

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

**BALANÇO DE ÁGUA NO CICLO DA CULTURA DE
SOJA: REPRESENTAÇÃO NO MODELO DE
VEGETAÇÃO DINÂMICA AGRO-IBIS**

TESE DE DOUTORADO

Virnei Silva Moreira

Santa Maria, RS, Brasil

2012

**BALANÇO DE ÁGUA NO CICLO DA CULTURA DE SOJA:
REPRESENTAÇÃO NO MODELO DE VEGETAÇÃO
DINÂMICA AGRO-IBIS**

Virnei Silva Moreira

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Física, Área de Concentração em Áreas Clássicas da Fenomenologia e suas Aplicações, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de
Doutor em Física.

**Orientador: Prof. Dr. Gervásio Annes Degrazia
Co-Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Débora Regina Roberti**

Santa Maria, RS, Brasil

2012

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

**A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Tese de Doutorado**

**BALANÇO DE ÁGUA NO CICLO DA CULTURA DE SOJA:
REPRESENTAÇÃO NO MODELO DE VEGETAÇÃO DINÂMICA
AGRO-IBIS**

elaborada por
Virnei Silva Moreira

como requisito parcial para obtenção do grau de
Doutor em Física

COMISSÃO EXAMINADORA:

Gervásio Annes Degrazia, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Débora Regina Roberti, Dr^a. (UFSM)
(Co-Orientadora)

Hans Rogério Zimmermann, Dr. (UFSM)

Otávio Costa Acevedo, Dr. (UFSM)

Hewley Maria Acioli Imbuzeiro, Dr^a. (UFV)

Santa Maria, 17 de julho de 2012.

DEDICO

À minha mãe,
Que convenceu-me de que sou capaz de sedimentar
Meu próprio caminho,
A cada passo, rumo ao meu objetivo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todas as pessoas que, de alguma forma ou de outra, contribuíram para o desenvolvimento do trabalho.

Ao professor Gervásio Annes Degrazia, meu orientador desde a iniciação científica, pelo incentivo e amizade, principalmente com sua contribuição na minha formação acadêmica, quanto na formação como cidadão.

À professora e co-orientadora Débora, considerada uma irmã, pela amizade, conselhos, dedicação, ensinamentos transmitidos, oportunidades oferecidas e principalmente paciência excessiva.

Aos professores do Laboratório de Micrometeorologia e Programa de Pós-Graduação em Física, que colaboraram para a minha formação.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo suporte financeiro.

À UFSM, pela oportunidade.

Ao período que realizei doutorado sanduíche, gostaria de agradecer ao professor Luiz Antonio Cândido, que possibilitou a minha estadia em Manaus – AM, junto ao INPA para dar continuidade e evolução ao meu trabalho.

Aos meus pais e irmãos, pelo carinho, incentivo e apoio em todas as fases da minha vida.

Aos meus colegas e amigos do Laboratório de Micrometeorologia.

A todos os meus amigos que em vários momentos ajudaram-me com palavras, presença ou até mesmo com cerveja, em especial: Andréa Timm, Boca e Bixo.

À Larissa Porto, que durante minha caminhada de doutorado sempre esteve ao meu lado, incentivando e apoiando minhas idéias e sabendo dividir as angústias.

À Deus, que sempre me deu coragem e força para trilhar meu caminho, seja quais desafios o cruzassem.

Ninguém é igual a ninguém. Todo o ser humano é um estranho ímpar.
“Carlos Drummond de Andrade”

RESUMO

Tese de Doutorado
Programa de Pós-Graduação em Física
Universidade Federal de Santa Maria

BALANÇO DE ÁGUA NO CICLO DA CULTURA DE SOJA: REPRESENTAÇÃO NO MODELO DE VEGETAÇÃO DINÂMICA AGRO-IBIS

AUTOR: Virnei Silva Moreira

ORIENTADOR: Gervásio Annes Degrazia

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 17 de Julho de 2012.

As trocas de água no sistema solo-planta-atmosfera são controladas pelas características físico-hídricas dos solos, que por sua vez são altamente variáveis no espaço e muito sensíveis ao uso e manejo do solo, principalmente em um agroecossistema. Precipitação, escoamento, armazenamento de água do solo e trocas de vapor de água entre superfície-atmosfera obtido a partir da covariância turbulenta e propriedades físico-hídricas do solo foram analisados durante a estação de cultivo (2009/2010) para os sistemas de plantio direto (PD) e plantio convencional (PC) no ciclo da cultura da soja, no município de Cruz Alta, região noroeste do Rio Grande do Sul (RS). A maioria dos modelos que descrevem a interação biosfera - atmosfera em agroecossistemas ainda não representam de forma eficiente às diferenças físicas para diferentes manejos do solo. Neste sentido, o estudo, também analisará a resposta da dinâmica das trocas de água no modelo Agro-IBIS quando as propriedades físicas do solo em um sistema de manejo de PD (plantio sem revolução do solo) e PC (plantio com revolução do solo) são implementadas. Para tanto, são usados às propriedades do solo de um experimento de longo prazo no sul do Brasil 2009/2010. Além disso, ajustes matemáticos no índice de área foliar (IAF) são sugeridos para melhor representar o estágio de senescência foliar. Os resultados da dinâmica da água no solo e evapotranspiração no modelo Agro-IBIS para a soja, quando da implementação das propriedades do solo e do ajuste no IAF são comparados com os dados experimentais e com uma simulação em que as propriedades do solo são descritas através do banco de dados globais. O modelo representa satisfatoriamente a dinâmica da água no solo e evapotranspiração para ambos os sistemas de manejo, especialmente para períodos úmidos. Os resultados apresentados para o sistema de manejo convencional estão melhores correlacionados com as simulações, quando as propriedades físicas deste sistema são implementadas e a senescência foliar é corrigida. Das principais mudanças que foram adicionadas, tais como o ajuste de propriedades físicas do solo, definição de coeficientes da curva de retenção, e fenologia da cultura, a principal foi à consideração de um novo fator de declínio do índice de área foliar na fase de senescência que reduziu sobremaneira o erro nas componentes do balanço de água da superfície de soja.

Palavras – chaves: Balanço de água. Umidade do solo. Evapotranspiração. Soja (*Glycine max* (L.)Merril). Agro-IBIS. Solo-planta-atmosfera.

ABSTRACT

Doctoral Thesis
Graduate Program in Physics
Federal University of Santa Maria

BALANCE OF WATER CYCLE OF SOYBEAN CROP: REPRESENTATION OF VEGETATION DYNAMICS MODEL IN AGRO-IBIS

AUTHOR: Virnei Silva Moreira

ADVISOR: Gervasio Annes Degrazia

Place and Date of Defense: Santa Maria, July 17, 2012.

Exchanges of water in the soil-plant-atmosphere are controlled by physical-hydric soils, which in turn are highly variable in space and very sensitive to the use and soil management, especially in an agroecosystem.

Precipitation, runoff, soil water storage and exchange of water vapor between the surface-atmosphere obtained from the eddy covariance and hydro-physical properties of soil were analyzed during the growing season (2009/2010) for no-till systems (NT) and conventional tillage (PC) in the cycle of soybean, in Cruz Alta, northwest of Rio Grande do Sul (RS). Most models that describe the interaction biosphere - atmosphere in agroecosystems has not efficiently represent physical differences for different soil management. In this sense, the study also will examine the response of the dynamic exchanges of water in the Agro-IBIS model when the soil physical properties in a system of management of PD (without revolution planting soil) and PC (with planting soil Revolution) are implemented. For this purpose, are used to soil properties of a long-term experiment in southern Brazil 2009/2010. Moreover, mathematical adjustments in leaf area index (LAI) is suggested to better represent the stage of leaf senescence. The results of the dynamics of soil water and evapotranspiration in the Agro-IBIS model for soybeans, when the implementation of soil properties and setting the IAF are compared with experimental data and with a simulation in which the soil property are described through the global database. The model represents satisfactorily the dynamics of soil water and evapotranspiration for both management systems, especially for wet periods. The results presented for the conventional management system are best correlated with the simulations, when the physical properties of this system are implemented and leaf senescence is corrected. Of the major changes that have been added, such as setting physical properties of soil, definition of the retention curve coefficients, and phenology of the crop, the main one was the consideration of a new factor of decline in leaf area index during senescence which greatly reduced the error in water balance components of the surface of soybean.

Key - words: Water balance. Soil moisture. Evapotranspiration. Soybean. Agro-IBIS. Soil-plant-atmosphere.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 –	Cultivo da soja no sistema de plantio direto (PD) em Cruz Alta. Na figura, observa-se a presença dos resíduos culturais (palhada) sobre a superfície	30
Figura 2.2 –	Cultivo da soja no sistema de plantio convencional (PC) em Cruz Alta. Na figura, observa-se a ausência dos resíduos culturais (palhada) sobre a superfície	31
Figura 3.1 –	Sítio experimental de Cruz Alta localizado no Sul da América do Sul	34
Figura 3.2 –	Estruturas metálicas galvanizadas para estimar escoamento superficial ...	35
Figura 3.3 –	Índice de área foliar (IAF), observado e simulado com duas equações diferentes no modelo Agro-IBIS	42
Figura 4.1 –	Valores médios diários da radiação solar global	43
Figura 4.2 –	Valores médios diários da temperatura para o ciclo da soja	44
Figura 4.3 –	Valores médios diários da umidade relativa	44
Figura 4.4 –	Valores médios diários do déficit de pressão de vapor	45
Figura 4.5 –	Precipitação diária acumulada durante o ciclo da soja	49
Figura 4.6 –	Variação da umidade do solo na camada de (0 - 0,20 m) para a estação do ciclo da soja nos sistemas: plantio convencional (PC) e plantio direto (PD)	50
Figura 4.7 –	Variação da umidade do solo na camada de (0,20 - 0,50 m) para a estação do ciclo da soja nos sistemas: plantio convencional (PC) e plantio direto (PD)	51
Figura 4.8 –	Variação da umidade do solo na camada de (0 - 0,50 m) para a estação do ciclo da soja nos sistemas: plantio convencional (PC) e plantio direto (PD)	52
Figura 4.9 –	Escoamento superficial nos sistemas: plantio convencional (PC) e plantio direto (PD)	53
Figura 4.10 –	Evapotranspiração e IAF nos sistemas: plantio convencional (PC) e plantio direto (PD)	55
Figura 4.11 –	Variação diária do coeficiente de cultura (Kc) para os sistemas: plantio convencional (PC) e plantio direto (PD)	57
Figura 5.1 –	Variação da umidade do solo na camada de (0- 0,20 m) para a estação do ciclo da soja no sistema plantio direto (PD)	62
Figura 5.2 –	Variação da umidade do solo na camada de (0,20- 0,50 m) para a estação do ciclo da soja no sistema plantio direto (PD)	63
Figura 5.3 –	Variação da umidade do solo na camada de (0- 0,20 m) para a estação do ciclo da soja no sistema plantio convencional (PC)	64
Figura 5.4 –	Variação da umidade do solo na camada de (0,20- 0,50 m) para a estação do ciclo da soja no sistema plantio convencional (PC)	65
Figura 5.5 –	Evapotranspiração simulada e observada para a estação do ciclo da soja no sistema plantio convencional (PC)	67
Figura 5.6 –	Evapotranspiração simulada e observada para a estação do ciclo da soja no sistema plantio direto (PD)	68
Figura 5.7 –	Simulação da evaporação e transpiração para os sistemas de plantios: (PD) e (PC) utilizando a nova simulação	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 –	Variáveis coletadas nas torres micrometeorológicas com as medidas, identificação dos sensores e altura/profundidade de instalação.....	38
Tabela 3.2 –	Características físico-hídricas do solo no plantio convencional (PC) e direto (PD) utilizadas no modelo Agro-IBIS.....	40
Tabela 4.1 –	Índice de Área Foliar (IAF), estágios fenológicos para o cultivo de soja sob plantio direto (PD) e convencional (PC) em dias após a emergência .	45
Tabela 4.2 –	Características físico-hídricas dos solos sob (PD) e (PC) em diferentes profundidades.....	47
Tabela 4.3 –	Condutividade Hidráulica Saturada integrada para diferentes profundidades no (PD) e (PC).....	48
Tabela 4.4 –	Valores de Kc e intervalos de confiança de 95% para períodos específicos do ciclo da soja para o sistema (PD)	57
Tabela 4.5 –	Componentes do balanço hídrico para o ciclo de crescimento da soja sob (PD) e (PC), em unidades de milímetros.....	58
Tabela 5.1 –	Características físico-hídricas do solo utilizadas no modelo Agro-IBIS ...	60
Tabela 5.2 –	Erro médio quadrático (ERRO) e coeficiente de correlação (COR) de duas diferentes simulações, utilizando o modelo Agro-IBIS para a cultura de soja 2009/2010 no sul do Brasil para diferentes camadas de umidade do solo em sistemas de manejos de PC e PD.....	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASSESS – Image Analysis Software for Plant Disease Quantification

COR – Coeficiente de Correlação

DAE – Dias Após Emergência

EM – Emergência

FAO – Food and Agriculture Organization

GDD – Graus-Dia de Desenvolvimento

IAF – Índice de Área Foliar

IBIS – Integrated Biosphere Simulator

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

MAT – Maturação

PC – Plantio Convencional

PD – Plantio Direto

R3 – Início da formação de vagem

R4 – Vagem completamente desenvolvida

R5.1 – Grãos perceptíveis ao tato (o equivalente a 10% da granação)

R5.3 – Granação de 26% a 50%

R5.4 – Granação de 51% a 75%

R6 – Grão cheio ou completo

SIB – Simple Biophere Model

V6 – Sexto nó

V13 – Décimo terceiro nó

LISTA DE SÍMBOLOS

ET_0	Evapotranspiração de referência
K_c	Coefficiente de cultura
S	Armazenamento de água no solo
P	Precipitação
ET	Evapotranspiração
R	Escoamento superficial
E	Evaporação
T	Transpiração
R_n	Radiação líquida
F_g	Fluxo de calor no solo
T_a	Temperatura do ar diário
u_2	Velocidade do vento a 2 metros de altura
e_s	Pressão de vapor de saturação
e_a	Pressão de vapor real
$(e_s - e_a)$	Déficit da pressão de vapor de saturação
Δ	Inclinação da curva de pressão de vapor
γ	Constante psicrométrica
H	Fluxo de calor sensível
LE	Fluxo de calor latente
ρ_{atm}	Densidade do ar
C_p	Capacidade térmica do ar
θ_{atm}	Temperaturas potenciais da atmosfera
θ_s	Temperaturas potenciais da superfície
q_{atm}	Umidade específica na atmosfera
q_s	Umidade específica na superfície
r_{ah}	Resistências aerodinâmicas para o calor
r_{aw}	Resistências aerodinâmicas para o vapor d'água
$T_{Média}$	Temperatura média diária
T_{Base}	Temperatura de base
q	Densidade de fluxo de água

∇H	Gradiente de potencial hidráulico
K	Condutividade hidráulica do solo
$K_{\theta s}$	Condutividade hidráulica saturada
ρ_b	Densidade do solo
Mac	Macroporosidade
Mic	Microporosidade
P	Porosidade
PMP	Ponto de murcha permanente
CC	Capacidade de campo
θ	Conteúdo de água no solo
ψ	Potencial matricial do solo
b	Expoente de Campbell
CAD	Capacidade de água disponível
Ψ_0	Potencial de entrada de ar
$gdd_{maturity}$	Graus dia para atingir a maturação
$huigrain$	Preenchimento dos grãos
gdd_{plant}	Graus dia até a fase de senescência
L_v	Calor latente de vaporização

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	14
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1 Balanço hídrico	18
2.1.1 Componentes do balanço hídrico	18
2.2 Evapotranspiração de referência (ET₀) e coeficiente de cultura (Kc)	22
2.3 Modelo Agro-IBIS	23
2.3.1 Fluxos de calor sensível (H) e latente (LE)	24
2.3.2 Fenologia no modelo	25
2.3.3 Índice de área foliar	25
2.3.4 Propriedades físicas e conteúdo de água no solo	26
2.3.5 Processo de modelagem.....	27
2.4 Sistemas de plantios.....	27
2.4.1 Plantio direto.....	27
2.4.2 Plantio convencional.....	29
2.4.3 Diferenças dos sistemas	30
3 MEDIDAS EXPERIMENTAIS E DADOS UTILIZADOS.....	32
3.1 Descrição do sítio experimental.....	32
3.2 Escoamento superficial e conteúdo de água no solo	35
3.3 Medidas de solo	36
3.4 Fenologia da cultura	37
3.5 Medidas atmosféricas	37
3.6 Processamento e preenchimento dos dados de fluxo	38
3.7 Adaptação do modelo	39
3.7.1 Desenvolvimento da cultura e ajuste do índice de área foliar	40
4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	43
4.1 Condições ambientais e índice de área foliar (IAF)	43
4.2 Medidas de solo	46
4.3 Componentes do balanço hídrico	49
4.4 Coeficiente da cultura (Kc)	56
4.5 Balanço hídrico	58
5 RESULTADOS DO MODELO.....	60
5.1 Estoque de água no solo	60
5.1.1 Plantio Direto (PD)	61
5.1.2 Plantio Convencional (PC).....	64
5.2 Evapotranspiração e particionamento entre a evaporação direta do solo e transpiração	67
6 CONCLUSÕES.....	70
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72

INTRODUÇÃO

O aumento da demanda por alimentos protéicos por parte dos países desenvolvidos levou a uma acentuada produção da soja mundialmente nos últimos anos. A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é uma leguminosa herbácea anual cujo alto teor protéico de seus grãos (38%) e sua fácil adaptação aos diversos tipos de clima e fotoperíodo a coloca em posição de destaque entre as mais cultivadas oleaginosas do mundo. Países tais como Estados Unidos, Brasil, Argentina e China são os maiores produtores de soja.

