadurecimento. A tabela 5 mostra os valores médios dos ciclos característicos para os períodos estudados. A maior parte do saldo de radiação (R_n) foi usada como fluxo de energia na forma de calor latente (Le), em média. O Le é maior que o fluxo de energia na forma de calor sensível (H) em todos os estádios analisados. Ainda pode se destacar que H é, em torno, de 30% maior que o fluxo de energia de calor no solo (G) em todos os estádios, com exceção ao estágio de Elongamento que H é negativo. Os fluxos R_n e Le aumentam a cada estágio, enquanto H e G possuem maior variação entre os períodos. Pode-se perceber durante toda a cultura que Le foi aproximadamente igual a R_n .

Tabela 5 – Médias do ciclo diário das componentes do balanço de energia, H , Le , G e Rn , e precipitação acumulada para os estádios fenológicos do Trigo. A primeira coluna mostra o estágio fenológico e a duração em dias deste estágio.

Estádio Fenológico	H (Wm^{-2})	Le (Wm^{-2})	G (Wm^{-2})	Rn (Wm^{-2})	Precipitação (mm)
Emergência (10 dias)	6,4140	22,2919	2,4651	17,9435	95,6
Perfilhamento (48 dias)	10,0360	33,5561	-5,5049	32,5774	355,4
Elongamento (23 dias)	0,2045	70,1743	-3,6533	58,0896	93,4
Espigamento (20 dias)	-6,3255	80,9905	0,4849	64,8755	43,8
Florescimento (25 dias)	4,7613	114,6112	0,1387	110,1296	122,2
Amadurecimento (23 dias)	27,93	119,1105	2,01	152,25	89,2

3.4.1 Emergência

Considera-se a data de ocorrência de emergência quando 50% das plantas estão visíveis acima do nível do solo (ZADOKS et al., 1974). A figura 22 mostra o ciclo diário médio para as componentes do balanço de energia e a energia residual durante a emergência. Neste período, o solo ficou coberto apenas com a palha dessecada da cultura anterior, tendo um fluxo de energia na forma de calor no solo (G) máximo de $30,91 Wm^{-2}$ e mínimo de $-9,85 Wm^{-2}$. Para H , o valor máximo no ciclo diário médio foi de $86 Wm^{-2}$ e mínimo de $-26,86 Wm^{-2}$. O Le e o Rn médio máximo foram de $71,25 Wm^{-2}$ e $161,6 Wm^{-2}$, respectivamente. E valores mínimos para Le e Rn de $-2,74 Wm^{-2}$ e $-37,93 Wm^{-2}$, respectivamente. O resíduo médio para este estágio foi de $-13,22 Wm^{-2}$.

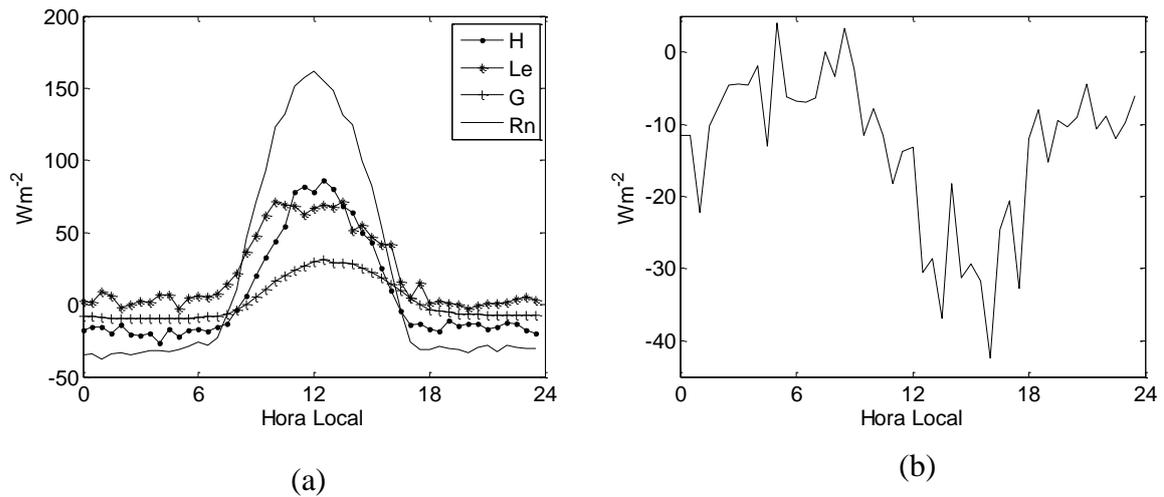


Figura 22 – (a) Ciclo diário médio das componentes do balanço de energia e (b) energia residual ($Rn - (H+Le+G)$) para o Estádio fenológico de Emergência.

3.4.2 Perfilamento

O estágio de perfilamento inicia quando os primeiros perfilhos começam a aparecer e se estende até o surgimento do segundo nó visível, o que neste estudo ocorreu por volta dos 58 DAS. Nesta fase fenológica o solo possui uma cobertura quase completa, chegando pouca radiação à superfície. A figura 23 mostra o ciclo diário médio para as componentes do balanço de energia e a energia residual durante o estágio de perfilamento. O saldo de radiação e o Le praticamente tiveram o mesmo valor médio, sendo de $33,55 Wm^{-2}$ para Le e $32,57 Wm^{-2}$ para Rn . Contudo, G obteve o menor valor médio dentre todos os estádios, de $-5,50 Wm^{-2}$, o que pode ser explicado devido à alta densidade de plantas cobrindo o solo. Valores negativos de G indicam que o solo foi uma fonte de energia para a atmosfera. H possui valores baixos durante todo o estágio fenológico sendo seu valor máximo de $86 Wm^{-2}$ e mínimo de $-18 Wm^{-2}$. O resíduo neste estágio foi de $-5,51 Wm^{-2}$.

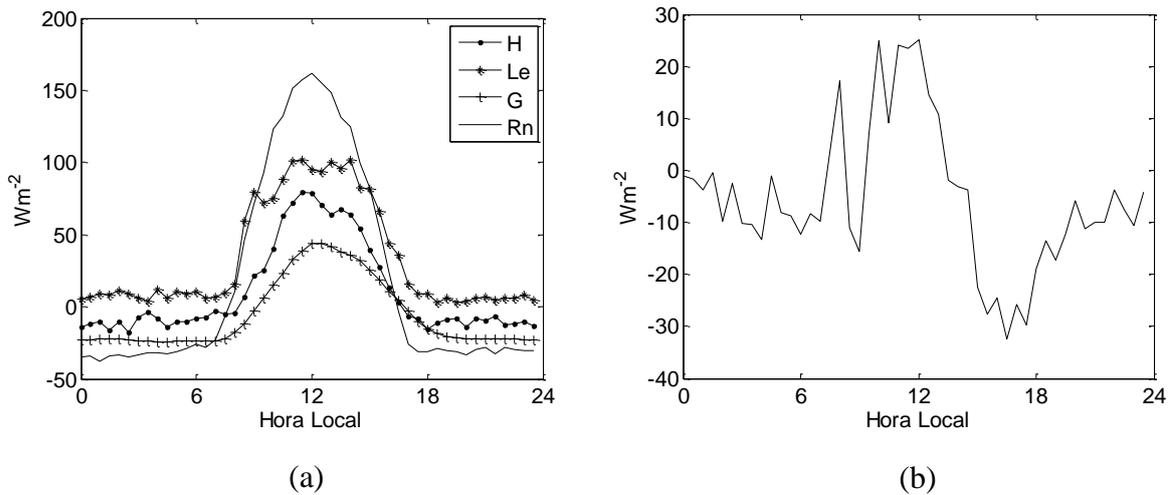


Figura 23 – (a) Ciclo diário médio das componentes do balanço de energia e (b) energia residual ($Rn - (H+Le+G)$) para o Estádio fenológico de Perflhamento.