O expressivo crescimento da produção de soja brasileira a partir da década de 70, em especial na região sul, e os fortes impactos ambientais provocados pelo plantio convencional (PC), o qual faz o uso do arado e assim facilita a erosão do solo, levou a substituição pelo sistema plantio direto (PD) onde consiste em cultivar as plantas sem arar ou preparar o solo, sem revolver o solo e a palha, que contribui para minimizar as perdas por erosão. No sul do Brasil, uma das regiões mais produtoras de soja, o terceiro estado do país, predomina o sistema de plantio direto em quase todas as propriedades. Com cerca de 15 milhões de hectares (Conab, 2011), das áreas, são cultivadas com soja e/ou milho (*Zea mays* L.) no verão e com cereais no inverno. Vários estudos têm avaliado o impacto do sistema de plantio direto na produtividade da soja, as necessidades hídricas da cultura e a demanda por insumos. Os resultados mostram que o sistema combina preservação e enriquecimento do solo com maior produtividade (Kluthcouski et al., 2000; Hussain et al., 1999; Martorano et al., 2009). Além dos fatores de manejo do solo a produtividade da soja é afetada também pelas condições atmosféricas e variabilidades climáticas, particularmente pela precipitação que afeta diretamente a disponibilidade hídrica à cultura (Berlato et al., 2003 e 2005, Barni e Matzenauer, 2000).

No contexto de modelagem da interação superfície-atmosfera, a necessidade de incorporar por um lado à contribuição do uso do solo pela agricultura nas emissões de gases de efeito estufa, e por outro de avaliar os impactos das mudanças climáticas na produtividade agrícola, levou ao desenvolvimento de modelos de interação biosfera-atmosfera capazes de simular diferentes ecossistemas agrícolas e suas respostas à variabilidade do clima. Esses modelos consideram os processos fenológicos e fisiológicos das cultivares agrícolas, assim como suas influências no balanço de água, energia, radiação e carbono a superfície. Trabalhos como Hanan et al. (2005) que adaptaram o modelo SiB2 (Simple Biosphere Model, Sellers et

al., 1996c) para simulação do ecossistema do trigo; Lokupitiya et al. (2009) que estruturaram o Sibcrop, a partir do modelo Sib, contendo a representação das culturas da soja, milho e trigo; diversos trabalhos utilizando uma adaptação do modelo IBIS (Integrated Biosphere Simulator, Foley et al., 1996; Kucharik et al., 2000) criando o Agro-IBIS para simulação da cultura do milho (Kucharik e Brye, 2003; Kucharik, 2003), rotação soja-milho sob diversos sistemas de manejo (Kucharik e Twine, 2007), cana de açúcar (Cuadra et al., 2012), e simulação com Noah para cultura de trigo (Ingwersen et al., 2011). Nesses modelos foram acrescentadas parametrizações específicas para simular os processos fenológicos e fisiológicos das culturas agrícolas.

Kucharik e Twine (2007) avaliaram o modelo Agro-IBIS para as culturas de soja e milho para dados experimentais obtidos em um sítio experimental localizado no Nebraska, região central dos EUA. Os resultados obtidos nesse estudo indicam que o modelo simula de forma consistente os principais processos relacionados ao desenvolvimento dessas culturas agrícolas. Webler et al. (2012) validou o modelo Agro-IBIS para a soja na região sul do Brasil, utilizando um banco de dados globais para as propriedades do solo da região e comparou os resultados para dois sistemas de plantio: (PD) e (PC); os autores concluíram que, embora o modelo represente satisfatoriamente os principais processos relacionados ao desenvolvimento, a senescência foliar e períodos com precipitação irregular não são bem representados principalmente pelo índice de área foliar (IAF) e a umidade do solo, respectivamente.

Portanto, detalhar as características físico hídricas do solo e quantificar as diferenças promovidas nos processos à superfície entre dois sistemas de manejo será útil para uma correta avaliação do modelo utilizado.

Em relação às diferenças entre os sistemas de manejo, ou plantio, diversos trabalhos têm sido realizados mundialmente, focando principalmente na maior eficiência no sequestro de carbono no solo pelo PD (West e Post, 2002). Trabalhos semelhantes também vêm sendo realizados na região Sul do Brasil (Boddey et al., 2010). Entretanto, a avaliação dos sistemas de plantio (direto e convencional) quanto aos processos de transferência de água e o seu efeito no balanço hídrico das culturas agrícolas não são bem estabelecidos.

Conforme Kay e Van den Bygaart (2002), os processos de transferência de água no sistema solo-planta-atmosfera são controlados em grande parte pelas características físico-hídricas dos solos, que são altamente variáveis no espaço e fortemente afetadas pelo uso e manejo dos solos. O sistema convencional de cultivo, com intenso revolvimento do solo pode criar camadas superficiais com menor densidade, menor agregação e alta permeabilidade.

Entretanto, na camada sub-superficial esse sistema pode gerar uma compactação em função do uso de maquinários (Reichert et al., 2009). Por outro lado, o sistema de plantio direto pode gerar uma compactação logo na camada superficial em função da necessidade de maquinários mais pesados e menor frequência de revolvimento do solo. Isso pode ocasionar uma maior densidade na camada superficial, diminuindo significativamente a infiltração de água no perfil do solo (Reichert et al., 2009; Botta et al., 2010). Essas modificações na estrutura do solo que são induzidas pelo sistema de cultivo geram diferenças significativas na agregação, densidade e descontinuidade de poros. Consequentemente, as características hidráulicas do meio poroso são modificadas entre a superfície e as camadas mais profundas do solo e podem promover diferenças significativas na condutividade hidráulica e na umidade entre as camadas, o que afetará diretamente as componentes do balanço de água do sistema, tais como o escoamento superficial, conteúdo de água no solo e a evapotranspiração.

Diversos estudos encontraram medidas com maior conteúdo de água no solo e menor escoamento superficial de água pelo PD para diferentes cultivos (Blevins et al., 1990, De Vita et al., 2007, Almaraz et al., 2009, Stipesevic e Kladvko, 2005, Verkler et al., 2008).

A técnica de covariância dos vórtices tem sido aplicada cada vez mais nos estudos relacionados às perdas por evapotranspiração em cultivos de soja (Suyker e Verma, 2009, Singer et al., 2010). Estes trabalhos incorporam as medidas dos componentes do balanço hídrico dos plantios de maneira sistemática e contínua, permitindo que os impactos dos sistemas de plantio para a demanda hídrica da soja e disponibilidade hídrica do solo sejam mensurados, para uma região de grande produtividade agrícola.

Deste modo, o primeiro objetivo deste trabalho é quantificar as magnitudes e a distribuição sazonal das componentes do balanço de água para os sistemas de plantio direto e convencional na soja no Sul do Brasil, durante o ciclo da cultura na estação de cultivo 2009/2010, mais especificamente em uma área experimental localizada no município de Cruz Alta (RS), Noroeste do estado do Rio Grande do Sul.

O segundo objetivo é propor um novo ajuste do índice de área foliar (IAF) na fase da senescência foliar e uma representação específica das propriedades físicas do solo nos sistemas de (PC) e (PD) incorporadas no modelo Agro-IBIS, avaliando a influência de uma descrição detalhada das propriedades do solo na estimativa das trocas de água no modelo para a simulação da soja sob diferentes sistemas de manejo.

Os resultados do conteúdo de água no solo e evapotranspiração nas simulações foram comparados com dados experimentais e aos resultados de Weblar et al. (2012), em que o solo foi representado de forma genérica.

Esse trabalho está estruturado em 6 capítulos: no Capítulo 1, é realizada a introdução e os objetivos pretendidos, no Capítulo 2, apresentaremos a fundamentação teórica das componentes do balanço hídrico e descrição geral do modelo utilizado. No capítulo 3 mostram-se as medidas experimentais e dados utilizados através do sítio experimental de Cruz Alta, localizado na região Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, bem como as adaptações do modelo. No Capítulo 4 são mostrados os resultados e discussões das observações experimentais. No Capítulo 5 são discutidos os resultados obtidos para as simulações do Agro-IBIS. No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões e posteriormente as referências bibliográficas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, apresenta-se a fundamentação teórica das componentes do balanço hídrico, evapotranspiração de referência (ET_0), coeficiente de cultura (K_c), modelo Agro-IBIS e sistemas de plantios.

2.1 Balanço hídrico

2.1.1 Componentes do balanço hídrico

Para estudar o ciclo de água de uma cultura de maneira geral é necessário considerar o seu balanço hídrico. O balanço hídrico é o somatório das quantidades de água que entram e que saem de um elemento de volume de solo e, num intervalo de tempo, o resultado é a quantidade líquida de água que nele permanece. O balanço hídrico é, de fato, a própria lei da conservação das massas e está intimamente ligado ao balanço de energia, pois os processos que envolvem requer energia (Reichardt e Timm, 2004).

Dentre os vários processos responsáveis pelo balanço hídrico, a descrição realista do padrão de armazenamento de água no solo e dos fluxos de superfície são destaques, uma vez que alterações no comportamento do sistema solo-vegetação-atmosfera estão diretamente relacionadas com a variação temporal do armazenamento de água no solo, a qual é resultante da integração dos processos na interface solo-vegetação (Hodnett *et al.* 1996; Tomasella e Hodnett 1996; Tomasella *et al.* 2000).

O solo funciona basicamente como um reservatório de água para as plantas e pode ser considerado um sistema trifásico, constituído por partículas sólidas de natureza mineral e orgânica, ar e água (Vila Nova *et al.* 1976). Trata-se de um reservatório aberto tanto para a atmosfera quanto para as camadas mais profundas, onde vários processos se desenvolvem, desde a infiltração e evaporação a superfície, o armazenamento no espaço poroso (retenção de água) e a extração de água pelas raízes ao longo do perfil, bem como a drenagem nas camadas inferiores. Todos esses processos são importantes componentes do ciclo hidrológico e são

afetados pelas características físicas do solo. As propriedades físicas são determinadas pela distribuição e constituição das partículas sólidas do solo, também chamada de matriz do solo, que se unem formando agregados. Dentre as várias propriedades do solo, a textura é uma das mais importantes, pois descreve o tamanho relativo das partículas que o compõe, determinada pela granulometria. Tradicionalmente, as partículas do solo são divididas em três frações texturais: areia, silte e argila (Reichardt e Timm 2004). Segundo Reichardt e Timm (2004), a fração argila é a que mais influencia os processos físicos e químicos do solo, pois os elementos possuem maior área específica.

A disposição geométrica das partículas define a configuração do sistema poroso do solo. A porosidade refere-se à porção de volume de vazios que podem ser ocupados pelos líquidos e gases em relação ao volume total do solo. A estrutura do solo e a porosidade associada determinam a permeabilidade ao ar e água, bem como o desenvolvimento das raízes (Chauvel 1982).

Abaixo da superfície do solo, a umidade encontra-se distribuída em duas principais zonas de acordo com a proporção relativa do espaço poroso ocupado pela água: zona de aeração (ou zona vadosa), onde os poros contêm água e/ou ar (ou ainda vapor d'água), e zona de saturação (ou zona freática), onde todos os espaços vazios encontram-se completamente ocupados pela água. A interface entre as duas zonas é conhecida como linha de saturação (também denominada superfície piezométrica ou lençol freático).

Tanto a absorção de água pelas raízes profundas quanto à redistribuição hidráulica são processos de grande importância para entender a resposta da cultura sob condições de estresse hídrico. No solo, variações no conteúdo de água armazenada são determinantes para os processos de transferência e perda (Mahanama e Koster 2003), que dependem das propriedades físicas do solo e distribuição de raízes. O estresse hídrico diminui a evapotranspiração, alterando o próprio estado da vegetação (que pode reduzir a área foliar), conseqüentemente modificando o particionamento da energia disponível à superfície (impacto nos fluxos de calor sensível e latente).

Para entender as variações na umidade do solo é preciso conhecer os processos que fornecem e removem água neste meio poroso. Em condições naturais, a umidade do solo varia ao longo do tempo, sob o efeito das chuvas e das variações sazonais de temperatura, precipitação e evapotranspiração. A equação de balanço hídrico de uma camada de solo pode ser expressa como (1):

$$\frac{\partial S}{\partial t} = P - ET - R - D \quad (1)$$

onde S é o armazenamento de água no solo (mm), P é a precipitação (mm/dia), ET é a evapotranspiração (mm/dia), R escoamento superficial “*runoff*” (mm/dia) e D drenagem profunda.

As componentes do balanço hídrico analisadas no presente estudo são caracterizadas a seguir:

a) Precipitação e Armazenamento de água no Solo:

A precipitação é um dos elementos básicos a ser considerada na equação do balanço hídrico como entrada de água no sistema, enquanto o armazenamento de água no solo pode ser caracterizado pelo seu conteúdo de água. Segundo Reichardt (1990), o conteúdo de água no solo pode ser definido em função da massa ou em função do volume, ou, quando nenhuma destas é conveniente, os resultados podem ser expressos em altura de lâmina de água, esta altura corresponde a volume por unidade de área.

Quando se deseja determinar o armazenamento de água no solo, primeiro é preciso definir a profundidade do sistema radicular da cultura considerada, ou, pelo menos da sua maior parte (profundidade efetiva). Para cada profundidade o armazenamento varia em função do tempo. Esta variação se deve aos processos de ganho e de perda de água.

b) Escoamento superficial:

O escoamento superficial, conforme Pruski et al. (2003), corresponde ao segmento do ciclo hidrológico relacionado ao deslocamento das águas sobre a superfície do solo. Quando a intensidade de precipitação excede a taxa de infiltração de água de um solo, inicia o acúmulo superficial de água e, ultrapassada a capacidade de acúmulo de água na superfície do terreno, ocorre o início do escoamento superficial.

Segundo Pruski et al. (2003), todos os fatores que influenciam na infiltração de água no solo interferem também no escoamento superficial resultante. O escoamento superficial tende a crescer com o aumento da intensidade e a duração da precipitação pluvial e da área

abrangida, bem como a topografia do terreno. A cobertura e os tipos de uso do solo, além de seus efeitos sobre as condições de infiltração da água no solo, exercem importante influência na interceptação da água advinda da precipitação pluvial.

Segundo Reichardt (1990), são vários os problemas causados pelo escoamento superficial, tais como: erosão, lixiviamento e perda de nutrientes entre outros, pois se trata de uma quantidade de água perdida pelo local que a recebeu, pois esta infiltrará em outro local ou será perdida em cursos d'água.

c) Evapotranspiração:

A perda de água por evapotranspiração (ET) pelas plantas é uma componente importante no ciclo hidrológico, em especial em áreas cultivadas. Onde o termo evapotranspiração (ET) refere-se à ocorrência simultânea dos processos de evaporação (E) e de transpiração (T) nos ecossistemas.

A evaporação da água na superfície é influenciada principalmente por dois fatores: a energia externa disponível e a capacidade para transportar o vapor acima da superfície. A radiação solar é a principal fonte de energia externa; e a capacidade de transporte do vapor depende da velocidade do vento e do gradiente de umidade específica logo acima da superfície evaporante (Chow et al., 1988).

A transpiração consiste na evaporação da água que foi utilizada pela planta nos processos metabólicos necessários ao seu crescimento e desenvolvimento (Pereira et al., 1997). A água é extraída do solo pelas raízes das plantas, sendo conduzida para a parte aérea do dossel, e liberada para a atmosfera através de pequenas aberturas nas folhas, chamadas de estômatos.