3.4.3 Elongamento

Esta fase caracteriza-se pelo pleno crescimento do trigo, onde suas folhas crescem e o pseudocolmo torna-se ereto. A figura 24 mostra o ciclo diário médio para as componentes do balanço de energia e a energia residual durante o estágio de alongamento. Neste período, que se encontra por volta dos 70DAS, o H obteve valor médio de $0,20 Wm^{-2}$ o que comparado ao valor de Le , que foi de $70,17 Wm^{-2}$, é muito pequeno. Valores máximos de H e Le são respectivamente, $248,52 Wm^{-2}$ e $69,22 Wm^{-2}$. Enquanto Rn possui um valor máximo de $346,55 Wm^{-2}$ e G de $44,52 Wm^{-2}$. Assim como os demais estádios, Le permaneceu positivo durante todo o ciclo diário médio, sendo que na média foi 20% maior que Rn , indicando que houve advecção. O saldo residual para este estágio foi de aproximadamente $-8,64 Wm^{-2}$.

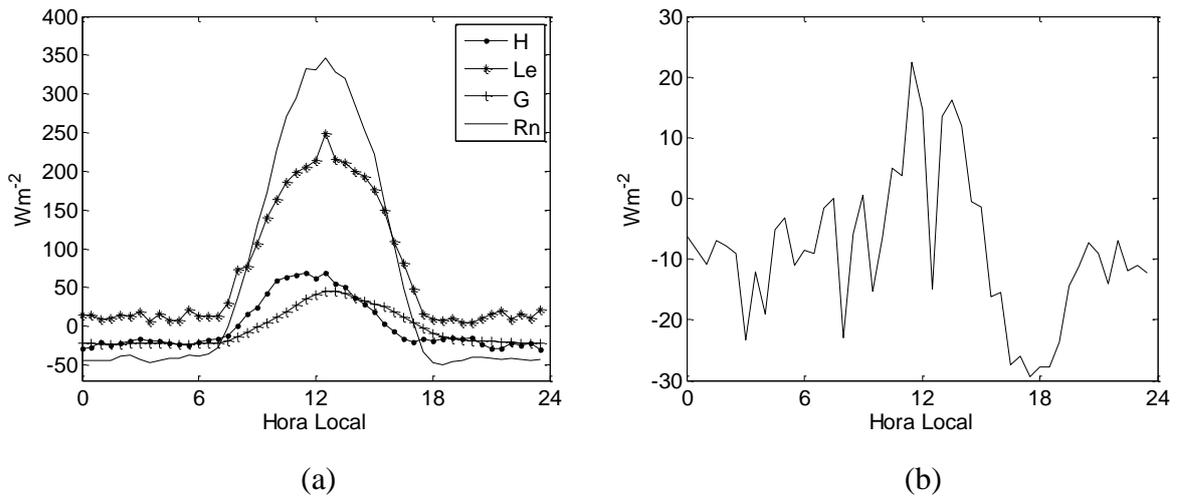


Figura 24 – (a) Ciclo diário médio das componentes do balanço de energia e (b) energia residual ($Rn - (H+Le+G)$) para o Estádio fenológico de Elongamento.

3.4.4 Espigamento

Este estágio inicia-se com a primeira espiga visível escapando da bainha e se estende até todas as espigas estarem fora da bainha. A figura 25 mostra o ciclo diário médio para as componentes do balanço de energia e a energia residual durante o estágio de espigamento. É o estágio onde houve maior IAF, o que pode explicar o alto valor médio para o Le de $80,99 Wm^{-2}$. Contudo o H obteve seu menor valor médio de $-6,32 Wm^{-2}$, com máximos e mínimos de $63,99 Wm^{-2}$ e $-33,88 Wm^{-2}$, respectivamente. Para G , seu valor máximo foi de $36,52 Wm^{-2}$ e mínimo de $-14,62 Wm^{-2}$. O Rn teve seu valor máximo de $354,86 Wm^{-2}$ e mínimo de $-44,70 Wm^{-2}$. Neste estágio o resíduo da cultura foi de $-10,27 Wm^{-2}$.

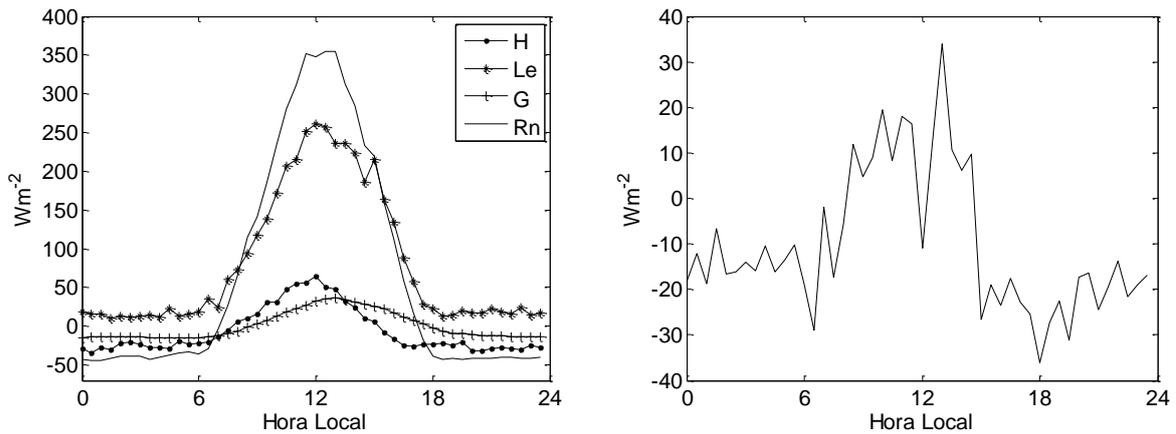


Figura 25 – (a) Ciclo diário médio das componentes do balanço de energia e (b) energia residual ($Rn - (H+Le+G)$) para o Estádio fenológico de Espigamento.

3.4.5 Florescimento

Este é o estágio do trigo onde seu crescimento está estabilizado e o IAF começa a decrescer devido à senescência das folhas. A figura 26 mostra o ciclo diário médio para as componentes do balanço de energia e a energia residual durante o estágio de florescimento. O fluxo de energia Le atinge seu valor máximo em $377,17 Wm^{-2}$ e mínimo de $4,71 Wm^{-2}$, sendo o maior valor dentre os estádios. Le é positivo durante todo o ciclo diário médio, tendo valores em torno de $20 Wm^{-2}$ no início da manhã e no início da noite. Para H o valor máximo é de $84,26 Wm^{-2}$ e mínimo de $-34,57 Wm^{-2}$. G possui uma variação pequena ao longo do ciclo, sendo seu valor máximo de $45,41 Wm^{-2}$ e mínimo de $-19,09 Wm^{-2}$. O resíduo para este estágio fenológico foi de $-9,38 Wm^{-2}$.

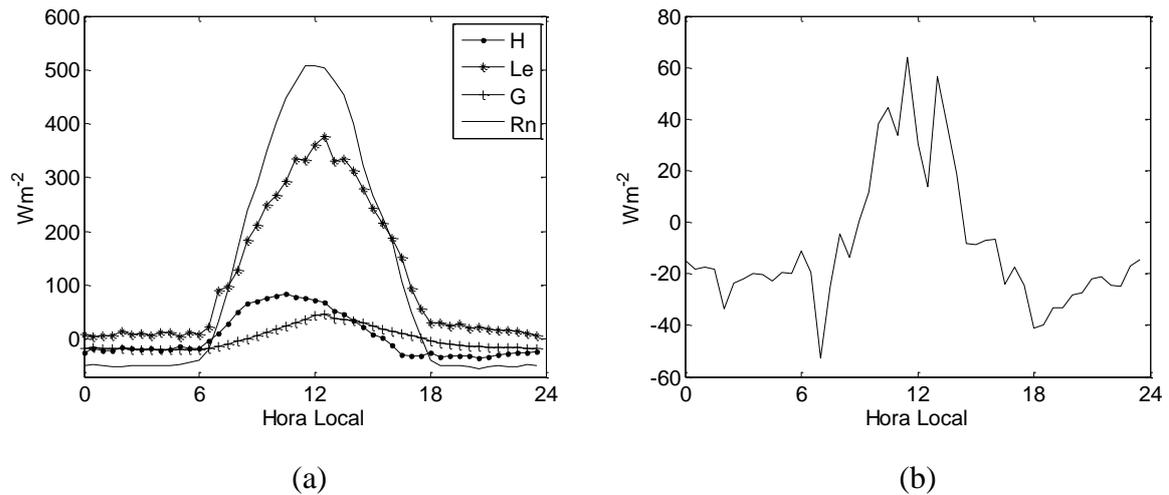


Figura 26 – (a) Ciclo diário médio das componentes do balanço de energia e (b) energia residual ($Rn - (H+Le+G)$) para o Estádio fenológico de Florescimento.