Portanto, as condições atmosféricas locais, como a energia disponível para as trocas de energia e massa entre a superfície e a atmosfera, e a velocidade do vento influenciando o gradiente de umidade, tem influência direta na transpiração das plantas. Além disso, fatores como o tipo de vegetação, estágio de desenvolvimento da planta e forma de manejo da cultura também determinam como se dará a taxa de transpiração (Pereira et al., 1997; Reichardt e Timm, 2004).

A complexidade na mensuração da (ET) se deve principalmente à difícil diferenciação aos processos de evaporação e transpiração que ocorrem na natureza (Allen et al., 1998). Em uma área agrícola, por exemplo, a evolução no crescimento da cultura determina qual

processo contribuirá mais representativamente para a ET. Quando da semeadura da cultura, a fração de radiação direta que chega ao solo é alta, logo a água perdida através da evaporação do solo é a principal forma de transporte de vapor d'água para a atmosfera. À medida que a cultura cresce, sua área de dossel aumenta, e conseqüentemente a fração de radiação direta que chega ao solo diminui, e com isso a transpiração passa a ser determinante no cômputo da ET.

2.2 Evapotranspiração de referência (ET_0) e coeficiente de cultura (K_c)

A evapotranspiração de referência (ET_0) associada com o coeficiente de cultura (K_c) é uma das maneiras mais conhecidas e utilizadas para avaliar o consumo de água nas culturas. De acordo com Grismer et al., (2002), cerca de 50 métodos estão disponíveis para estimar ET_0 , porém, muitas vezes, gerando resultados inconsistentes. Até o momento, o método Penman-Monteith da Food and Agriculture Organization (FAO) tem sido reconhecido como o único método padrão para o cálculo da ET_0 a partir de dados meteorológicos, pois incorpora os parâmetros fisiológicos e aerodinâmicos (Allen et al., 1998).

O método foi publicado no nº 56 da Irrigation and Drainage Series da FAO (Smith et al., 1991). O método FAO-56 refere-se ao cálculo da ET_0 pela equação de Penman-Monteith, que é afetada pelas condições meteorológicas, e ao cálculo do coeficiente de cultura que é afetado por fatores estruturais e fisiológicos da cultura. A evapotranspiração de referência (ET_0) ocorre a partir de uma cultura de referência hipotética (grama batatais) com a altura de 12 cm, em crescimento ativo, com adequada bordadura e com um regime hídrico adequado (Allen et al., 1998).

Tal estimativa é utilizada em estudos comparativos de perda de água pela vegetação em diferentes situações e locais (Reichardt e Timm, 2004). Allen et al., (1998) cita ainda que o conceito de evapotranspiração de referência foi criado para estudar a demanda evaporativa da atmosfera, independente do tipo de cultura, de seu desenvolvimento e das práticas de manejo. A equação de Penman-Montheith da FAO para o cálculo da ET_0 diária (mm/dia) usando dados médios diários é descrita abaixo pela equação (Allen et al., 1998):

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - F_g) + \gamma(900/T_a + 273)u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (2)$$

sendo R_n a radiação líquida ($\text{MJ}/\text{m}^2\cdot\text{dia}$), F_g o fluxo de calor no solo ($\text{MJ}/\text{m}^2\cdot\text{dia}$), T_a a temperatura do ar diária média ($^{\circ}\text{C}$), u_2 a velocidade do vento a 2 m de altura (m/s), e_s a pressão de vapor de saturação (kPa), e_a a pressão de vapor real (kPa), $(e_s - e_a)$ o déficit da pressão de vapor de saturação (kPa), Δ a inclinação da curva de pressão de vapor ($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$) e γ a constante psicrométrica ($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$).

Valores diários do coeficiente de cultura (K_c) podem ser obtidos para o ciclo de uma determinada cultura agrícola como:

$$K_c = \frac{ET}{ET_0} \quad (3)$$

2.3 Modelo Agro-IBIS

A versão 2 do IBIS (*Integrated Biosphere Simulator*) forneceu a estrutura para o desenvolvimento do modelo para culturas agrícolas, o Agro-IBIS. O modelo IBIS inclui, em uma única estrutura para modelagem de ecossistemas naturais, as representações da superfície terrestre, processos relacionados à energia, água, solo e atmosfera. Além disso, a fisiologia do dossel (fotossíntese e condutância estomática), fenologia, dinâmica da vegetação (alocação de carbono, competição entre plantas), e balanço de carbono terrestre (produção primária líquida, alocação de carbono nas plantas, carbono no solo e decomposição da matéria orgânica) estão também representados (Foley et al., 1996; Kucharik et al., 2000; Kucharik e Brye, 2003).

Esses processos são organizados em uma estrutura hierárquica e operam em escalas temporais variando entre uma hora a um ano. Esta abordagem permite o acoplamento entre os processos ecológicos, biofísicos e fisiológicos que ocorrem em escalas de tempo diferentes. Tal estrutura de modelagem foi adaptada e modificada a fim de atingir a capacidade de simular culturas agrícolas. A saída do modelo inclui a produtividade da cultura, produção de

matéria seca (folhas, caule, raízes e grãos), índice de área foliar (IAF) diário, crescimento radicular da planta, variáveis relacionadas aos ciclos de carbono e nitrogênio, evapotranspiração, água no solo e fluxo de CO₂ do solo (Kucharik e Brye, 2003).

Atualmente estão implementadas as culturas de soja e milho (Kucharik e Twine, 2007), trigo (Hanan et al., (2005)), cana de açúcar (Cuadra et al., 2012). Para cada uma dessas culturas o Agro-IBIS resolve um conjunto de equações para representar os processos físicos e biofísicos a fim de simular o balanço de energia, água e massa dos ecossistemas agrícolas.

2.3.1 Fluxos de calor sensível (H) e latente (LE)

As seguintes expressões são utilizadas no modelo Agro-IBIS para determinar a intensidade dos fluxos de calor sensível e latente da superfície para a atmosfera. H e LE são calculados pelas seguintes equações:

$$H = -\rho_{atm} C_p \frac{(\theta_{atm} - \theta_s)}{r_{ah}} \quad (4)$$

$$LE = -\rho_{atm} \frac{(q_{atm} - q_s)}{r_{aw}} \quad (5)$$

onde, ρ_{atm} é a densidade do ar úmido dada em $\frac{Kg}{m^3}$. C_p é a capacidade térmica do ar $\left(\frac{J}{Kg K}\right)$. θ_{atm} e θ_s são as temperaturas potenciais da atmosfera e da superfície, respectivamente, dadas em (K). q_{atm} e q_s são as umidades específicas na atmosfera e superfície, respectivamente, ambas dadas em $\frac{Kg}{Kg}$.

As resistências aerodinâmicas para o calor (r_{ah}) e para o vapor d'água (r_{aw}) utilizadas nas equações (4) e (5) dependem de diversas condições atmosféricas e as equações para os cálculos são descritas em Bonan (1996).

2.3.2 Fenologia no modelo

A emergência, fenologia e os estágios de desenvolvimento da planta são determinados pelo crescimento baseado em graus-dia de desenvolvimento (GDD), de acordo com a equação:

$$GDD = \sum(T_{Média} - T_{Base}) \quad (6)$$

onde, GDD são os graus-dia acumulados, $T_{Média}$ é a temperatura média diária e T_{Base} é a temperatura de base (10 °C para a soja), temperatura mínima para o desenvolvimento da soja. A quantidade de GDD necessários para a cultura atingir a maturação fisiológica é um parâmetro de entrada do modelo.

O modelo aloca o carbono resultante da fotossíntese em quatro reservatórios: raiz, caule, folhas e grãos. As proporções variam ao longo do ciclo de desenvolvimento da planta, de acordo com o estágio fenológico no qual a cultura se encontra. A alocação de carbono diária nas folhas é usada para calcular o IAF.

2.3.3 Índice de área foliar

O Índice de Área Foliar (IAF) é umas das principais características biofísicas dos ecossistemas. Ele influi em muitos processos, entre eles o balanço de energia e a capacidade fotossintética. Assim, se torna uma variável importante para caracterizar um ecossistema e permitir que se estime sua influência no ambiente.

No modelo Agro-IBIS, o IAF é calculado a partir da área foliar específica da cultura. Esse parâmetro é específico para cada cultura e se refere à área de folha por quilograma de carbono $\left(\frac{m^2}{Kg\ C}\right)$. Essa constante é multiplicada pela quantidade de carbono alocada por unidade de área da folha $\left(\frac{Kg\ C}{m^2}\right)$, resultando assim no IAF da cultura em escala de tempo diária. A partição da matéria seca assimilada para vários sumidouros de carbono (folha, caule, raiz, grão) muda de acordo com o estágio fenológico do cultivo, fazendo com que se tenha uma simulação consistente em relação com os processos que ocorrem na natureza.

2.3.4 Propriedades físicas e conteúdo de água no solo

O módulo de física do solo do modelo Agro-IBIS calcula a taxa de variação da umidade do solo com o tempo, com base na Equação de Darcy (Equação 7) e no princípio da conservação de massa, para calcular o fluxo vertical de água no solo (Campbell e Norman, 1997). A equação de Darcy é representada por:

$$q = -k.\nabla H \quad (7)$$

onde q é a densidade de fluxo de água $(L.m^{-2}.dia^{-1})$, ∇H o gradiente de potencial hidráulico $(m.m^{-1})$ e k a condutividade hidráulica do solo $(mm.dia^{-1})$.

O Agro-IBIS utiliza dados de granulometria do solo (fração de areia, argila e silte) para determinar a classe textural e as propriedades físicas do solo. Os valores representativos das propriedades físicas do solo, para cada tipo granulométrico, são retirados da tabela na sub-rotina de física do solo do modelo.

2.3.5 Processo de modelagem

Neste trabalho o modelo Agro-IBIS foi integrado a cada 60 minutos, sendo forçado com dados meteorológicos de radiação solar incidente (Wm^{-2}), precipitação (mm), temperatura do ar ($^{\circ}C$), velocidade do vento (ms^{-1}), umidade relativa do ar (%) e pressão atmosférica (mb) obtidos pela estação automática do INMET, Cruz Alta ($-28^{\circ} 36'$, $-53^{\circ} 40'$, 425 m) localizada nas proximidades do sítio. As simulações foram divididas conforme dois sistemas de plantios (PD e PC), de acordo com as propriedades físico hídricas de cada sistema.

2.4 Sistemas de plantios

2.4.1 Plantio direto

O termo plantio direto, considerado como uma técnica de manejo conservacionista do solo foi derivada da expressão inglesa *no-tillage* que significa ‘sem preparo’.

Sistemas de manejo conservacionistas são aqueles que visam a reduzir o excessivo revolvimento do solo, mantendo os resíduos culturais na sua superfície para minimizar o impacto sobre o meio ambiente. Segundo Denardin e Kochhann (1993), essa técnica pode ser definida como um sistema de exploração agropecuário que envolve a diversificação de espécies via rotação de culturas, as quais são estabelecidas na lavoura mediante a mobilização de solo, exclusivamente, na linha de semeadura, mantendo-se os resíduos vegetais das culturas anteriores na superfície do solo.

Salton et al., (1998) definiram o plantio direto como uma forma de manejo conservacionista que envolve um conjunto ordenado de ações, de processos, de mecanismos e de técnicas adequadas para aumentar a produtividade, conservando ou melhorando continuamente o meio ambiente.

O PD foi introduzido no Brasil no início da década de 1970. As primeiras experiências com essa técnica objetivaram controlar a erosão nas lavouras cultivadas com a sucessão de

culturas de trigo e soja na região Sul do País (Denardin e Kochhann, 1993). Elas foram decorrência de trabalhos de americanos e ingleses com o surgimento do primeiro herbicida de contato, o Paraquat, que entrou no mercado no início dos anos sessenta.

A expansão do PD no Brasil foi lenta até o domínio pleno da tecnologia. Seu início deu-se nos Estados do Paraná e Rio Grande do Sul, em 1970, e só passou a ser adotado pelos agricultores a partir de 1976. Atualmente, está sendo adaptado e adotado em quase todas as regiões do Brasil.

Por ser um sistema que não revolve o solo e que está fundamentado na presença de restos culturais sobre a superfície e em sistemas de rotação de culturas, uma série de modificações ocorre no ambiente do solo e afeta o desenvolvimento e a produtividade das culturas (Saturnino, 2001).

A recuperação e a manutenção da melhor condição estrutural do solo favorecem o crescimento radicular, melhoram o controle da erosão, mantêm a umidade e a aeração e reduzem as oscilações hídricas e térmicas. O PD possibilita melhores condições de conservação de umidade para o crescimento e o desenvolvimento das culturas, minimizando os efeitos adversos causados pelo déficit hídrico. Esse fato reveste-se de grande importância em face da alta ocorrência de veranicos, aliada à baixa capacidade de armazenamento de água no solo.

Outro fator importante é que o PD também constitui meio importante no controle do processo de erosão que representa o fator mais negativo para a sustentabilidade econômica e física da atividade agrícola. O não-revolvimento do solo no PD, assim como a cobertura morta que, depositada sobre a superfície atua como dissipadora de energia protege o solo do impacto causado pela chuva e evita o selamento superficial, ou seja, diminui a obstrução de poros na superfície do solo, favorecendo o aumento da taxa de infiltração de água e conseqüentemente, diminuindo a erosão hídrica (Scopel et al., 1998).

Como se pode observar é visível a consequência do PD em fases importantes do ciclo hidrológico, sendo o escoamento superficial, a infiltração, a umidade e a evaporação de água do solo seriamente alterados. A influência dos resíduos sobre o balanço hídrico das culturas está cada vez mais acentuada, pois os resíduos remanescentes no solo tornaram-se condição básica para o sucesso do PD e como modificadores dos fluxos hídricos no sistema palha-solo-planta-atmosfera. Eles alteram o balanço de água no solo pelo fato de contribuírem para aumentar a infiltração (Lal, 1998) e reduzir a evaporação direta da água do solo (Gicheru (1994)) e escoamento superficial (Sur et al., (1992)). Segundo Novak et al., (2000) os resíduos

funcionam como uma camada dissipadora da radiação solar e diminuem as amplitudes térmicas do solo Scopel et al., (1998).

2.4.2 Plantio convencional

O sistema de plantio convencional pode ser definido como o revolvimento de camadas superficiais para reduzir a compactação, incorporar corretivos e fertilizantes, aumentar os espaços porosos e, com isso, elevar a permeabilidade e o armazenamento de ar e água. O revolvimento do solo promove o corte e o enterrio das plantas daninhas e auxilia no controle de pragas e patógenos do solo e, além disso, esse processo facilita o crescimento das raízes das plantas.

Dessa forma o preparo convencional do solo é realizado, basicamente, com aração e gradagens, cujo arado efetua o corte, elevação, inversão e queda, com um efeito de esboroamento de fatias de solo denominadas de leivas. A grade complementa esse trabalho, diminuindo o tamanho dos torrões na superfície, além de nivelar o terreno. Entretanto, tal prática pode acarretar sérios problemas com o passar dos anos (Gabriel Filho et al., 2000).

Os sistemas convencionais de cultivo, envolvendo aração e gradagem, são considerados os de maior poder de degradação, resultando na maioria das vezes na redução dos teores de matéria orgânica do solo (Bayer; Mielniczuk, 1999) Segundo Bayer e Mielniczuk (1999), as perdas da matéria orgânica do solo são favorecidas, principalmente pelo revolvimento do solo e conseqüente destruição dos agregados, maior fragmentação e incorporação dos resíduos vegetais e diminuição da cobertura do solo, que resultam em alterações na temperatura, umidade e aeração do solo.

Revolvendo-se o solo, altera-se a agregação, principalmente das argilas, que retém a maior parte dos nutrientes necessários às plantas, facilitando o seu arraste pela ação da chuva e do vento, causando erosão (Wursche e Denardin, 1980). Segundo os autores, com a inversão das leivas, enterra-se a cobertura vegetal deixando a superfície do solo exposta aos agentes da erosão e, também, à maior evaporação da água armazenada no solo.