3.4.6 Amadurecimento

O estágio de amadurecimento compreende a fase de enchimento dos grãos e quando a folha começa a senescer, palha morta. A figura 27 mostra o ciclo diário médio para as componentes do balanço de energia e a energia residual durante o estágio de amadurecimento. Neste último estágio percebe-se um aumento de H , 27,93 Wm^{-2} devido à diminuição do consumo de energia disponível para a evapotranspiração. O que pode ser percebido pela diminuição de Le em seu valor médio, que foi de 119 Wm^{-2} . O Rn teve seu maior valor nesta fase de 152,25 Wm^{-2} , com maior radiação chegando à superfície o valor médio para G foi de 2,01 Wm^{-2} . O resíduo nesta fase foi de 3,20 Wm^{-2} (2% de Rn).

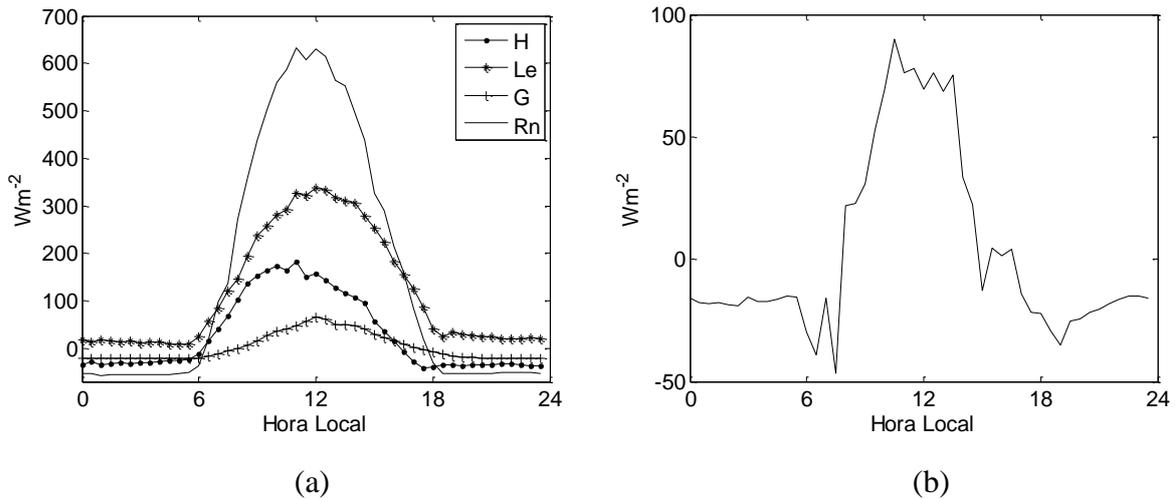


Figura 27 – (a) Ciclo diário médio das componentes do balanço de energia e (b) energia residual ($Rn - (H+Le+G)$) para o Estádio fenológico de Amadurecimento.

3.5 Evapotranspiração

A variação da evapotranspiração durante o período da cultura, em média diária, é mostrada na figura 28. Observa-se que quando ocorreu a semeadura (0 DAS), IAF foi nulo, e com isso toda evapotranspiração é atribuída à evaporação do solo, neste dia a ET foi 0,5982 mm. À medida que a planta cresce, o IAF aumenta e a fração de radiação que chega à superfície é reduzida e há um aumento na contribuição da transpiração para a evapotranspiração. Nesta fase, onde a planta já influencia nas medidas de ET, sua variação é de 1,34mm (20 DAS) até 2,41mm (113 DAS) quando começa a senescência desta cultura. Valores similares foram encontrados em estudos com trigo, como Luchiari Jr. e Riha (1991), com valores para ET de 3,6 $mm\text{dia}^{-1}$ e 3,02 $mm\text{dia}^{-1}$, respectivamente.

Em uma área agrícola a evolução no crescimento da cultura determina qual processo contribuirá mais representativamente para a evapotranspiração, ou seja, evaporação ou transpiração. Particionando a cultura nos estádios fenológicos temos a seguinte configuração: Emergência (8,29mm); Perfilhamento (54,02 mm); Elongamento (34,51 mm); Espigamento (33,13 mm); Florescimento (56,07 mm) e Amadurecimento (70,01 mm). No final da cultura, a evapotranspiração acumulada foi de 256 mm, enquanto que a precipitação total foi de 799 mm. O valor médio para a

evapotranspiração foi de $1,74 \text{ mmdia}^{-1}$ e os extremos variaram entre $-1,2$ e 5 mmdia^{-1} . A figura 29 mostra a evapotranspiração e a precipitação acumulada para o período de cultivo do trigo.

Suprindo a necessidade hídrica da cultura, na qualidade e na quantidade que necessitam para o consumo, o índice de área foliar e a variação dos elementos meteorológicos que irão determinar o fluxo evapotranspiratório. Em escala diária, o aumento da área foliar é relativamente pequeno. Portanto, a evapotranspiração sob estas condições é determinada principalmente pelas variáveis meteorológicas, as quais comandam nestes ambientes o transporte de água no sistema solo-planta-atmosfera (DAMALGO et. al., 2006).

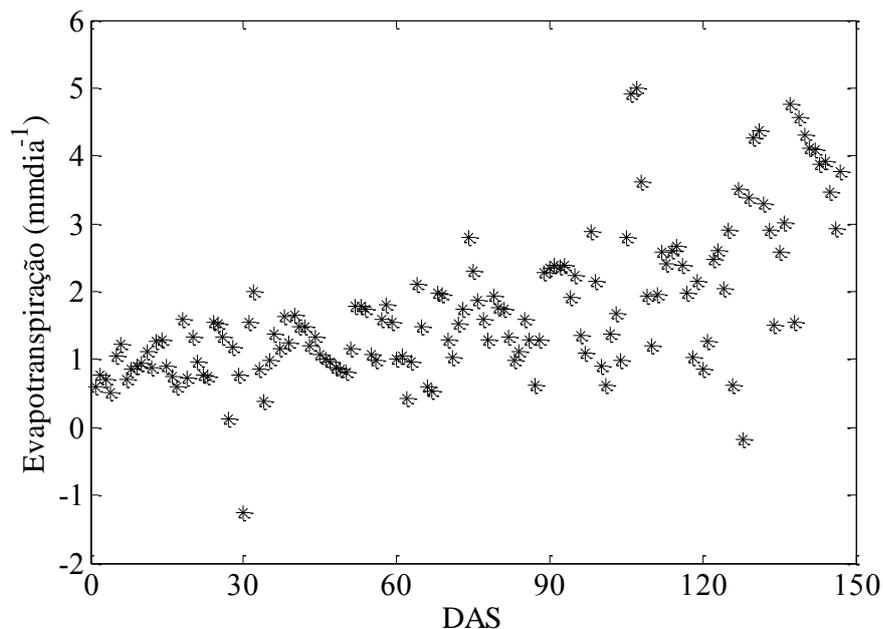


Figura 28 – Média diária da Evapotranspiração para o cultivo de Trigo no período de 14 de junho a 09 de novembro de 2011.

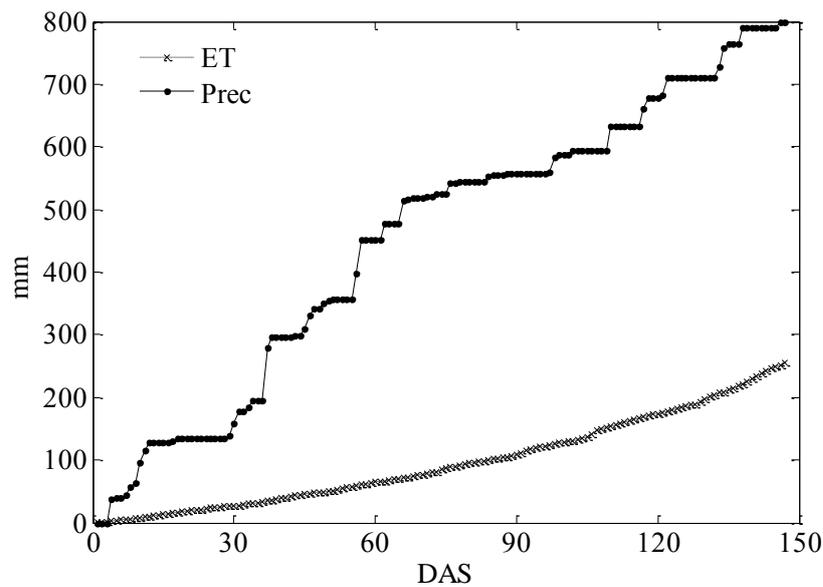


Figura 29 – Evapotranspiração e Precipitação acumulada para o cultivo de Trigo no período de 14 de junho a 09 de novembro de 2011.

A evapotranspiração calculada através da equação de Penman-Monteith, seguindo a descrição da metodologia da FAO (seção 2.8.3), e a evapotranspiração medida experimentalmente é mostrada na figura 30. Pode-se perceber que no início da cultura a evapotranspiração experimental acompanha a variação da evapotranspiração calculada através de Penman-Monteith (ET-PM). Com o decorrer da cultura do trigo e maior cobertura do solo pelas plantas, começa haver uma superestimativa da ET-PM. O erro quadrático médio associado a estas medidas é de 0,12. O acumulado para ET-PM foi de 282,72 mm enquanto que a experimental foi de 256 mm. O valor médio de ET-PM para todo o período de cultura foi de 2,09 mmdia^{-1} , já para a média nos estádios fenológicos do trigo, desde a sementeira até a emergência a ET-PM foi de 0,1 mmdia^{-1} , no perfilhamento de 0,6 mmdia^{-1} , no alongamento de 2,11 mmdia^{-1} . A partir de então, a evapotranspiração (ET-PM) média diária aumenta rapidamente para cerca de 4 mmdia^{-1} , decrescendo no final da cultura, no estágio de maturação, cerca de até 3 mmdia^{-1} .

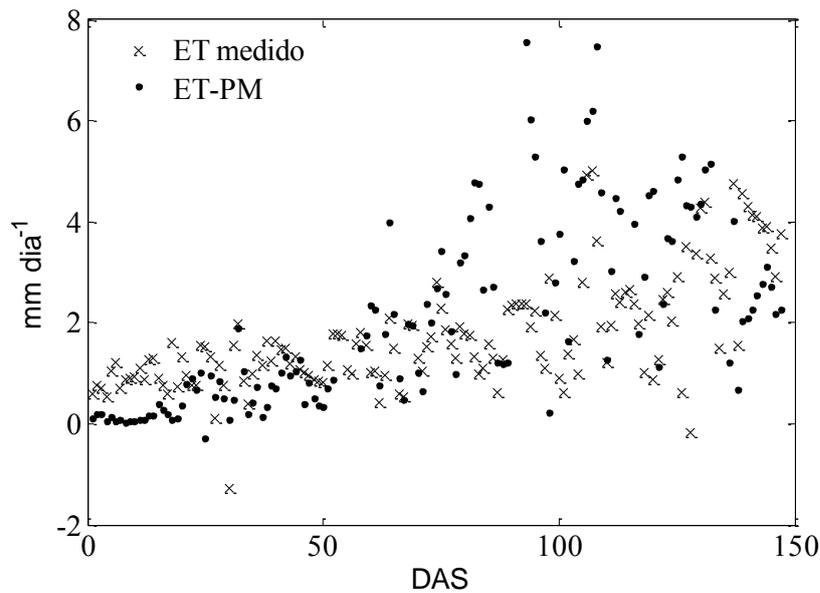


Figura 30 – Evapotranspiração medida com L_e (ET medido) e utilizando a equação de Penman-Monteith (ET-PM) em média diária para o cultivo de Trigo no período de 14 de Junho a 09 de Novembro de 2011.

Foram utilizados valores diários do parâmetro de estabilidade atmosférica (ζ) ao longo do ciclo de cultura do trigo (Figura 31), em que os valores maiores que 0 (zero) representam condições em que a atmosfera encontra-se estável, enquanto que, menores que 0 (zero) condições de instabilidade atmosférica. No início da cultura, entre 21 e 24 DAS, ocorreram os menores valores médios diários do parâmetro de estabilidade atmosférica (ζ), que indicaram condição de instabilidade atmosférica mais acentuada. A condição atmosférica durante o período foi de instabilidade, com 58% na média diária. Enquanto que a estabilidade foi de 6%, períodos com condições de neutralidade atmosférica foram 27%, o restante de 9% são dados faltantes. Nunes (2008) verificou que a energia na camada limite atmosférica representada na forma de fluxo de calor sensível (H) pode caracterizar a camada e o regime turbulento, ou seja, quando o solo com temperatura superior ao ar torna-se fonte de energia existe um fluxo positivo em que a energia térmica é transmitida para a atmosfera por condução e esta, por convecção aquecerá a CLP, constituindo a camada convectiva com predominância de movimentos verticais caracterizando condições de instabilidade. Por outro lado, quando o solo possui temperatura inferior a atmosfera, este age como sumidouro de calor e o fluxo térmico torna-se negativo formando-se a camada estável. A figura 32 mostra a

temperatura do solo em função da temperatura do ar. Nesta figura pode-se observar a clara relação de instabilidade atmosférica com temperatura do solo superior a do ar no início da cultura.

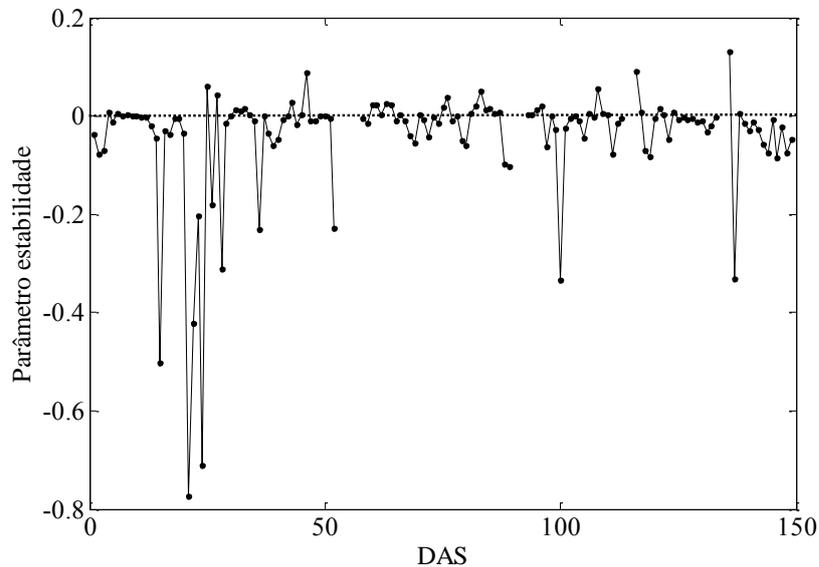


Figura 31 – Médias diárias do parâmetro de estabilidade atmosférica (ζ), em que $\zeta < 0$ representa instabilidade, $\zeta = 0$ neutralidade (linha tracejada) e $\zeta > 0$ representam estabilidade atmosférica durante o cultivo de trigo na área experimental de Cruz Alta no período de 14 de junho a 09 de novembro de 2011.