2.4.3 Diferenças dos sistemas

Os sistemas de plantio direto (PD) e convencional (PC) se diferenciam principalmente pelo fato de no primeiro não haver revolvimento do solo antes da semeadura das culturas. No sítio de Cruz Alta, por exemplo, na parcela onde este sistema de plantio está em curso, o solo não é revolvido desde 1986. Com isso todos os resíduos das culturas ficam depositados sobre o solo (Figura 2.1), para que depois da decomposição se incorporem lentamente à camada superficial do solo. A presença dos resíduos sobre a superfície forma uma camada que interfere em muitos aspectos, principalmente na preservação da umidade do solo, alteração no albedo superficial e diminuição da temperatura do solo. Em relação à umidade do solo, Tormena et al., (2002) e Klein e Libardi (2002) compararam o PD e PC para diferentes tipos de solo e culturas identificando propriedades favoráveis ao aumento no armazenamento de água no PD. Além disso, estudos indicam que a gestão de resíduos da superfície em sistemas agrícolas pode auxiliar na conservação da umidade do solo, reduzindo a evapotranspiração e temperatura do solo, devido, principalmente, a um maior albedo de superfície (Kucharik, 2007).



Figura 2.1 - Cultivo da soja no sistema de plantio direto (PD) em Cruz Alta. Na figura, observa-se a presença dos resíduos culturais (palhada) sobre a superfície.

O sistema de plantio convencional (PC) é caracterizado pelo revolvimento do solo antes da implementação das culturas. Isso é feito, na maioria das vezes, pelos processos de aração e gradagem. Assim sendo, os resíduos culturais são incorporados ao solo mecanicamente, não restando nenhuma camada de resíduos sobre a superfície, (Figura 2.2), facilitando a degradação dos mesmos pelos microorganismos.



Figura 2.2 - Cultivo da soja no sistema de plantio convencional (PC) em Cruz Alta. Na figura, observa-se a ausência dos resíduos culturais (palhada) sobre a superfície.

Práticas agrícolas adotadas no preparo convencional ocasionam aumentos nas taxas de perda de matéria orgânica.

Os resíduos vegetais são a principal fonte de carbono para o solo, obtido pela transformação do CO_2 da atmosfera em substâncias orgânicas no processo de fotossíntese. As transformações biológicas destas substâncias orgânicas, adicionadas ao solo, geram a matéria orgânica do solo. Desta forma, avaliar a adição de resíduos culturais por diferentes sistemas de culturas inseridas em sistemas de preparo do solo e, conseqüentemente a entrada de carbono no solo, torna-se importante.

O modelo Agro-IBIS não possui em seu código a representação dos resíduos culturais (Palhada). Assim, todos os resultados simulados apresentados neste trabalho são para a

condição de plantio convencional. Estes resultados serão comparados com os dados observados em PD e PC, para uma avaliação dos diferentes manejos do solo em relação ao modelo.

3 MEDIDAS EXPERIMENTAIS E DADOS UTILIZADOS

3.1 Descrição do sítio experimental

As observações experimentais foram realizadas na Fundação Centro de Pesquisas Experimentais (CCGL TEC / FUNDACEP), em Cruz Alta no noroeste do Rio Grande do Sul, Sul do Brasil. O clima da região é do tipo Cfa (Köppen), subtropical úmido, com precipitação média anual de 1755 mm e chuvas distribuídas uniformemente durante o ano. A vegetação original da região do sítio 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 50 a região foi desmatada e convertida em lavouras comerciais, onde a sucessão trigo / soja foi cultivada em plantio convencional. O experimento foi instalado em 1985, com o objetivo de comparar sistemas de plantio direto e convencional, e vem sendo realizado até hoje. A montagem experimental consiste de uma matriz de 40 m X 60 m parcelas dispostos em pares, como mostrado na figura 3.1. Experimentos com diferentes culturas são realizados em cada par de parcelas, uma com sistema PD e o outro com sistema de PC.

Uma grande variedade de medições de solo e atmosférica tem 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).

Neste estudo foram utilizados dados coletados em parcelas sob PC e PD, onde vem sendo realizado a rotação de cultura de 3 anos seguintes: Ano 1: ervilhaca comum (*Vicia sativa* L.) misturado com aveia preta no inverno e milho (*Zea mays* L.) no Verão; Ano 2: trigo no inverno e soja no verão e Ano 3: aveia preta no inverno e soja no verão. A soja cultivada no último período foi avaliado neste trabalho, onde também foi cultivada na região circundante, com aproximadamente 200 hectares. A cultivar de soja utilizada foi 53RR

Fundacep de ciclo precoce. Os estágios da soja foram determinados utilizando a escala fenológica proposta por Fehr & Caviness (1977).

O ciclo da soja no sítio experimental de Cruz Alta avaliada neste trabalho iniciou no dia 14 de Dezembro de 2009 com a semeadura. No dia 13 de Abril de 2010 ocorreu à maturação fisiológica, e a colheita foi realizada no dia 28 de Abril de 2010. Normalmente, o plantio de soja nesta região ocorre em novembro, mas devido ao excesso de chuvas durante o mês de novembro deste ano, a semeadura foi atrasada. Após a maturidade fisiológica, também foi observada uma grande quantidade de chuvas, durante duas semanas, atrasando a colheita.

O controle de plantas daninhas foi realizado aproximadamente 25 e 40 dias após a semeadura. A adubação e os demais tratos culturais foram realizados segundo as indicações técnicas.

O solo do sítio experimental é Rhodic Hapludox (FAO) or Typic Haplorthox (US Soil Taxonomy), argiloso e profundo com uma inclinação de 1%. A uma profundidade de 0-0,20 m, este solo possui as seguintes características: argila = 520 g kg⁻¹, silte = 240 g kg⁻¹, areia 240 g kg⁻¹, matéria orgânica (Walkley-Black) = 32 g kg⁻¹, pH_(H₂O) = 5.5, P_(Mehlich-1) = 17 mg kg⁻¹, K_(Mehlich-1) = 0.38 cmol_c kg⁻¹, Al_(KCl 1M) = 0.20 cmol_c kg⁻¹, e Ca+Mg_(KCl 1M) = 6.60 cmol_c kg⁻¹.

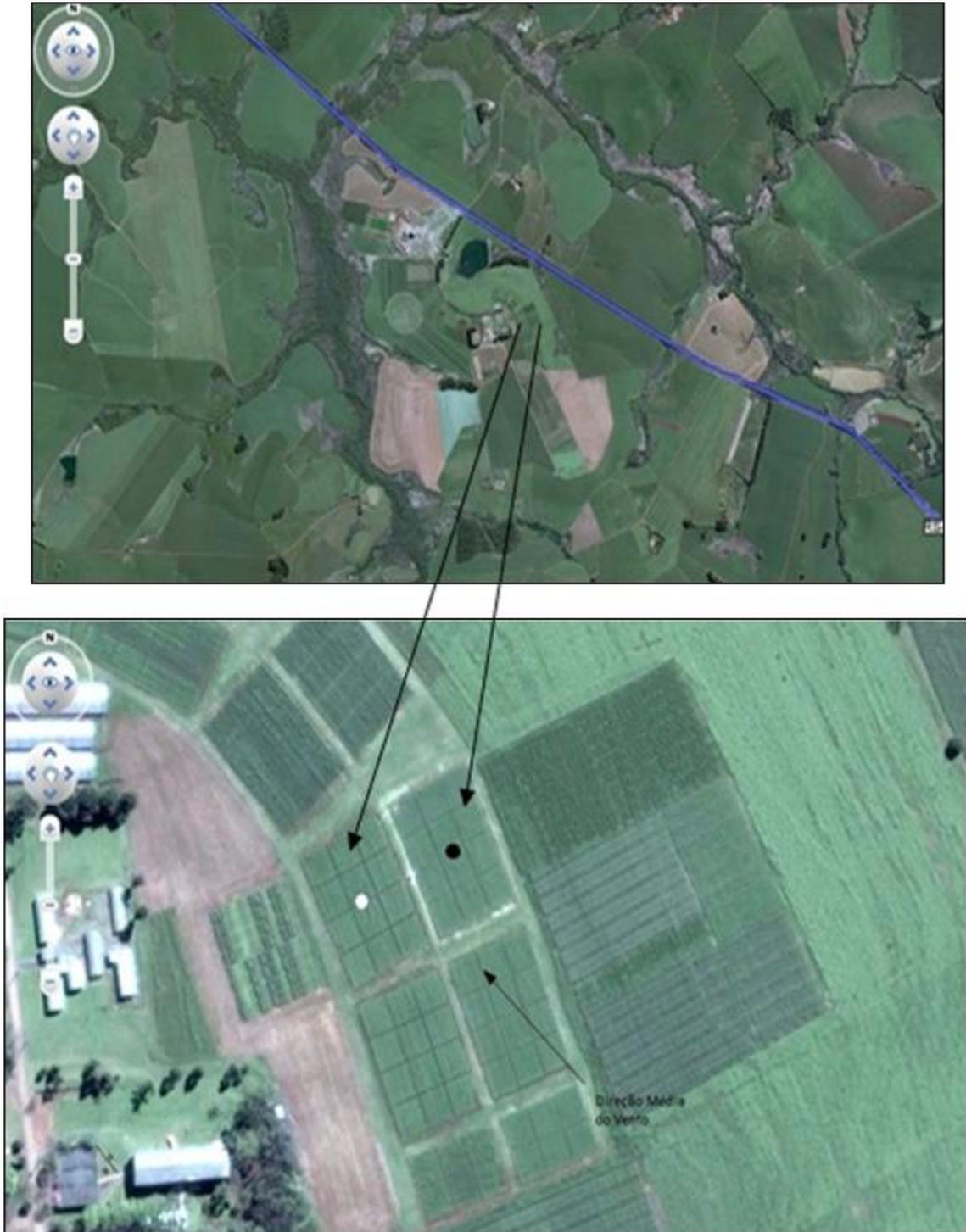


Figura 3.1 – Sítio experimental de Cruz Alta localizado no Sul da América do Sul.

O ponto branco representa a torre de fluxo no sistema de plantio convencional, enquanto o ponto preto representa a torre do plantio direto. A direção média do vento é predominante de Sudeste (seta preta). A figura não foi obtida na época da realização do experimento analisado nesta tese

Fonte: Adaptado Google Maps Brasil: <https://maps.google.com.br/maps?hl=pt-BR>. Acesso em 10 de Jun. 2012.

3.2 Escoamento superficial e conteúdo de água no solo

O escoamento superficial foi estimado a partir de medidas realizadas por 8 estruturas metálicas galvanizadas, instaladas na área experimental (4 em cada sistema de plantio). Essas estruturas foram dimensionadas e dispostas sobre o terreno de modo a obter um escoamento médio representativo da área de estudo. As estruturas, com dimensões de 1 m² x 15 cm, foram enterradas no solo a uma profundidade de 7,5 cm e munidas com sistema coletor de água, na extremidade mais baixa, conforme mostrado na figura 3.2. As perdas de água foram avaliadas diariamente, nos recipientes coletores após cada evento de chuva.



Figura 3.2 - Estruturas metálicas galvanizadas para estimar escoamento superficial.

O conteúdo de água no solo foi determinado através de um sensor TDR (*Time Domain Reflectometry*) modelo CS616-L da *Campbell Scientific*. As hastes do sensor foram inseridas desde a superfície até 0,20m de profundidade, e de 0,20 a 0,50m de profundidade com um ângulo de inclinação que permita monitorar toda a camada de solo delimitada. O sensor consiste de duas hastes de 0,30m de comprimento em aço inoxidável, ligadas ao sistema *datalogger* (CR 1000) de aquisição e armazenamento de dados, o qual monitora o conteúdo volumétrico de água (m³. m⁻³) nas camadas 0 – 0,20m; 0,20m – 0,50m. Os sensores foram instalados a 5m de cada torre micrometeorológica, nas parcelas com os diferentes sistemas de plantio de soja. Em cada parcela, o primeiro sensor foi colocado formando um ângulo de 5 graus com a superfície, estimando o volume de água nos primeiros 0,20m do solo. O segundo foi inserido verticalmente no solo desde a profundidade de 0,20m até 0,50m para integrar

volume de água na camada de 0,20m a 0,50m. A taxa de amostragem utilizada foi de uma medida por minuto em todas as parcelas. As medidas foram iniciadas em 19 de dezembro de 2009, cinco dias após o plantio, e mantiveram-se até o final do experimento.

3.3 Medidas de solo

Nas áreas dos dois sistemas de plantio foram abertas trincheiras para a caracterização dos solos nas diferentes camadas e amostras extras de superfície. Foram coletadas amostras de solo com estrutura deformada para a determinação da textura, densidade de partículas e curva de retenção de água no solo (WP4 – *Dewpoint Potential Meter*) e amostras com estrutura não-deformada para a determinação da condutividade hidráulica saturada ($K_{\theta s}$), densidade do solo (ρ_b) e curva de retenção de água no solo (câmara de Richards) (Embrapa, 1997; van Lier, 2010).

A macroporosidade (Mac) foi calculada pela diferença entre a porosidade total (P) e o conteúdo de água na tensão 6 kPa. A microporosidade (Mic) foi estimada pela diferença entre a porosidade total (P) e a macroporosidade (Mac). A estimativa do ponto de murcha permanente (PMP) que é o teor de umidade no qual a planta não consegue mais retirar água do solo, foi estimada pelo conteúdo de água na tensão 1500 kPa, e a capacidade de campo (CC), onde é capacidade máxima do solo em reter água, acima da qual ocorrem perdas por percolação de água no perfil ou por escoamento superficial, foi estimada na tensão 10 KPa, sendo a estimativa da água disponível a cultura determinada pela diferença entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP). A condutividade hidráulica saturada ($K_{\theta s}$) foi determinada utilizando-se um permeâmetro de carga decrescente (Gubiani et al., 2010).

A caracterização físico-hídrica das amostras permitiu estimar a capacidade de retenção de água no solo, além de avaliar os impactos dos sistemas de manejo nas propriedades físicas do solo e o reflexo da sua influência sobre os fluxos e retenção de água no solo.

3.4 Fenologia da cultura

O Índice de Área Foliar (IAF) é uma das principais características biofísicas dos ecossistemas. Ele influi em muitos processos, entre eles o balanço de energia, água e a capacidade fotossintética. Assim, se torna uma variável importante para caracterizar um ecossistema e permitir que se estime sua influência no ambiente. No presente estudo o índice de área foliar (IAF) foi determinado a partir da coleta de quatro plantas distribuídas aleatoriamente em cada sistema de plantio. As folhas de cada planta foram retiradas e dispostas sobre uma área conhecida e fotografada. As fotos foram então processadas através do programa *Assess 2.0: Image Analysis Software for Plant Disease Quantification* (Lamari, 2008), que determinou a área da superfície coberta por folhas, portanto, permitindo o cálculo do índice de área foliar (IAF).

3.5 Medidas atmosféricas

As medidas micrometeorológicas foram coletadas pela técnica de vórtice turbulento, e os sensores foram instalados em ambos os sistemas de plantios a uma altura de 2,5 m durante a época de cultivo da soja na safra 2009/2010 (Figura 3.1). Este sítio faz parte do projeto Sulflux (www.ufsm.br/sulflux). As torres micrometeorológicas instaladas nos sistemas PD e PC são compostas de sensores que realizam as medidas na frequência de 10 Hz, no sistema PC a torre é composta dos sensores identificados com o símbolo ‘*’ descritos na tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Variáveis coletadas nas torres micrometeorológicas com as medidas, identificação dos sensores e altura/profundidade de instalação.

Medidas	Instrumento	Altura
Velocidade do vento *	Campbell Scientific – CSAT 3	2,5 m
Temperatura do ar *	Campbell Scientific – CSAT 3	2,5 m
Analisador de gás e pressão *	LiCor, LI7500	2,5 m
Radiação de onda curta	Kipp & Zonen, CMB6	5 m
Radiação líquida	Kipp & Zonen, NR LITE	5 m
Radiação fotossinteticamente ativa (PAR)	Kipp & Zonen, PAR LITE	1 m
Fluxo de calor no solo	Hukseflux, HFP01SC-L	-2 cm
Precipitação	Texas Instruments	1,5 m
Temperatura do solo	Campbell Scientific, TCAV-L	-2 cm
Conteúdo de água no solo *	Campbell Scientific, CS 616-L	-20 cm, -50 cm

As torres com os sensores foram instaladas no centro de cada uma das duas parcelas de 40m x 60 m, descritas na seção (3.1)

Cerca de 400 metros das torres micrometeorológicas, há uma estação meteorológica, que mede as forçantes atmosféricas desde 1974. Variáveis climáticas descritas neste estudo foram obtidas nesta estação.

3.6 Processamento e preenchimento dos dados de fluxo

O Processamento de dados de fluxos turbulentos foi corrigido utilizando métodos padrão, que incluem a rotação de coordenadas e correções com relação à densidade do ar (Webb et al., 1980; Baldocchi et al., 1988; Wyngaard, 1990; Aubinet et al., 2000). No entanto, a ausência de dados é um problema comum em medidas micrometeorológicas de longo prazo, seja por falhas dos equipamentos, manutenção do sistema, problemas em sensores, falta de energia, falha humana, coleta de dados, controle de qualidade dos dados, entre outros. Fluxos de calor latente (LE, $W m^{-2}$) foram estimados em períodos de 30 minutos e os períodos que apresentaram falhas fisicamente inconsistentes (ou seja, valores LE $<-50 W m^{-2}$ ou $> 1000 W$

m⁻²) foram descartados. Este procedimento de controle de qualidade dos dados deixou um intervalo de falhas total de cerca de 27% para a torre do PD e 21% para a torre PC com relação a todo o período. Os valores de preenchimento foram de baixa porcentagem, quando comparado com outras medições de *eddy covariance*, demonstrando a qualidade relativamente elevada dos dados coletados para o período. Além disso, a maior lacuna de falha contínua não foi superior a dois dias de dados brutos.

Nesse trabalho o preenchimento de falhas para os fluxos de calor latente ocorreu de duas formas: para falhas de até 2 horas, dados faltantes foram preenchidos utilizando um método de interpolação simples. Para falhas maiores que 2 horas e menores que 4 dias foi utilizado o método da variação diurna média (*Mean Diurnal Variation - MDV*) (Falge et al., 2001). Este método consiste em preencher a falha de um determinado horário utilizando a média de 7 dias sucessivos para este mesmo horário.

3.7 Adaptação do modelo

A aplicação do modelo Agro-IBIS ao estudo exigiu o ajuste de parâmetros físicos do solo e da cultura às condições do sítio experimental. Para isso os resultados das análises do solo em ambos os plantios foram utilizados e confrontados para definição das simulações numéricas.

As principais diferenças observadas no solo foram em relação à porosidade e à condutividade hidráulica e decorrem dos efeitos associados às mudanças na estrutura do solo no plantio direto quando comparado ao convencional.

A tabela 3.2 mostra que, o solo do plantio convencional é mais poroso do que o plantio direto. Em termos de condutividade hidráulica o solo do plantio convencional é mais permeável ao fluxo de água do que o plantio direto. As demais propriedades físicas do solo, como granulometria, mostraram pequena variação entre os sistemas de plantio.

As funções usadas pelo modelo Agro-IBIS para descrever as relações entre o conteúdo volumétrico de água (θ em m³/m³) e o respectivo potencial matricial do solo ψ (kPa), ou seja, a curva de retenção de água no solo é dada pelas equações de Campbell (1974), definidas por:

$$\theta = \theta_s \quad \text{se } \psi \geq \psi_s \quad (8)$$

$$\theta = \theta_s \left(\frac{\psi}{\psi_s} \right)^{-\frac{1}{b}} \quad \text{se } \psi < \psi_s \quad (9)$$

onde o conteúdo volumétrico de água no solo é relacionado com o potencial matricial de água no solo através da porosidade e do potencial matricial a saturação. O parâmetro “*b*” representa a inclinação da curva de retenção de água no solo linearizada e precisa ser ajustado aos dados de campo. Os valores dos parâmetros da curva de retenção foram determinados em laboratório, através da técnica da câmara de Richards. Os valores do parâmetro *b* na equação (9) foram obtidos considerando os dados da camada de solo de 0 a 50 cm de espessura, e o ajuste linear da curva de retenção indicou um parâmetro maior no solo do plantio convencional em relação ao plantio direto.

Tabela 3.2 - Características físico-hídricas do solo utilizadas no modelo Agro-IBIS.

	Areia	Silte	Argila	θ_s	<i>b</i>	Ψ_0	<i>Ks</i>
PC	0,24	0,29	0,45	0,615	8,125	0,11	$3,67e^{-05}$
PD	0,26	0,31	0,43	0,545	7,875	0,11	$2,75e^{-06}$

Fração de areia (%), fração de silte (%), fração de argila (%), porosidade (θ_s) ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$), expoente de Campbell (*b*), potencial de entrada de ar (Ψ_0), condutividade hidráulica saturada (*Ks*).

3.7.1 Desenvolvimento da cultura e ajuste do índice de área foliar

Segundo Webler et al., (2012) o modelo mostra-se adequado para simular a fenologia da cultura, antes do período de senescência foliar. Uma fonte constante de incerteza em termos de simulação é como tratar adequadamente a senescência foliar em sistemas agrícolas. Essa dificuldade é recorrente e tem sido citada em trabalhos semelhantes anteriormente (Suyker et al., 2005).

Kucharik e Twine (2007) também relatam a importância e a necessidade de melhorias na representação de senescência foliar dos agroecossistemas. Além dos problemas identificados no estudo relacionado à soja, a avaliação do modelo SiB2 (*Simple Biosphere Model*, Sellers et al., 1996c) adaptado para a cultura do trigo realizada por Hanan et al., (2005) também citaram problemas com a simulação da senescência foliar. Segundo eles, isso ocorre em virtude da dificuldade em parametrizar a relação entre a mudança na área foliar causada pela senescência e a atividade fisiológica das plantas.

No modelo Agro-IBIS, o acúmulo do carbono nas folhas é utilizado para calcular o IAF diariamente. A senescência foliar é induzida quando a respiração da folha excedeu o crescimento da folha diária, causado pela perda de biomassa. O decréscimo do IAF na fase da senescência é expresso como uma função que depende da função senescente: razão entre a diferença diária dos graus dias crescentes na fase de senescência (gdd_{plant}) e o ($huigrain$) pelo ($gdd_{maturity}$), conforme a seguinte equação:

$$IAF_j = IAF_{j-1} X \left(1 - \left(\frac{gdd_{plant} - huigrain}{0.55 gdd_{plant}} \right)^{x_{laicons}} \right) \quad (10)$$

A figura 3.3 apresenta a comparação do IAF obtido pelo Agro-IBIS na simulação realizada por Webler et al., 2012 com a expressão sem ajuste e com a expressão com ajuste na fase de senescência foliar e o experimental. Utilizando a equação (10), a fase da senescência foliar, estabelece um decaimento do IAF mais rápido no início da senescência e mais lento no final, divergindo dos dados experimentais.

Esse comportamento é o responsável pela manutenção de altos valores para o IAF mesmo na fase de colheita. Uma nova expressão para o decaimento foliar da fase de senescência é introduzida, sendo esta representada por um decaimento exponencial dinâmico que depende da função senescente, seguindo a equação abaixo:

$$IAF_j = IAF_{j-1} X \left(\left(1 - \frac{gdd_{plant} - huigrain}{0.55 gdd_{maturity}} \right)^{a \left(\frac{gdd_{plant} huigrain}{gdd_{maturity}} \right)} \right) \quad (11)$$

onde $a = 9,5$ foi obtido através do menor erro quadrático entre os IAF simulado e o experimental para o PC.

Observando a representação das equações 10 e 11 na figura 3.3 nota-se que para o período de senescência, após 88° DAE, o IAF obtido da equação (10) não acompanha a senescência da planta excedendo o número de GDD necessário para atingir a maturidade fisiológica. Em 108° DAE, é o período de senescência foliar, o valor do IAF não ajustado é cerca de $3 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$, enquanto IAF ajustado equação (11) é $0,58 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$, muito próximo dos valores observados. Isto pode interferir diretamente em todos os componentes do balanço de água.

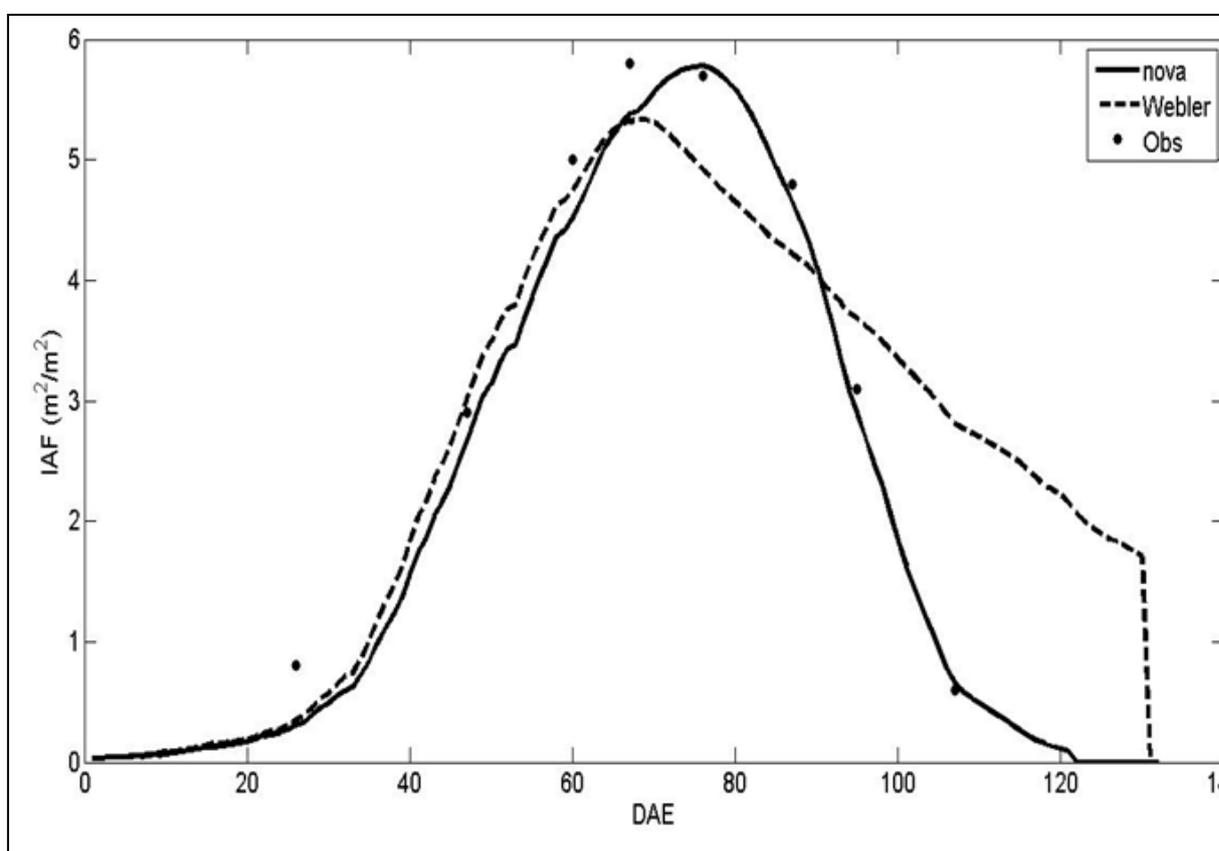


Figura 3.3 - Índice de área foliar (IAF), observado e simulado com duas equações diferentes no modelo Agro-IBIS.

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1 Condições ambientais e índice de área foliar (IAF)

Os valores médios diários da radiação solar global R_g (Wm^{-2}), temperatura do ar T ($^{\circ}C$), umidade relativa UR (%) e déficit de pressão de vapor DPV (kPa) foram computados para a período entre a emergência da soja e colheita (19 Dezembro de 2009 a 25 Abril de 2010) mostrado na figura 4.1 a 4.4. A média diária da radiação solar global foi de $236 Wm^{-2}$, atingindo seu valor máximo, de aproximadamente $400 Wm^{-2}$, próximo ao solstício de verão no Hemisfério Sul (23 Dezembro). A temperatura média diária variou entre $14,5$ e $28,5$ $^{\circ}C$ com a média durante todo o período de $22,8$ $^{\circ}C$, um valor ligeiramente acima da média histórica de $21,9$ $^{\circ}C$. A umidade relativa média diária variou entre $54,5$ e $95,7\%$, com a média durante todo o período de $77,4\%$. A figura 4.4 mostra o déficit de pressão de vapor, onde apresenta uma média no período do ciclo da soja de $0,63$ kPa.

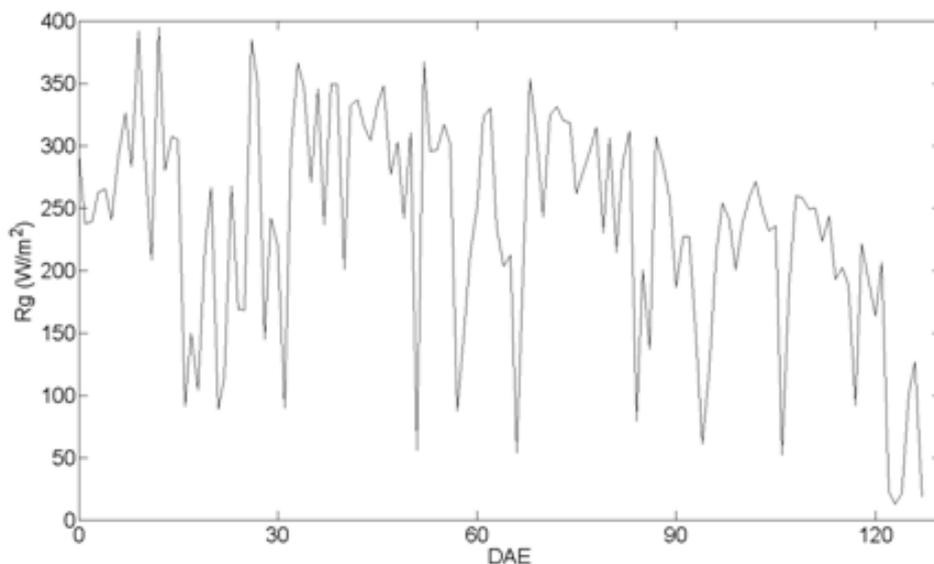


Figura 4.1 - Valores médios diários da radiação solar global.

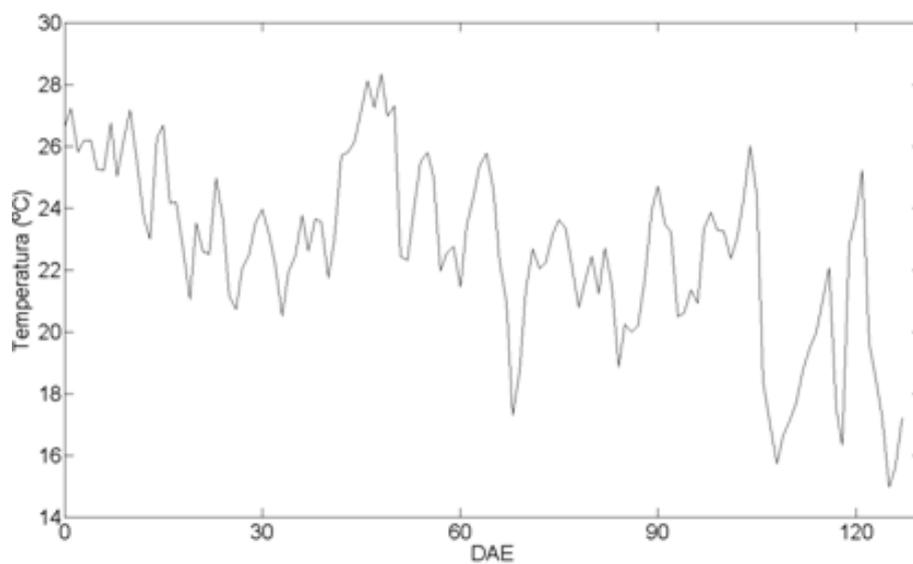


Figura 4.2 - Valores médios diários da temperatura para o ciclo da soja.

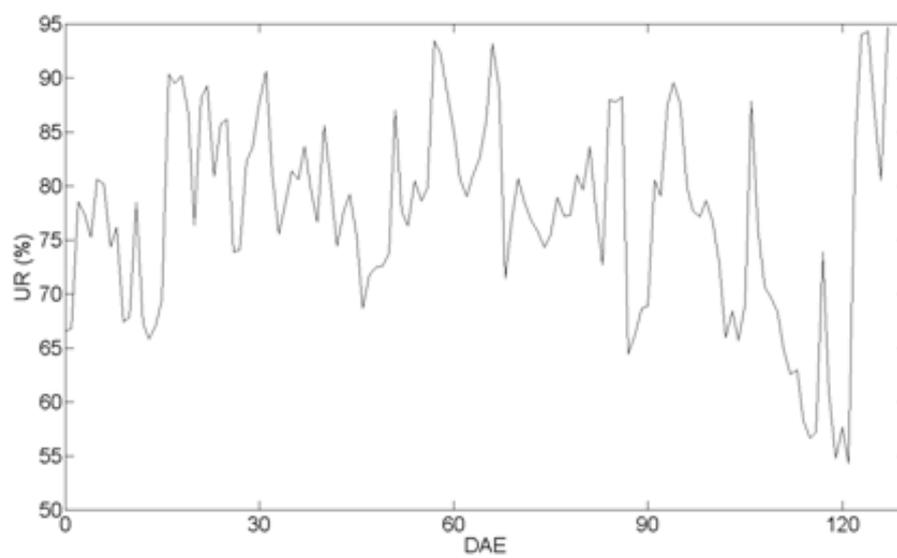


Figura 4.3 - Valores médios diários da umidade relativa.