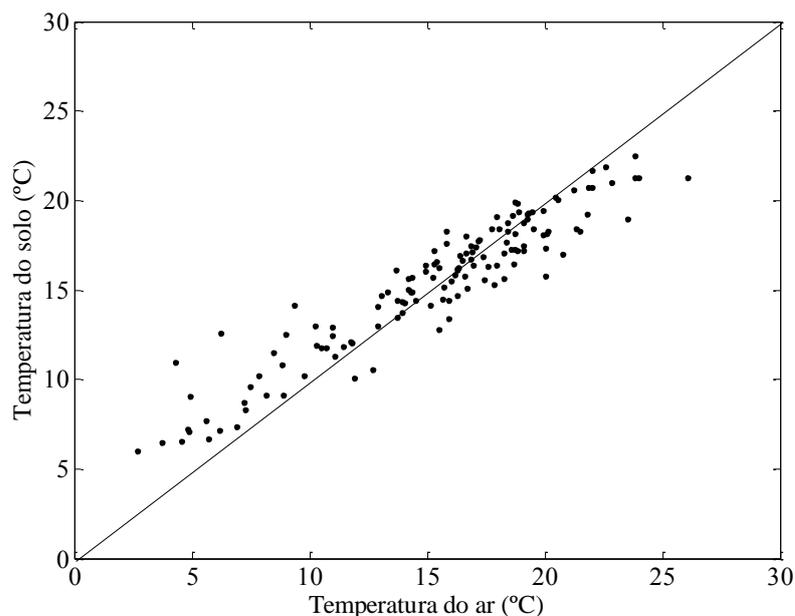


Figura 32 – Média diária da Temperatura do ar em função da Temperatura do solo durante o cultivo de trigo na área experimental de Cruz Alta no período de 14 de junho a 09 de novembro de 2011. A linha 1:1 (sólida preta) foi utilizada como referência.

As médias para as resistências aerodinâmica e de superfície foram 39.54 sm^{-1} e 378.98 sm^{-1} , respectivamente. Valores similares para a resistência aerodinâmica são obtidos para culturas agrícolas em Oke (1987). A resistência de superfície possui uma média maior que a encontrada por estes autores, 50 sm^{-1} por Hatfield (1985) e Oke (1987). Baldocchi (1994) encontrou valores superiores a 100 sm^{-1} para a resistência de superfície no trigo. A velocidade de fricção, mostrada na figura 33, pode ser caracterizada como o quanto o atrito superficial interfere na CLP, pois ela está relacionada aos fluxos verticais de momento horizontal. Assim, pode-se observar que à medida que a planta cresce a velocidade de fricção (u^*) tende a aumentar, devido à rugosidade associada ao solo. Usando u^* como um indicador simplificado do transporte de momento e para as condições de estabilidade atmosférica (FOKEN e WICHURA 1996), pode-se inferir que valores maiores de u^* pode resultar em maiores fluxos turbulentos, Le e H . O valor médio de u^* foi de $0,29 \text{ ms}^{-1}$, tendo um máximo na média diária de $0,89 \text{ ms}^{-1}$ e mínimo de $0,07 \text{ ms}^{-1}$.

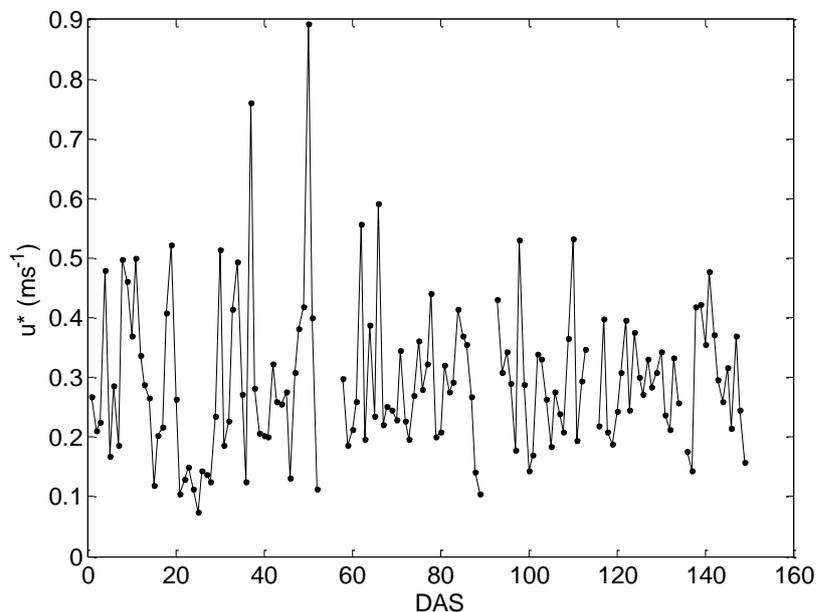


Figura 33 – Média diária da Velocidade de Fricção durante o cultivo de trigo na área experimental de Cruz Alta no período de 14 de junho a 09 de novembro de 2011.

4 CONCLUSÃO

Nesta dissertação foi apresentada uma caracterização do balanço de energia e água em uma cultura de trigo sob o sistema de cultivo direto (SD) no Sul do Brasil no período de 14 de junho a 09 de novembro de 2011. Além disso, também foram estimadas para o SD a evapotranspiração do agroecossistema de trigo, as resistências aerodinâmica e de superfície utilizadas para prever a estimativa da evapotranspiração, a evapotranspiração utilizando a equação de Penman-Monteith. Para os diferentes sistemas de cultivo, SD e SC, foi apresentada a influência destes sistemas na fenologia do trigo.

O balanço de energia para a cultura do trigo apresentou adequado fechamento, indicando que o método da covariância dos vórtices foi capaz de estimar os fluxos de energia acima do agroecossistema de modo satisfatório. As contribuições de H e Le em termos da Razão de Bowen indicaram que durante o período de cultivo do trigo não houve restrições hídricas. A maior parte da energia disponível foi utilizada para evaporar a água, ou seja, foi utilizada na forma de calor latente (Le).

Com relação à partição da energia nos estádios fenológicos da cultura do trigo, o Le foi positivo durante todo o período de cultivo do trigo em média para o ciclo diário médio. Nos estádios fenológicos de florescimento e amadurecimento, H teve seu maior valor médio, devido à diminuição do consumo de energia disponível para evapotranspiração. A energia residual foi menor que 2% em todos os estádios fenológicos, sendo na maioria deles negativo.

A evapotranspiração diária na cultura do trigo foi maior nos períodos em que o índice de área foliar (IAF) estava maior, ou seja, nos estádios fenológicos de espigamento e florescimento. A estimativa para a evapotranspiração experimental, utilizando o fluxo de energia na forma de calor latente (Le) estimado pelo método de covariância de vórtices, teve ao final do ciclo um acumulado de 256 mm. A precipitação acumulada para o período de cultivo do trigo foi de 799 mm e a umidade relativa foi alta, em média 76%. Entretanto, a evapotranspiração estimada utilizando o método Penman-Monteith teve um acumulado para os 149 dias de cultura do trigo de 282,72 mm. Ao serem comparados os dois métodos utilizados

para a estimativa de evapotranspiração pode-se perceber que no início do cultivo os valores obtidos foram aproximados. Porém, no final da cultura do trigo a evapotranspiração obtida pelo método de Penman-Monteith superestimou a evapotranspiração experimental. Possivelmente esta diferença entre os métodos está associada ao preenchimento dos dados realizado para a estimativa da evapotranspiração diária.