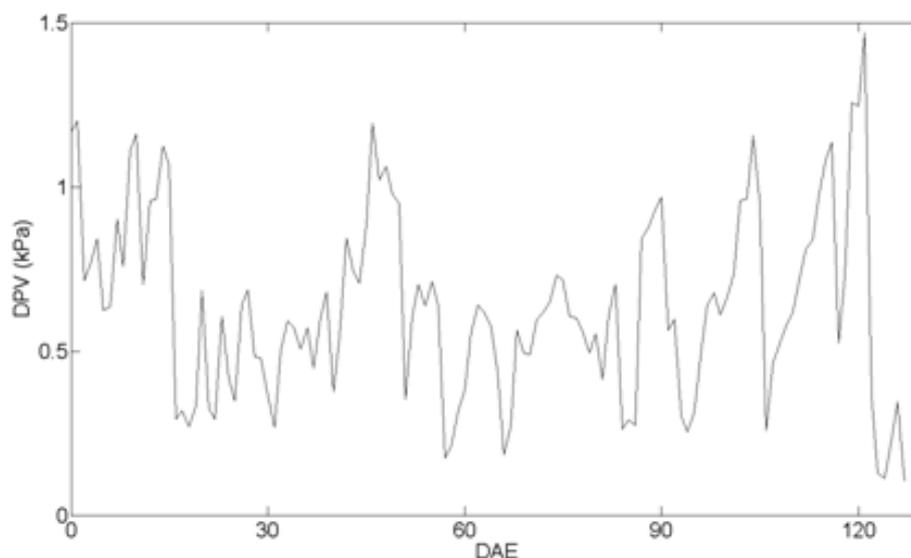


Figura 4.4 - Valores médios diários do déficit de pressão de vapor.

Valores de IAF foram medidos em fases fenológicas da soja, tal como apresentado na tabela 4.1. O valor máximo encontrado para o IAF, cerca de 70 dias após a emergência (DAE), foi de $6,1 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$ para o sistema PD e $5,8 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$ para as medições no sistema PC. Os valores do IAF foram sistematicamente maiores para o PD, quando comparado ao PC, exceto no final do ciclo, quando esses valores foram iguais para ambos os sistemas. As plantas de soja, portanto, na fase madura do sistema PD tiveram maior cobertura de dossel, quando comparado ao sistema de PC.

Tabela 4.1 – Índice de Área Foliar (IAF), estágios fenológicos para o cultivo de soja sob plantio direto (PD) e convencional (PC) em dias após a emergência (DAE).

Estágios Fenológicos	EM	V 6	V 13	R 3	R 4	R 5.1	R 5.3	R 5.4	R 6	MAT
DAE	1	23	47	62	70	76	90	98	107	115
IAF PD	-	1,2	4,5	5,8	6,1	5,2	6,0	4,3	0,6	-
(m^2m^{-2}) PC	-	0,8	2,9	5,0	5,8	4,8	5,7	3,1	0,6	-

4.2 Medidas de solo

Muitos fatores podem influenciar as características espaciais e temporais do solo, tais como processos geoquímicos ou erosão. Kay e Van den Bygaart, (2002) mostraram que ocorrem mudanças na física do solo devido a variações na cobertura vegetal. Assim, as comparações entre diferentes manejos necessitam de cuidados e diferenças devido à heterogeneidade do solo e também as práticas de gestão de longo prazo devem ser consideradas. No sistema plantio direto, em geral, os solos apresentam após três a quatro anos, maiores valores de densidade do solo e microporosidade na camada superficial, e menores valores de macroporosidade e porosidade total, quando comparado com o preparo convencional. Isto ocorre, sobretudo pelo arranjo natural do solo não mobilizado, e pela pressão provocada pelo trânsito de máquinas e implementos agrícolas, em particular quando realizado em solos argilosos e com teores elevados de umidade (Silveira e Stone, 2003). No experimento aqui apresentado, as parcelas têm a mesma história do uso da terra e são apenas 10 m distante, a fim de assegurar a homogeneidade do solo. Desta forma, as diferenças encontradas no experimento são devidas principalmente ao manejo do solo.

As características físico hídricas do solo nos sistemas PC e PD, nas profundidades 0,05, 0,12, 0,30 e 0,60 m são mostradas na tabela 4.2. Considerando o perfil do solo como uma única camada de superfície de 0,60 m para comparação, as variáveis de densidade do solo (ρ_b), porosidade total (P), macroporosidade (Mac) e capacidade de água disponível (CAD), mostrou diferenças superiores a 90% entre os sistemas de PC e PD, enquanto a microporosidade (Mic), capacidade de campo (CC) e ponto de murcha (PMP) não foram estatisticamente diferentes entre os dois sistemas. A ρ_b na superfície (0,05 m) é igual nos dois sistemas, possivelmente influenciados pela atividade biológica do solo, atividades das raízes e maior presença de matéria orgânica.

Tabela 4.2. Características físico-hídricas dos solos sob (PD) e (PC) em diferentes profundidades.

Prof. (m)	(ρ_b)		(P)		(Mac)		(Mic)	
	PC	PD	PC	PD	PC	PD	PC	PD
0,05	1,34	1,34	0,48	0,62	0,12	0,12	0,36	0,51
0,12	1,28	1,35	0,49	0,45	0,13	0,09	0,36	0,36
0,30	1,24	1,30	0,48	0,46	0,10	0,08	0,38	0,38
0,60	1,13	1,19	0,53	0,49	0,14	0,11	0,39	0,39

Prof. (m)	(CC)		(PMP)		(CAD)		(K_{θ_s})	
	PC	PD	PC	PD	PC	PD	PC	PD
0,05	34	49	18	17	16	32	409	1
0,12	34	34	17	17	17	17	34	17
0,30	36	36	20	19	16	17	164	13
0,60	36	36	22	21	14	16	20	7

Densidade do solo (ρ_b) (g/cm^3), Porosidade total (P), ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$), Macroporosidade (Mac) ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$), microporosidade (Mic) ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$), capacidade de campo (CC), (%), ponto de murcha permanente (PMP) (%), capacidade de água disponível (CAD) (%), condutividade hidráulica do solo (K_{θ_s}) (mm/h).

Nas profundidades superiores a (0,05 m) o sistema PD apresenta valores de ρ_b em média 4% maior que no PC. A porosidade total no PD é maior na camada superficial, sendo justificado pela sua maior microporosidade. A macroporosidade não apresentou diferença na superfície entre os sistemas, mas para a profundidade abaixo de 0,05 m, o PC apresentou maiores valores. A microporosidade apresentou um comportamento inverso, com valores no sistema PD maior na camada superficial, mas não houve diferença nas demais profundidades.

Esses resultados se refletem nos valores de capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PMP), determinados pela curva de retenção de água. A diferença entre ambos define a água disponível para as plantas, que para este sítio, mostra uma maior (CAD) no sistema PD apenas em superfície. Nas camadas inferiores as diferenças não são significativas entre os dois sistemas. A condutividade hidráulica saturada do solo (K_{θ_s})

apresentou uma grande variabilidade para as diferentes profundidades. No entanto, o sistema PC apresentou uma maior condutividade em todas as profundidades.

A $K_{\theta s}$ foi estimada também para o perfil de solo de 0-0,30m e de 0,30-0,60m, cujos valores são apresentados na tabela 4.3. Estes valores foram obtidos considerando as três amostras de solos nas quatro profundidades (0,05m,0,12m,0,30m e 0,60m), totalizando 12 amostras em cada tratamento. A $K_{\theta s}$ apresenta o mesmo comportamento que os obtidos para profundidades pontuais, ou seja, o $K_{\theta s}$ é maior para o PC e o valor médio do $K_{\theta s}$ para o perfil integrado de 0-0,60m foi de 135 mm/h para o PC e de 9,91 mm/h para o PD.

Tabela 4.3 - Condutividade Hidráulica Saturada ($K_{\theta s}$) integrada para diferentes profundidades no (PD) e (PC).

Profundidade (m)	$(K_{\theta s})$ (mm/h)	
	PC	PD
0-0,30	176,41	3,11
0,30-0,60	94,97	8,80
0-0,60	135,69	9,91

Esses resultados permitem inferir que nas áreas com o sistema de plantio direto a taxa de infiltração é reduzida drasticamente quando o solo estiver saturado, podendo gerar maior escoamento superficial. Conseqüentemente, o armazenamento de água do solo pode ser reduzido em função de existir uma restrição na infiltração de água no solo. Entretanto, cabe salientar que o $K_{\theta s}$ assemelha-se a infiltração de água no solo somente na condição de solo saturado.

4.3 Componentes do balanço hídrico

a) Precipitação

Na figura 4.5 é apresentada a precipitação diária acumulada durante o ciclo da cultura de soja, dada em mm/dia. O total acumulado no período analisado foi de 654,8 mm. A precipitação tem um maior acumulado no início do ciclo da cultura até o 45° dia após a emergência (DAE) e após este período ocorreram irregularidades na distribuição da precipitação. Durante o ciclo houve dois períodos de redução hídrica para as plantas de diferentes magnitudes. O primeiro ocorreu entre os 65° e 90° DAE, o segundo abrange o período do 95° e 121° DAE, mas ambos foram de pequeno impacto sobre a produtividade, porém influenciando diretamente o comportamento do conteúdo de água no solo para ambos os sistemas de plantio.

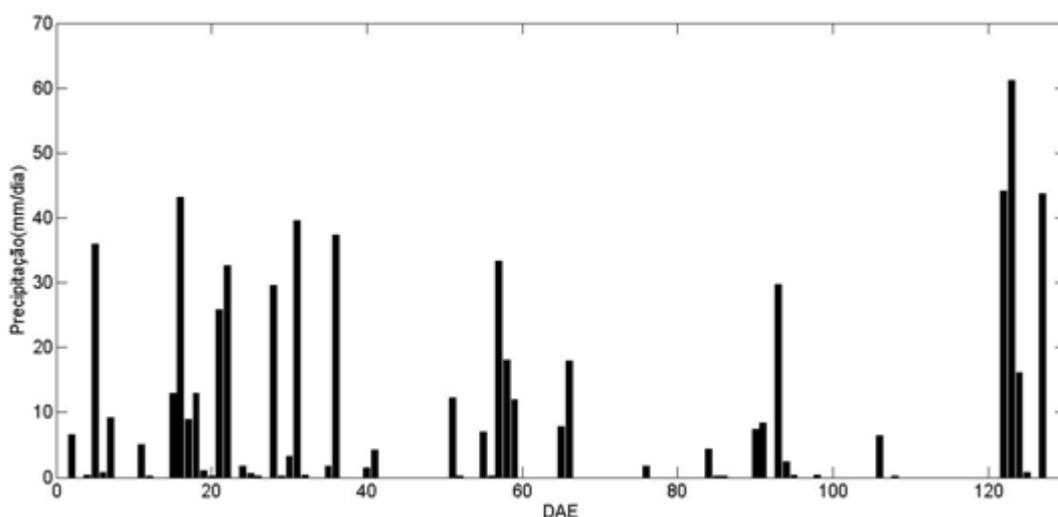


Figura 4.5 - Precipitação diária acumulada durante o ciclo da soja.

b) Armazenamento de água no solo

A importância de se monitorar o conteúdo de água no solo (θ) em diferentes profundidades permite estimar a disponibilidade de água para as plantas e o fluxo de água no

solo. As raízes axiais da soja estão distribuídas, em média, numa profundidade de até 0,20m, enquanto a raiz pivotante costuma atingir profundidades superiores a 0,50m (Tesar, 1984).

Os valores de conteúdo de água no solo nas profundidades de 0-0,20m, 0,20-0,50m e 0-0,50m são apresentados nas figuras 4.6, 4.7 e 4.8 para o sistema PD e PC. O conteúdo de água no solo no sistema plantio convencional na profundidade de 0 – 0,20m foi maior no período de 0 e 45° DAE, onde ocorreram precipitações com maior frequência, e valores menores no período de poucos eventos de chuva (após 45° DAE) em relação ao plantio direto, conforme a figura 4.6. Isto pode estar relacionado diretamente à maior condutividade hidráulica saturada do solo, na qual favoreceu maior infiltração de água à superfície do solo no plantio convencional, devido ao preenchimento de água dos macroporos. Como também na microporosidade a qual foi maior na camada superficial do plantio direto, onde se pode analisar através dos dados físico-hídricos apresentados na tabela 4.2 e 4.3

No entanto para a profundidade de 0,20 a 0,50m o conteúdo de água no solo do sistema plantio direto sempre foi maior do que a apresentada no plantio convencional, isto pode demonstrar o aspecto positivo do efeito do experimento de longo prazo na estrutura do plantio direto, tendo influência da matéria orgânica, quantidade e estruturas dos agregados do solo. Com isso podendo favorecer a disponibilidade de água às plantas por maiores períodos de estiagens na cultura.

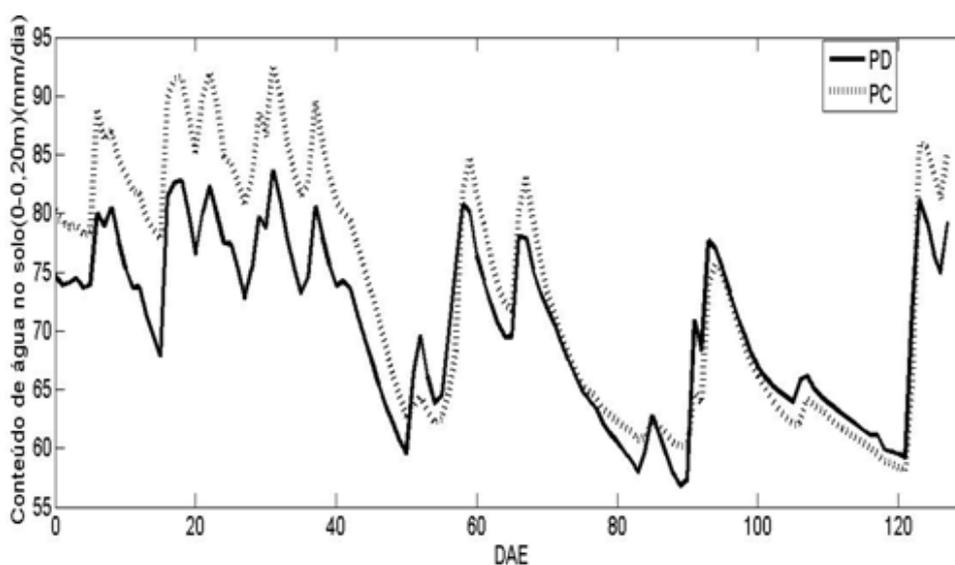


Figura 4.6 - Variação da umidade do solo na camada de (0 - 0,20m) para a estação do ciclo da soja nos sistemas: plantio convencional (PC) e plantio direto (PD).

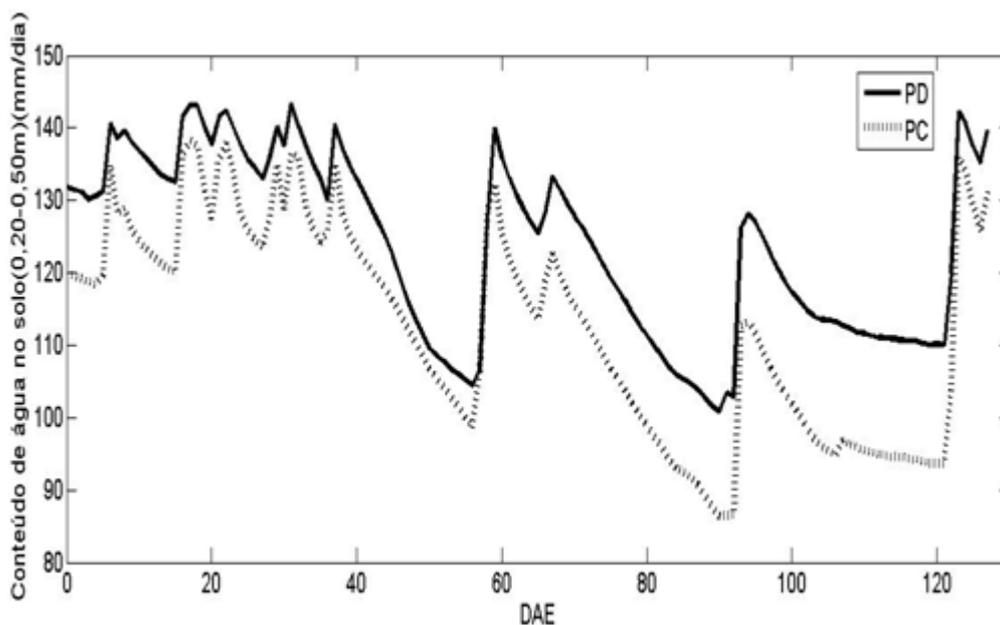


Figura 4.7 - Variação da umidade do solo na camada de (0,20 - 0,50m) para a estação do ciclo da soja nos sistemas: plantio convencional (PC) e plantio direto (PD).

A integração da umidade do solo 0-0,50m demonstra que na primeira metade do ciclo da cultura, quando ocorre a maior taxa de precipitação, os dois sistemas apresentam praticamente o mesmo conteúdo de água no solo e no período de maior redução de conteúdo de água, segunda metade do ciclo, o PD teve um maior conteúdo de água no solo em relação ao PC. No período de maior redução do conteúdo de água no solo, 120 (DAE) o PD apresentou um estoque de água de 17 mm maior do que o apresentado no PC.

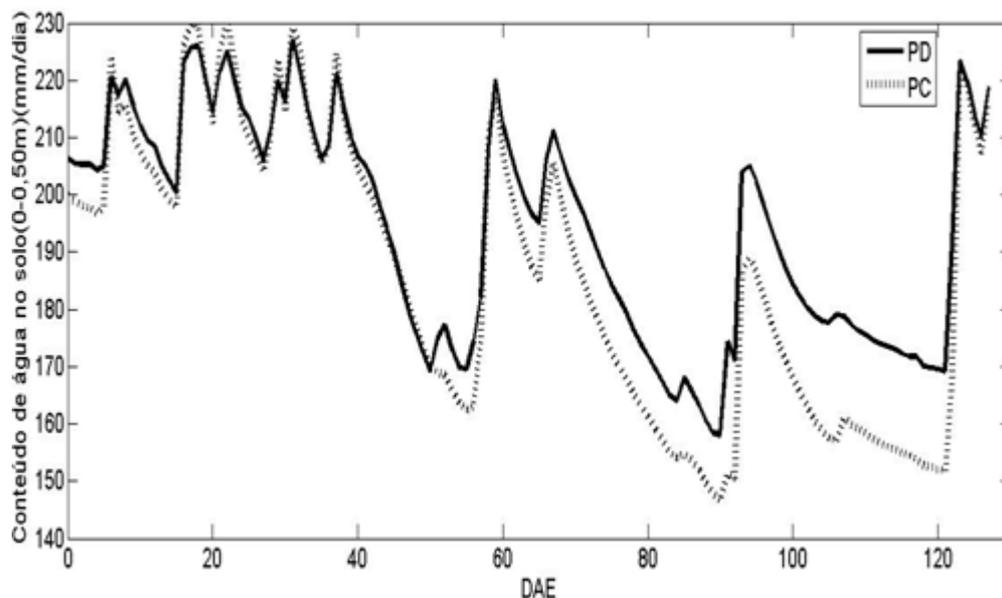


Figura 4.8 - Variação da umidade do solo na camada de (0 - 0,50m) para a estação do ciclo da soja nos sistemas: plantio convencional (PC) e plantio direto (PD).

Para a demanda hídrica Tormena et al., (2002) e Klein e Libardi (2002) identificaram propriedades favoráveis ao aumento na armazenagem de água em plantio direto quando comparadas com o preparo convencional, para diferentes solos em variadas culturas. Verkler et al., (2008) realizou experimentos em uma cultura de soja nos sistemas PD e PC, registrando valores de água no solo ao longo de dois anos (2005 e 2006) a uma profundidade de 0.075m na região do Delta do rio Mississippi nos Estados Unidos. Os resultados mostram que apesar da pouca diferença do estoque de água do solo entre os sistemas de plantio nesta camada, o solo no PD seca mais lentamente e se mantém com maior teor de água, permitindo que haja água disponível ao cultivo por mais tempo.

Segundo Ferreira et al., (2000) os macroporos favorecem a infiltração de água no sistema de plantio direto. O manejo do solo altera a taxa de infiltração de água e o escoamento superficial. Solos sob plantio direto apresentam um aumento da taxa de infiltração de água, quando comparado ao preparo convencional. Isso ocorre devido à presença no sistema plantio direto de uma rede de macroporos contínuos em profundidade (Silva, 2003; Barcelos et al., 1999).

c) Escoamento superficial

Como descrito em detalhes na Seção 3.2 o escoamento representa uma pequena contribuição para o orçamento de água, no entanto, como mostrado na figura 4.9, grandes perdas por escoamento superficial foram registrados no início do ciclo da soja, quando houve acentuadas ocorrências de precipitação.

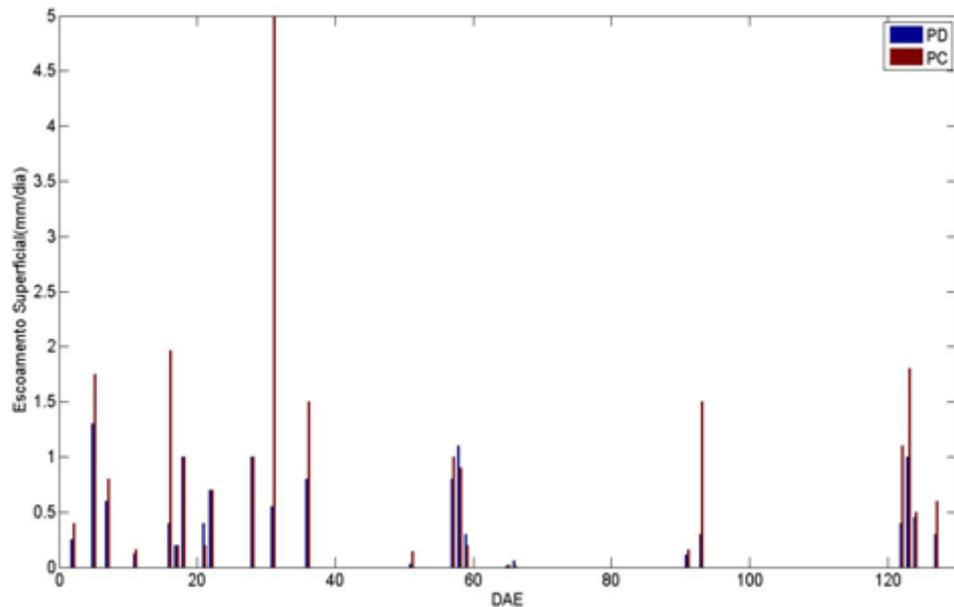


Figura 4.9 - Escoamento superficial nos sistemas: plantio convencional (PC) e plantio direto (PD).

As diferenças nas condições iniciais do solo entre as duas parcelas (ou seja, no sistema de preparo convencional e plantio direto) resultaram em infiltrações de água diferentes no solo, como mostram as taxas de infiltração no PC ser maior que PD. À medida que as plantas crescem, as duas parcelas convergem para perdas por escoamento superficial similares. Integrando ao longo do ciclo, as perdas de água por escoamento durante os eventos de chuva foram significativamente maiores no PC que representam 83% dos eventos de escoamento enquanto PD tiveram maior escoamento em apenas 16% dos eventos. Porém os dados físicos – hídricos mostram que o PD teria maior tendência ao escoamento superficial, isso pode ser uma hipótese de que a camada superficial do PD apresenta indícios de uma leve compactação. Mesmo assim, fica difícil apresentar uma conclusão definitiva para o escoamento superficial no experimento, devido à representabilidade do equipamento de apenas 1m² como descrito na

seção 3.2, fazendo com que haja uma grande incerteza e falta de informação. Mesmo imprecisa, a informação obtida sobre o escoamento superficial nos dois sistemas de plantio, é uma informação importante. Na literatura científica, muitos estudos mostram que PD reduz o escoamento superficial devido à maior cobertura do solo (Engel et al., 2009; Leys et al., 2010; Tan et al., 2002).

Vários autores concluem que o sistema de plantio direto é muito eficiente no controle da erosão. Cassol e Lima (1999) encontraram valores indicando uma redução de 90% às perdas de solo e de 70% as perdas de água em relação ao plantio convencional, em Latossolo Vermelho Distrófico. Barcelos et al., (1999) verificaram que no preparo convencional, a taxa de infiltração de água foi 18% inferior àquela observada no sistema plantio direto, tendo como conseqüências um maior escoamento superficial, e maiores riscos de perda de solo e nutrientes por erosão.

Por outro lado, Kertzmann (1996) verificou que sob sistema plantio direto, o solo apresenta redução da taxa de infiltração quando comparado à condição natural do mesmo.

Isso, segundo Zimmermann (2001), pode estar relacionado a influências negativas das propriedades físicas do solo neste sistema de plantio, aumentando assim a densidade do solo e a resistência mecânica à penetração de raízes, e diminuindo a infiltração de água no solo, provocando escoamento superficial.

d) Evapotranspiração

A evapotranspiração diária (ET) foi estimada de acordo com a expressão:

$$ET = \frac{LE}{\rho L_v} \quad (12)$$

com L_v sendo o calor latente de vaporização $\left(2,45 \times 10^6 \frac{J}{Kg}\right)$, ρ a densidade do ar $\left(998,2071 \frac{Kg}{m^3}\right)$ ambas à temperatura de 20 °C e LE o fluxo de calor latente obtido pelo método *eddy covariance*.

Conforme descrito na seção 3.1 ‘Descrição do sítio experimental’ e 3.5 ‘Medidas Atmosféricas’ as parcelas do experimento de solo sendo de 40 m x 60 m, o método da covariância dos vórtices pode não representa a real diferença entre os fluxos superficiais devido às diferentes sistemas de manejo. Analisando o fluxo de calor latente obtido nos dois sistemas de plantio, nota-se uma pequena diferença entre as medidas, em média 2%. Mesmo assim, decidimos reportar estes dois valores, considerando apenas uma análise qualitativa para o PC.

O comportamento sazonal da ET diária para a soja nos dois sistemas de plantio apresenta diferenças pequenas nos estágios fenológicos, conforme apresentado na figura 4.10.

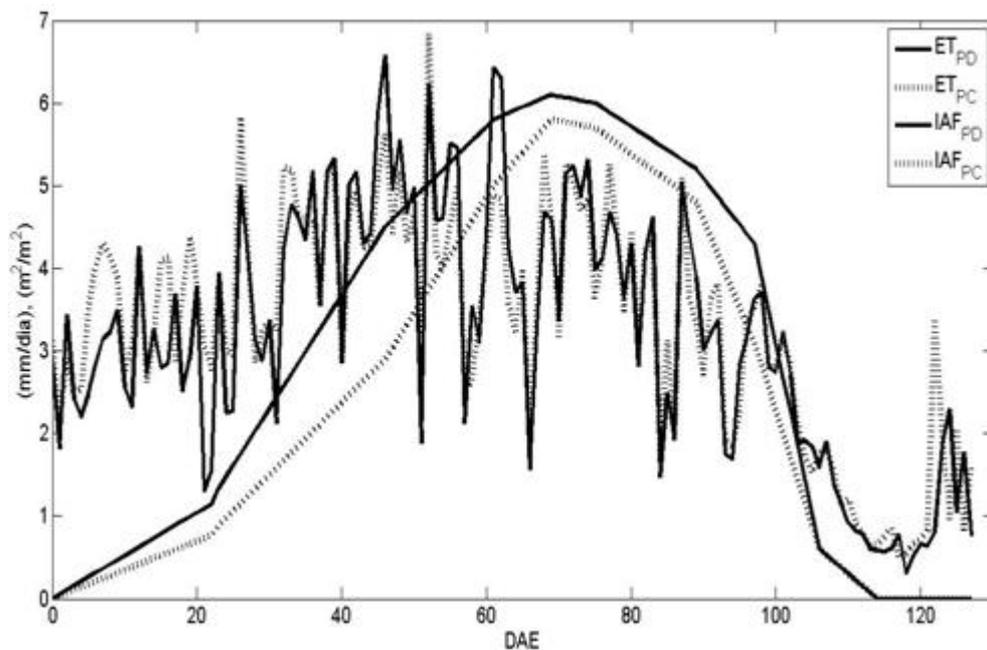


Figura 4.10 - Evapotranspiração e IAF nos sistemas: plantio convencional (PC) e plantio direto (PD).

Nos primeiros 30 DAE e no final do ciclo, nota-se que os valores da ET são ligeiramente menores para o PD, possivelmente devido à presença de vegetação residual sobre o solo nudo. Pois a cobertura morta também ajuda na redução da evaporação da água do solo através da diminuição da temperatura na superfície, elevando a disponibilidade de água no solo.

Na fase de desenvolvimento da soja, a taxa de evapotranspiração é controlada principalmente pelas condições atmosféricas locais (energia disponível, disponibilidade

hídrica, DPV) e pelos fatores biológicos da planta (Karam et al., 2005; Suyker and Verma, 2008,2010). Suyker and Verma (2009), conclui que para a soja o saldo de radiação (R_n) é responsável por 75% da variabilidade da ET, e que, na fase de crescimento, aproximadamente 66% dessa variabilidade é atribuída ao número de dias em que o IAF foi superior a $2.5\text{m}^2/\text{m}^2$.

Autores como (Salton & Mielniczuk, 1995), enfatizam que as perdas de água por evaporação são menores no plantio direto, devido à presença da camada de resíduos vegetais formando uma barreira isolante. Singer et al., (2010) mostrou que durante a fase reprodutiva da soja, a transpiração representa de 89 a 96% da ET, indicando que o IAF influencia fortemente a taxa de ET. Para o sítio experimental de Cruz Alta, a ET média da emergência à colheita (ciclo) foi de 3,20 mm / dia, para PD e ligeiramente maior para o PC, embora que no PD as fases vegetativas e reprodutivas a ET foi ligeiramente maior do que no PC. Apesar da proximidade espacial entre as duas parcelas, a forte influência do IAF na ET ainda pode ser reconhecida.

4.4 Coeficiente da cultura (Kc)

Os valores da evapotranspiração de referência (ET_0) para o sítio experimental de Cruz Alta foram calculados utilizando a equação de Penman-Monteith da FAO (apresentado na seção 2.2) (Allen et., 1998). Essa variável determina a taxa de evapotranspiração de uma superfície de referência, totalmente coberta com a cultura padrão (grama batatais).

A razão ET/ET_0 é conhecida como *crop coefficient* (Kc; Allen et al., 1998), e apresenta um comportamento diferente para cada estágio fenológico de desenvolvimento da cultura agrícola. Este fator é amplamente utilizado no planejamento e otimização da prática agrícola. A Figura (4.11) apresenta a variação diária de soja Kc (ET/ET_0), para ambos os sistemas de plantio, com valores entre 0,15 e 1,34. No período inicial do plantio (primeiros 25 dias) Kc variou entre 0,4 e 1,2. Possivelmente, porque a cultura esta em pleno andamento com aumento gradual do IAF. O aumento da área efetiva devido ao aumento no IAF que contribui para o aumento constante na relação ET / ET_0 , portanto, na magnitude do Kc. Com o aumento dos valores de IAF durante os estágios intermediários vem a diminuir a exposição do solo à radiação solar direta, resultando em um consequente aumento nos valores de Kc. Durante as

fases finais do ciclo (período de maturidade), há uma diminuição sistemática de K_c , reduzindo as diferenças entre o PC e as curvas do PD.

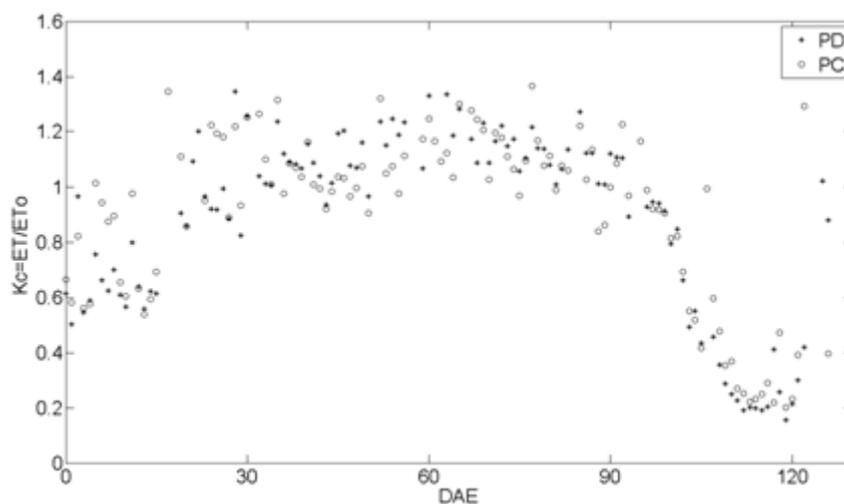


Figura 4.11 - Variação diária do coeficiente de cultura (K_c) para o sistema: plantio convencional (PC) e plantio direto (PD).