Para este estudo, o trigo cultivado no sistema de cultivo convencional (SC) obteve maior IAF, atingindo valor máximo de 12,8. Já para o sistema de cultivo direto o IAF máximo foi de 10,4. O mesmo não ocorreu para o material seco, SD obteve maior valor de material seco que SC, obtido em uma amostragem de colheita com área de 0,34 m², sendo de 336g SC e 396g SD. A produtividade foi muito próxima para os sistemas de cultivo, havendo pouca diferença entre os valores, de 4820 kg ha⁻¹ para o SC e 4548 kg ha⁻¹ para o SD. O cultivo do trigo nos dois sistemas de cultivo, SC e SD, sofreram acamamento na fase final de seu ciclo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERTO, M. C. R.; WASSMANN, R.; HIRANO, T.; MIYATA, A.; HATANO, R.; KUMAR, A.; PADRE, A.; AMANTE, M. Comparisons of energy balance and evapotranspiration between flooded and aerobic rice fields in the Philippines. **Agricultural Water Mana**, v. 98, p. 1417-1430, 2011.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements. **FAO Irrigation and Drainage**, Paper 56, FAO, Rome, 1998.

ALMARAZ, J. J.; ZHOU, X.; MABBOD, F.; MADRAMOOTOO, C.; ROCHETTE, P.; MA, B. L.; SMITH, D. L. Greenhouse gas fluxes Associated with soybean production under two tillage systems in southwestern Quebec. **Soil Tillage Research**, v. 104, p. 134-139, 2009.

AMADO, T. J. C.; BAYER, C.; CONCEIÇÃO, P. C.; SPAGNOLLO, E.; CAMPOS, B. H.; VEIGA, M. Potential of carbon accumulation in no-till soils with intensive use and cover crops in the southern Brazil. **Journal of Environment Quality**, v. 35, p. 1599-1607, 2006.

ANDERSON, D. E.; VERMA, S. B. Carbon dioxide, water vapor and sensible heat exchanges of a grain sorghum canopy. **Boundary Layer Meteorology**, v. 34, p. 317-331, 1986.

ANTHONI, P. M.; FREIBAUER, A.; KOLLE, O.; SCHULZE, E. D. Winter wheat carbon exchange in Thuringia, Germany. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 121, p. 55-67, 2004.

ARYA, S. P.; HOLTON, J. **Introduction to Micrometeorology**, 2. ed. San Diego, California: Academic Press, 2001.

AUBINET, M.; GRELLE, A.; IBROM, A.; RANNIK, Ü.; MONCRIEFF, J.; FOKEN, T.; KOWALSKI, A.S.; MARTIN, P. H.; BERBIGIER, P.; BERNHOFER, C.; CLEMENT, R.; ELBERS, J.; GRANIER, A.; GRÜNWARD, T.; MORGENSTERN, K.; PILEGAARD, K.; REBMANN, C.; SNIJDERS, W.; VALENTINI, R.; VESALA, T. Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: the EUROFLUX methodology, **Advances in Ecological Research**, v. 30, p. 113–175, 2000.

AUBINET, M.; VESALA, T.; PAPALE, D. (Eds.), Eddy Covariance: A Practical Guide to Measurement and Data Analysis, **Springer Atmospheric Sciences**, 2011. 438p.

BALDOCCHI, D. D.; HINCKS, B. B.; MEYERS, T. P. Measuring biosphere atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods. **Ecology**, v. 69, n. 5, p. 1331-1340, 1988.

BALDOCCHI, D.; A comparative study of mass and energy exchange rates over a closed C₃ (wheat) and an open C₄ (corn) crop: II. CO₂ exchange and water use efficiency. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 67, p. 291–321, 1994.

BÉZIAT, P.; CESCHIA, E.; DEDIEU, G. Carbon balance of a three crop succession over two cropland sites in South West France. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, p. 1628-1645, 2009.

BÉZIAT, P.; RIVALLAND, V.; TALLEC, T.; JAROSZ, N.; BOULET, G.; GENTINE, P.; CESCHIA, E. Evaluation of a simple approach for crop evapotranspiration partitioning and analysis of the water budget distribution for several crop species. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 177, p. 46-56, 2013.

BLEVINS, R. L.; FRYE, W. W.; BALWIN, P. L.; ROBERTSON, S. D. Tillage effects on sediment and soluble nutrient Losses from the Maury silt loam. **Journal of Environment Quality**, v. 19, p. 683-686, 1990.

BODDEY, R. M. et al. Carbon Accumulation in Ferralsols at depth under zero-till agriculture subtropical. **Global Change Biology**, v. 16, p. 784-795, 2010.

BRUTSAERT, W. Stability correction functions for the mean wind speed and temperature in the unstable surface layer. **Geophysical Research Letters**, v. 19, n. 5, p. 469–472, 1992.

BUSINGER, J. A. Equations and concepts. In: F. T. M. NIEUWSTADT H. VON DOP (Ed.) **Atmospheric turbulence and Air Pollution Modeling**. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1981. p. 1–36.

CABRAL, O. M. R.; ROCHA, H. R.; GASH, J. H.; LIGO, M. A. V.; TATSCH, J. D.; FREITAS, H. C.; BRASILIO, E. Water use in a sugarcane plantation. **GCB Bioenergy**, v. 4, p. 555–565, 2012.

CAMARGO, M. B. P. de; Brunini, O.; Miranda, M. A. C. Temperatura-base para cálculo dos graus-dia para cultivares de soja em São Paulo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 22, n. 2, p. 115-121, 1987.

CAMPBELL, G. S.; NORMAN, J. M. **An introduction a environmental biophysics**. 2 ed. New York: Springer. 1998. 286 p.

CAMPBELL, C. S.; HEILMAN, J. L.; MCINES, K. J.; WILSON, L. T.; MEDLEY, J. C.; WU, G.; COBER, D. R. Diel and seasonal variation in CO₂ efflux of irrigated rice. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 108, p. 15- 27, 2001.

CHAVEZ, L. F.; AMADO, T. J. C.; BAYER, C.; SCALA, N. J. L.; ESCOBAR, L. F.; FIORIN, J. E.; CAMPOS, B. C. Carbon dioxide efflux in a rhodic hapludox as affected by tillage systems in southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 325-334, 2009.

CONAB. **Safras – Grãos:** Avaliação da Safra Agrícola 2011/2012 – Quarto Levantamento de Intenção de Plantio – Janeiro/2012. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/12_01_10_10_53_02_boletim_graos_4_levantamento.pdf>. Acesso em: 24/07/2012.

DALMAGO, G. A.; HELDWEIN, A. B.; NIED, A. H.; GRIMM, E. L.; PIVETTA, C. R. Evapotranspiração máxima da cultura de pimentão em estufa plástica em função da radiação solar, da temperatura, da umidade relativa e do déficit de saturação do ar. **Ciência Rural**. Santa Maria, v. 36, n. 3, p. 785-792, 2006.

DE VITA, P.; DI PAOLO.; FECONDO, G.; DI FONZO, N.; PISANTE, M. No-tillage and conventional tillage effects on durum wheat yield, grain quality and soil moisture content in Southern Italy. **Soil Tillage Research**, v. 92, p. 69-78. 2007.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análises de solo**. Segunda edição. Ministério da Agricultura e do Abastecimento. Rio de Janeiro, 1997.

EMBRAPA – Trigo. Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/culturas/trigo/>>. Acesso em: 24/06/2012.

ESCOBAR, L. F.; AMADO, T. J.; BAYER, C.; ZANATTA, J. A.; FIORIN, J. E. Postharvest nitrous oxide emissions from a subtropical oxisol as influenced by summer crop residues and their management. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 507-516, 2010.

FABRIZZI, K. P.; RICE, C. W.; AMADO, T. J. C.; FIORIN, J.; BARBAGELATA, P.; MELCHIORI, R. Protection of soil organic C and N in temperate and tropical soils: effect of native and agroecosystems. **Biogeochemistry**, v. 92, p.129–143, 2009.

FOKEN, T.; LEUNING, R.; ONCLEY, S.R.; MAUDER, M.; AUBINET, M. Corrections and data quality control. In: Eddy Covariance: A Practical Guide to Measurement and Data Analysis, AUBINET, M.; VESALA, T.; PAPAIE, D. (Eds.), Springer Atmospheric Sciences. 2011. 438p.

FOKEN, T.; The energy balance closure problem: an overview. **Ecological Applications**, v. 18 (6), p. 1351–1367, 2008.

FOKEN, T.; WICHURA, B. Tools for quality assessment of surfacebased flux measurements. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 78, p. 83–105, 1996.

FORMAGGIO, A. R. **Características agrônômicas e espectrais para sensoriamento remoto de trigo e de feijão**. Piracicaba, 1989. 163p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

GU, L.; BALDOCCHI, D.; VERMA, S. B.; BLACK, T. A.; VESALA, T.; FALGE, E. M.; DOWTY, P. R. Advantages of diffuse radiation for terrestrial ecosystem productivity. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, p. ACL2-1–ACL2-23, 2002.

GU, L.; FALGE, E. M.; BODEN, T.; BALDOCCHI, D. D.; BLACK, T. A.; SALESKA, S. R.; SUNI, T.; VERMA, S. B.; VESALA, T.; WOFSY, S. C.; XU, L. Objective threshold determination for nighttime eddy flux filtering. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 128, p. 179-197, 2005.

HATALA, J. A.; DETTO, M.; SONNENTAG, O.; DEVEREL, S. J.; VERFAILLIE, J.; BALDOCCHI, D. D. Greenhouse gas (CO₂, CH₄, H₂O) fluxes from drained and flooded agricultural peatlands in the Sacramento-San Joaquin Delta. **Agriculture Ecosystems Environment**, v. 150, p. 1-18, 2012.

HATFIELD, J. L. Wheat canopy resistance determined by energy balance techniques. **Agronomy Journal**, v. 77, p. 279–283, 1985.

HOLLINGER, S. E.; BERNACCHI, C. J.; MEYERS, T. P. A reply to “Comment on ‘Carbon budget of mature no-till ecosystem in North Central Region of the United States’ by Dobermann et al.”. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 136, 85-87, 2006.

KALNAY, E.; KANAMITSU, M.; KISTLER, R.; COLLINS, W.; DEAVEN, D.; GANDIN, L.; IREDELL, M.; SAHA, S.; WHITE, G.; WOLLEN, J.; ZHU, Y.; CHELLIAH, M.; EBISUZAKI, W.; HIGGINS, W.; JANOWIAK, J.; MO, K. C.; ROPELEWSKI, C.; WANG, J.; LEETMAA, A.; REYNOLDS, R.; JENNE, R.; JOSEPH, D. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 77, p. 437-470, 1996.

KAIMAL, J. C.; FINNIGAN, J. J. **Atmospheric Boundary Layer Flows – Their Structure and Measurement**. New York, Oxford University Press, p. 234-240, 1994.

KANDA, M.; INAGAKI, A.; LETZEL, M. O.; RAASCH, S.; WATANABE, T. LES study of the energy imbalance problem with eddy covariance fluxes. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 110, p. 381-404, 2004.

KANEMASU, E. T.; VERMA, S. B.; SMITH, E. A.; FRITSCHEN, L. J.; WESELY, M.; FIELD, R. T.; KUSTAS, W. P.; WEAVER, H.; STEWART, J. B. GURNEY, R.; PANIN, G.; MONCRIEFF, J. B. Surface flux measurements in FIFE: An overview. **Journal of the Geophysical Research**, v. 97, p. 18547-18555, 1992.

KAR, G.; KUMAR, A. Energy balance and crop water stress in winter maize under phenology-based irrigation scheduling. **Irrigation Science**, v. 28, p. 211-220, 2010.

LARGE, E. C. Growth stages in cereals. **Plant Pathology**, London, v. 3, p.128-129, 1954.

LEÃO, I. B.; COSTA, G. B.; SOUZA, A. J. S.; BRAUNER, D. C.; FILHO, M. R. T. Balanço de energia para uma cultura de cana-de-açúcar no estado de Alagoas. **Revista Ciência & Natura Edição Especial em Micrometeorologia**, p. 95-98, 2007.

- LYRA, G. B.; PEREIRA, A. R. Dificuldades de estimativa dos parâmetros de rugosidade aerodinâmica pelo perfil logarítmico do vento sobre vegetação esparsa em região semi-árida. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 25 (2), p. 187-197, 2007.
- LUCHIARI, A. J.; RIHA, S. J.; Bulk surface resistance and its effect on evapotranspiration rates in irrigated wheat. **Agronomy Journal**, v. 83, p. 888-895, 1991.
- MEYERS, T. P.; HOLLINGER, S. E. An assessment of storage terms in the surface energy balance of maize and soybean. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 125, p. 105-115, 2004.
- MIELNICZUK, J.; TESTA, V. M.; TEIXEIRA, L. A. J.; PALADINI, F. L. S.; BAYER, C. Recuperação da produtividade do solo por sistemas de cultivos In: CURSO INTENSIVO SOBRE PLANTIO DIRETO NA PALHA, 1996, Castro. Fundação ABC. p. 116-123, 1996.
- MOFFAT, A. M. Comprehensive comparison of gap-filling techniques for eddy covariance net carbon fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 147, p. 209-232, 2007.
- MONCRIEFF, J. B.; MASSHEDER, J. M.; BRUIN; ELBERS, J. A.; FRIBORG, T.; HEUSINKVELD, B.; KABAT, P.; SCOTT, S.; SOEGAARD, H.; VERHOEF, A. A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapor and carbon dioxide. **Journal of Hydrology**, v. 188-189, p. 589-611, 1997.
- MOTA, F. S. **Agrometeorologia do trigo no Brasil**. Campinas: Sociedade Brasileira de Agronomia, 1989. 122 p.
- MOUREAUX, C.; DEBACQ, A.; HOYAUX, J.; SULEAU, M.; TOURNEUR, D.; VANCUTSEM, F.; BODSON, B. Carbon balance assessment of a Belgian winter wheat crop (*Triticum aestivum* L.). **Global Change Biology**, v. 14, p. 1353–1366, 2008.
- NUNES, A. B. **Crescimento da camada limite convectiva: estudo analítico e numérico**. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Pós-graduação em Meteorologia, INPE, São José dos Campos, 2008.
- OKE, T. R. **Boundary Layer Climates**. 2. ed. London: Taylor Francis Group, 1987. 435 p.
- OMETTO, J. C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Ed. Agronômica Ceres, 1981. 440 p.
- ONCLEY, S. P.; FOKEN, T.; VOGT, R.; KOHSIEK, W.; BRUIN, H; BERNHOFER, C.; CHRISTEN, A.; GRANTZ, D.; LEHNER, E.; LIEBETHAL, C.; LIU, H.; MAUDER, M.; PITACCO, A.; RIBEIRO, L.; WEIDINGER, T. The Energy Balance Experiment EBEX-2000 Part I: overview and energy balance. **Bound-Lay Meteorol.** 123, 1–28, 2007.

PAPALE, D. Data Gap Filling. In: *Eddy Covariance: A Practical Guide to Measurement and Data Analysis*, (Ed.), **Springer Atmospheric Sciences**. 2011. 438p.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. *Evapo(transpi)ração*. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.

QIU, G. Y.; WANG, L.; HE, X.; ZHANG, X.; CHEN, S.; CHEN, J.; YANG, Y. Water use efficiency and evapotranspiration of winter wheat and its response to irrigation regime in the north China plain. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 48, p. 1848-1859, 2008.

RAMIREZ, G. H.; HATFIELD, J. L.; PRUEGER, J. H.; SAUER, T. J. Energy balance and turbulent flux partitioning in a corn–soybean rotation in the Midwestern US. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 100, p. 79–92, 2010.

RIFKIN, P. A.; HOLDEN, S.; EVANS, P. E.; WRIGHT, A. Growth attributes for higher wheat yields in the high rainfall zone of south-western Victoria. **Australian society of agronomy**. 2001.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, Planta e atmosfera: Conceitos, Processos e Aplicações**. Barueri - SP: Editora Manole, 2004. 478p.

ROCHA, H. R.; CABRAL, O. M. R.; SILVA, D. M. A. F. et al. Atmospheric CO₂ fluxes and soil respiration measurements over sugarcane in southeast Brazil. In: **Global Climate Change and Tropical Ecosystems**. Advances in Soil Sciences (eds Lal R, Kimble JM, Stewart BA), 2000, p. 405–414. CRC Press, Boca Raton.

ROLIM, G. S.; ESCOBEDO, J. F.; OLIVEIRA, A. P. Validation of the Deardoff model for estimating energy balance components for a sugarcane crop. **Scientia Agricola**, v. 65, p. 325-334, 2008.

SHUTTLEWORTH, W. J. **Terrestrial Hydrometeorology**. Hoboken: Wiley-Blackwell 2012. 448p.

SOUZA, A. Relação entre estádios fenológicos de três cultivares de arroz e Graus – Dia e dias de calendário para a microregião de Dourados – MS. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 11, p. 18-24, 1996.

STIPESEVIC, B.; KLADIVKO, E.J. Effects of winter wheat cover on soil moisture teams desiccation, temperature and early maize growth. **Plant Soil Environment**, n. 51, v. 6, p. 255-261, 2005.

SUYKER, A. E.; VERMA, S. B.; BURBA, G. G.; ARKEBAWER, T. J.; WALTERS, D. T.; HUBBARD, K. G. Growing season carbon dioxide exchange in irrigated and rainfed maize. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 124, p. 1-13, 2004.

SUYKER, A. E.; VERMA, S. B.; BURBA, G. G.; ARKEBAUER, T. J. Gross primary production and ecosystem respiration of irrigated maize and irrigated soybean during a growing season. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 131, p. 180–190, 2005.

SUYKER, A. E.; VERMA, S. B. Interannual water vapor and energy exchange in an irrigated maize-based agroecosystem. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 148, p. 417-427, 2008.

SUYKER, A. E.; VERMA, S. B. Coupling of carbon dioxide and water vapor exchanges of irrigated and rainfed maize–soybean cropping systems and water productivity. ***Agricultural and Forest Meteorology***, v. 150, p. 553- 563, 2010.

SOEGARD, H.; JENSEN, N. O.; BOEGH, E.; HASAGER, C. B.; SCHELDE, K.; THOMSEN, A. Carbon dioxide exchange over agricultural landscape using eddy correlation and footprint modeling. ***Agricultural and Forest Meteorology***, v. 114, p. 153-173, 2003.

SCHUEPP, P. H. et al. Footprint predictions of scalar fluxes from analytical solution of the diffusion equation. ***Boundary-Layer Meteorology***, v. 50, p. 355–373, 1990.

STULL, R. P., ***Meteorology for Scientists and Engineers***. Brooks/Cole. 2000. 502 p.

TAO, L.; REN, J. Wheat growth and yield under different depth film-bottomed cultivation in sandy land. ***Soil and Tillage Research***, v. 76 (2), p. 139-145. 2004.

TALLEC, T.; BÉZIAT, P.; JAROSZ, N.; RIVALLAND, V.; CESCHIA, E. Crops' water use efficiencies in temperate climate: Comparison of stand, ecosystem and agronomical approaches. ***Agricultural and Forest Meteorology***, v. 168, p. 69-81, 2013.

TWINE, T. E. et al. Correcting eddy-covariance flux estimates over grassland. ***Agricultural and Forest Meteorology***, v. 103, p. 279-300, 2000.

VERKLER, T. L. Residue management and water delivery season-long effects on surface soil water dynamics in soybean. ***Soil Science***, v. 173, p. 444-455, 2008.

VERMA, S. B.; DOBERMANN, A.; CASSMAN, K. G.; WALTERS, D. T.; KNOPS, J. M.; ARKEBAUER, T. J.; SUYKER, A. E.; BURBA, G. G.; AMOS, B.; YANG, H.; GINTING, D.; HUBBARD, K. G.; GITELSON, A.; WATERSHEA, E. A. Annual carbon dioxide exchange in irrigated and rainfed maizebased agroecosystems. ***Agricultural and Forest Meteorology***, v. 131, p. 77-96, 2005.

WEST, T.O.; POST, W. M. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: a global data analysis. ***Soil Science Society of American Journal***, v. 66, p. 1930-1946, 2002.

WILSON, K. B. et al. Energy balance closure at FLUXNET sites. ***Agricultural and Forest Meteorology***, v. 113, p. 223-234, 2002.

ZADOKS, J. C.; CHANG, T. T; KONZAK, C. F. A decimal code for the growth stages of cereals. ***Weed Research***, Oxford, v. 14, n. 6, p. 415-421, nov./dez. 1974.

ANEXOS

ANEXO 1 – Características Agronômicas da Cultivar Fundacep 300

CARACTERÍSTICAS AGRONÔMICAS

Ciclo:			Médio		
Floração Plena (dias)			Maturação de colheita (dias)		
RS, SC(1,2) PR (1)	PR, SP (2)	PR, SP, MS (3)	RS, SC(1,2) PR (1)	PR, SP (2)	PR, SP, MS (3)
90	—	—	139	—	—
Estatura da planta:			Média		
Reação ao acamamento:			Moderadamente Resistente		
Reação à debulha natural:			Moderadamente Resistente		

QUALIDADE INDUSTRIAL

Classificação: Trigo Básico W médio = 150 Variação (120-180)	
Cor L*Média: 91,0	Estabilidade média: 5'
Peso de mil grãos (média): 33,0g	
Geminação natural na espiga:	Moderadamente Suscetível

REAÇÃO ÀS DOENÇAS

Oídio:	Resistente
Ferrugem da folha:	Suscetível
Manchas foliares:	Moderadamente Resistente
Giberela:	Moderadamente Suscetível
Vírus do mosaico:	Moderadamente Resistente
Vírus do nanismo:	Moderadamente Suscetível
Brusone:	Sem Informação

SUGESTÃO DE CULTIVO

- Pode ser utilizado para cultivo em áreas com menor tecnologia;
- Utilizar população de plantas elevada;
- Densidade: 330 a 350 plantas/m²;
- Dose de N indicada 80 a 90 Kg/ha.

O catálogo de sementes completo está disponível em:

http://www.ccgl.com.br/tec/sistemas/sessoes/arquivos/arquivos/Catalogo_CultivaresTrigo_2011.pdf

ANEXO 2 – Escala modificada de Feekes & Large, para caracterização de estádios de desenvolvimento do trigo

Estádio	Característica	Etapa
1	Emergência do coleótipo e das primeiras folhas	
2	Início do perfilhamento	Perfilhamento
3	Perfilhos formados. Folhas frequentemente torcidas, espiraladas.	
4	Início da ereção do pseudocolmo (formado pelas bainhas)	Crescimento do colmo
5	Pseudocolmo ereto	
6	Primeiro nó do colmo visível	
7	Segundo nó do colmo visível	
8	Folha bandeira visível	
9	Lígula da folha bandeira visível	
10	Emborrachamento	Espigamento
10.1	Primeira espiga recém-visível escapando da bainha	
10.2	¼ do espigamento completo	
10.3	½ do espigamento completo	
10.4	¾ do espigamento completo	
10.5	Todas as espigas fora da bainha	
10.5.1	Início do florescimento	Florescimento
10.5.2	Florescimento até o topo da espiga	
10.5.3	Florescimento até a base da espiga	
10.5.4	Florescimento completo. Início da formação do grão.	
11.1	Grão leitoso	Amadurecimento
11.2	Conteúdo do grão macio e úmido (massa mole)	
11.3	Grão duro (massa dura)	
11.4	Ponto de colheita. Grão maduro. Palha morta.	