A tabela 4.4 mostra os valores de K_c para a soja para o sistema de PD durante os períodos iniciais, meio e fim da estação de crescimento, seguindo as etapas do crescimento do cultivo, como recomendado por Allen et al. (1998). A metodologia utilizada para o cálculo do K_c foi obtida a partir Suyker e Verma (2009) que estimou K_c de soja sob sistema de plantio direto, em Nebraska, EUA. As estimativas obtidas para este estudo mostram padrão semelhante aos obtidos por Suyker e Verma (2009).

Tabela 4.4. Valores de K_c e intervalos de confiança de 95% para períodos específicos do ciclo da soja para sistema (PD).

Soja	Inicial K_c	Médio K_c	Final K_c
PD	0.56 ± 0.16	1.07 ± 0.15	0.53 ± 0.29

Os maiores valores encontrados neste estudo quando comparado com Suyker e Verma (2009) podem estar associados a diferenças de regiões climáticas, além de valores de precipitação elevada, que favorece maiores perdas por ET. Outros fatores podem influenciar a estimativa do Kc, como a diferença nas espécies de cultivar entre os dois experimentos.

4.5 Balanço hídrico

A tabela 4.5 mostra os componentes do balanço hídrico durante o período de monitoramento para os dois sistemas de cultivo da soja: PC e PD. Nesta análise a ET para o PC foi considerada a mesma que para o PD. Devido à ocorrência de significativas chuvas durante a última semana de monitoramento, os componentes do balanço hídrico serão analisados em dois períodos como segue: P1 – período integral (19 dezembro 2009 a 25 abril 2010); P2 – da emergência até a maturação fisiológica (19 dezembro 2009 a 19 abril 2010), mas excluindo o período de chuvas intensas no final do monitoramento. A separação em dois períodos permitiu a avaliação do balanço hídrico em duas circunstâncias distintas.

Tabela 4.5. Componentes do balanço hídrico para o ciclo de crescimento da soja sob (PD) e (PC), em unidades de milímetros

Sistema	Entrada		Perdas		BH
	P	ET	R	D	P-ET-R-D
P1-19 dezembro 2009 a 25 abril 2010					
PD	654,8	410,8	12,1	108,9	122,8
PC	654,8	410,8	20,6	168,4	55,0
P2 – 19 dezembro 2009 a 19 abril 2010					
PD	488,8	402,3	10,03	108,91	-32,4
PC	488,8	402,3	17,0	142,4	-72,93

P - precipitação, ET - evapotranspiração, R - Escoamento superficial, D – drenagem no perfil, BH – balanço hídrico calculado em intervalos diários pela diferença entre o volume precipitado e o somatório das perdas, a ET para o PC foi considerada a mesma para o PD.

A evapotranspiração total durante P2 foi de 402,3 mm para o sistema de PD. Suyker & Verma (2009) estimaram por meio de medições de vórtices turbulentos que a evapotranspiração de soja sob sistema plantio direto sobre terras de sequeiro apresentaram valores entre 420 milímetros e 441 milímetros, em média, entre o plantio e a colheita.

As perdas de água por escoamento superficial foram de 3,0% da evapotranspiração, para o PD.

Para o estabelecimento de todas as componentes necessárias no balanço hídrico, a drenagem do perfil foi estimada a partir do valor excedente do conteúdo de água no solo da capacidade de campo (CC) na camada de 0,20 a 0,50 m. No período mais longo e de maior pluviosidade (P1) a drenagem no perfil do PC foi de 168,4 e no PD 108,9 mm.

A drenagem do solo foi calculada para a camada entre 0,20 m e 0,50 m como o excesso de água à capacidade de campo, correspondentes a 168,4 milímetros e 108,9 milímetros durante o P1 para PC e PD, respectivamente.

As maiores diferenças no equilíbrio de água entre os tratamentos foram na drenagem do perfil (processo de redistribuição). As perdas de água através da camada de drenagem do perfil no PC foi de aproximadamente 50% superior ao PD porque o perfil do solo na área sob plantio direto apresentou maior capacidade de retenção quando comparado ao sistema convencional.

5 RESULTADOS DO MODELO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos através das simulações do modelo Agro-IBIS, com os ajustes nos parâmetros do solo e IAF, para o cultivo da soja no sul do Brasil. Será avaliada a capacidade do modelo em simular os processos relacionados com o estoque de água, necessidade de água e fenologia do agroecossistema sob os sistemas de plantio do solo PD e PC. Esses resultados serão, comparados com a simulação realizada por Webler et al., (2012) que validaram o modelo Agro-IBIS com os mesmos dados deste trabalho, porém utilizando dados das propriedades físicas do solo médias para o tipo de solo da região. As simulações são descritas como: Simulação Webler – resultados de Webler et al., (2012), utilizando a eq. (10) para a representação da senescência no IAF e os parâmetros do solo do banco global do modelo, descrito na tabela 5.1, abaixo:

Tabela 5.1 - Características físico-hídricas do solo utilizadas no modelo Agro-IBIS

	Areia	Silte	Argila	θ_s	b	Ψ_0	K_s
Webler	0,20	0,20	0,60	0,475	7,6	0,37	$1,06e^{-06}$
PC	0,24	0,29	0,45	0,615	8,125	0,11	$3,67e^{-05}$
PD	0,26	0,31	0,43	0,545	7,875	0,11	$2,75e^{-06}$

Simulação Nova – a nova simulação utilizando o ajuste do IAF eq. (11) e as propriedades físicas do solo obtidas nas áreas experimentais, PC e PD (Tabela 4.2).

5.1 Estoque de água no solo

A tabela 5.1 apresenta as características físico-hídricas do solo utilizadas nas simulações do modelo Agro-IBIS. Webler et al., (2012) utilizou uma classificação de solo do banco de dados para a região do sítio experimental, para representar o solo de forma mais

próxima da observada. Nesta classificação, a principal diferença está na composição do solo, que apresenta uma menor porosidade e condutividade hidráulica. Experimentalmente, outros fatores, tais como a macro e microporosidade devem ser utilizadas para explicar o comportamento das trocas de água no solo. Essas propriedades variam com a profundidade, como demonstrado no capítulo 4, seção 4.2. No entanto, o modelo Agro-IBIS não utiliza estas informações e permite apenas a descrição do solo como uma única camada. Desta forma, as propriedades do PD e PC descritas na tabela 3.2, é um valor médio sobre toda a profundidade, não permitindo um estudo da influência detalhada das propriedades em cada camada de solo. Comparando as características físico - hídricas do solo, nota-se que o solo do banco global apresenta todos os parâmetros mais próximos ao PD, isto é devido ao fato que na região entorno da área do estudo, a maior parte dos solos agrícola são cultivado sob o sistema PD.

Conforme mostrado na figura 4.5 (precipitação diária para a cultura de soja na safra 2009/2010) houve períodos secos e chuvosos bem caracterizados durante o experimento. Foram definidos três períodos chuvosos: C1 = 0-40DAE; C2 = 55-70DAE; C3 = 90-95DAE; e três períodos secos (períodos com mais de 10 dias sem precipitação): S1 = 40-55DAE; S2 = 70-90DAE; S3 = 95-120DAE.

5.1.1 Plantio Direto (PD)

As figuras 5.1 e 5.2 mostram as médias diárias do armazenamento de água no solo nas camadas de 0-0,20 m e 0,20-0,50 m para as simulações aqui realizadas, representado o sistema de plantio direto.

Os resultados da simulação nova é muito próxima dos resultados da simulação Webler (os erros quadráticos médio são sempre maiores em ambas as simulações para o PD quando comparadas ao PC). Estes resultados são esperados já que as propriedades do solo usadas por Webler são próximas às características físico hídricas do solo no PD, conforme mostra Tabela 5. Assim, maior impacto esperado no estoque de água no solo na simulação do plantio direto devem ser devidas ao efeito da camada de resíduos.

O modelo superestima nos períodos chuvosos: C1 = 0-40DAE; 55-75DAE; 90-95DAE. O modelo superestima nos períodos secos: 80-95DAE e 100-120DAE.

O manejo de resíduos na superfície pode interferir no sistema superfície-atmosfera de várias maneiras. De acordo com Costa et al., (2003) a adoção do PD promove uma melhora na

estrutura do solo e nas suas propriedades físicas, principalmente, devido a influência dos resíduos vegetais sobre a superfície. Além disso, pode influenciar a radiação líquida, temperatura e umidade do solo (Horton et al., 1996 ; Sauer et al., 1998 ; Steiner e Schoenberg, 1996, Tormena et al., 2002 ; Klein and Libardi 2002).

Para identificar os efeitos e as incertezas causadas pela simulação de diferentes sistemas de manejos do solo, dados de vegetação e manejo da terra são extremamente importantes.

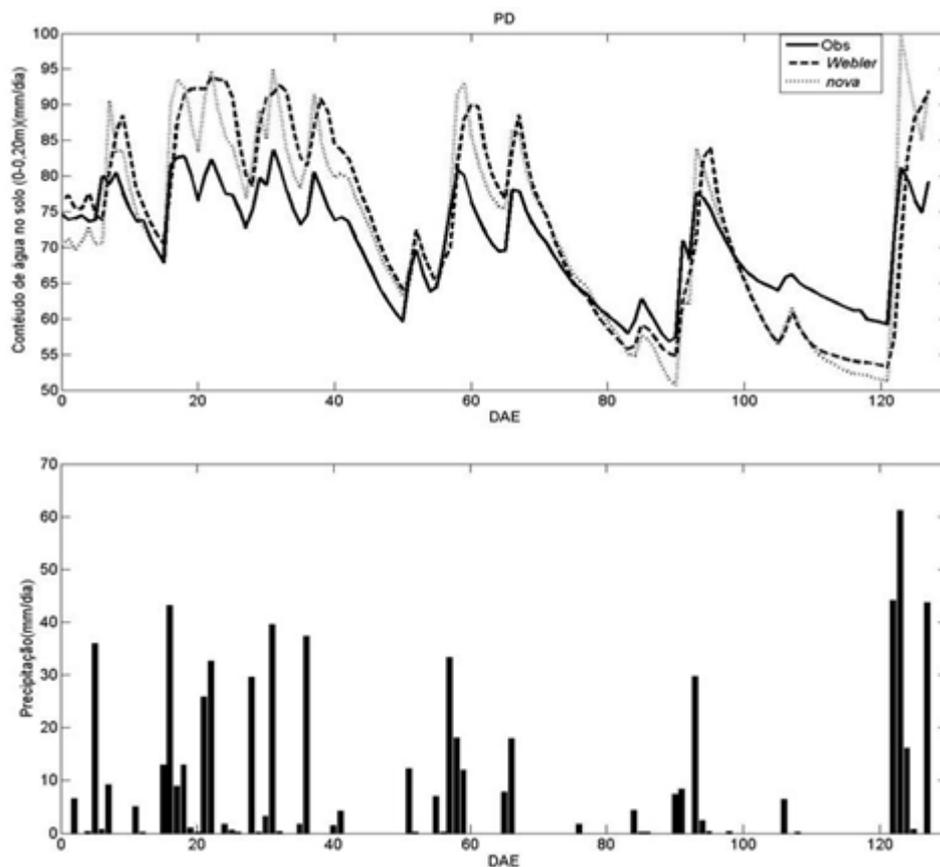


Figura 5.1 - Variação da umidade do solo na camada de (0- 0,20 m) para a estação do ciclo da soja no sistema plantio direto (PD)

O gradiente do conteúdo de água no solo para a camada mais profunda (0,20 – 0,50m) é maior do que na camada superficial (0 – 0,20m).

O modelo subestima em todo o período, tanto na simulação Webler quanto na simulação nova. Mas o comportamento é bem simulado.

No período chuvoso (vários dias com precipitação) o solo nos modelos parece infiltrar mais água e logo superestima os valores do conteúdo de água no solo. E no período de seca o modelo seca mais rápido a camada superficial do solo (0 – 0,20m) subestimando os valores observados.

Na camada (0,20 – 0,50m) o modelo perde água rapidamente para as camadas mais profundas do solo ao longo do período de estudo. No geral, o modelo subestima o conteúdo de água no solo observado em campo e esse comportamento se intensifica nos períodos secos.

É como se o modelo estivesse com valores de propriedades de solo arenoso, com condutividade hidráulica saturada maior.

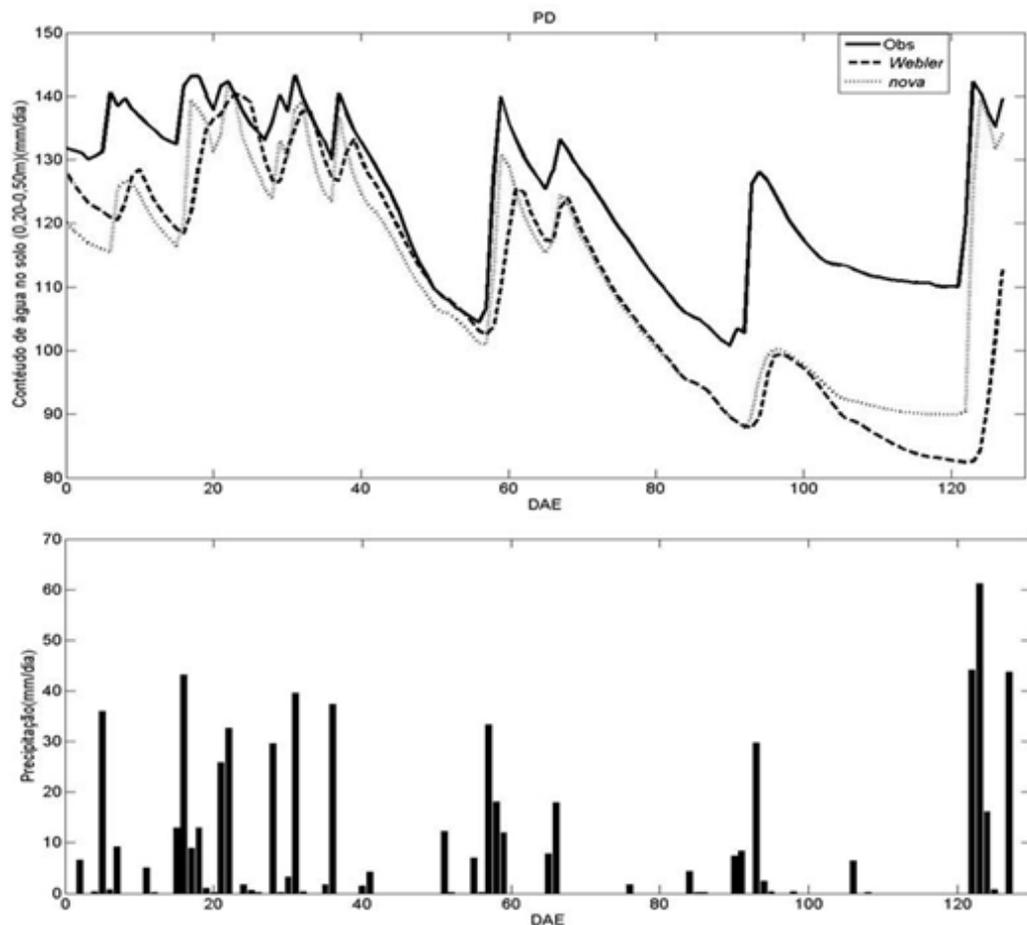


Figura 5.2 - Variação da umidade do solo na camada de (0,20- 0,50 m) para a estação do ciclo da soja no sistema plantio direto (PD).

5.1.2 Plantio Convencional (PC)

A simulação Webler é a mesma que a apresentada no PD, pois o solo foi representado pelo banco de dados global do modelo.

A maior condutividade hidráulica saturada em um solo representa a sua maior capacidade de conduzir água, tanto para a superfície quanto para a drenagem profunda. Na simulação Webler usou-se uma condutividade hidráulica saturada menor que o medido experimentalmente para o PC tabela 5.1, utilizando a nova simulação.

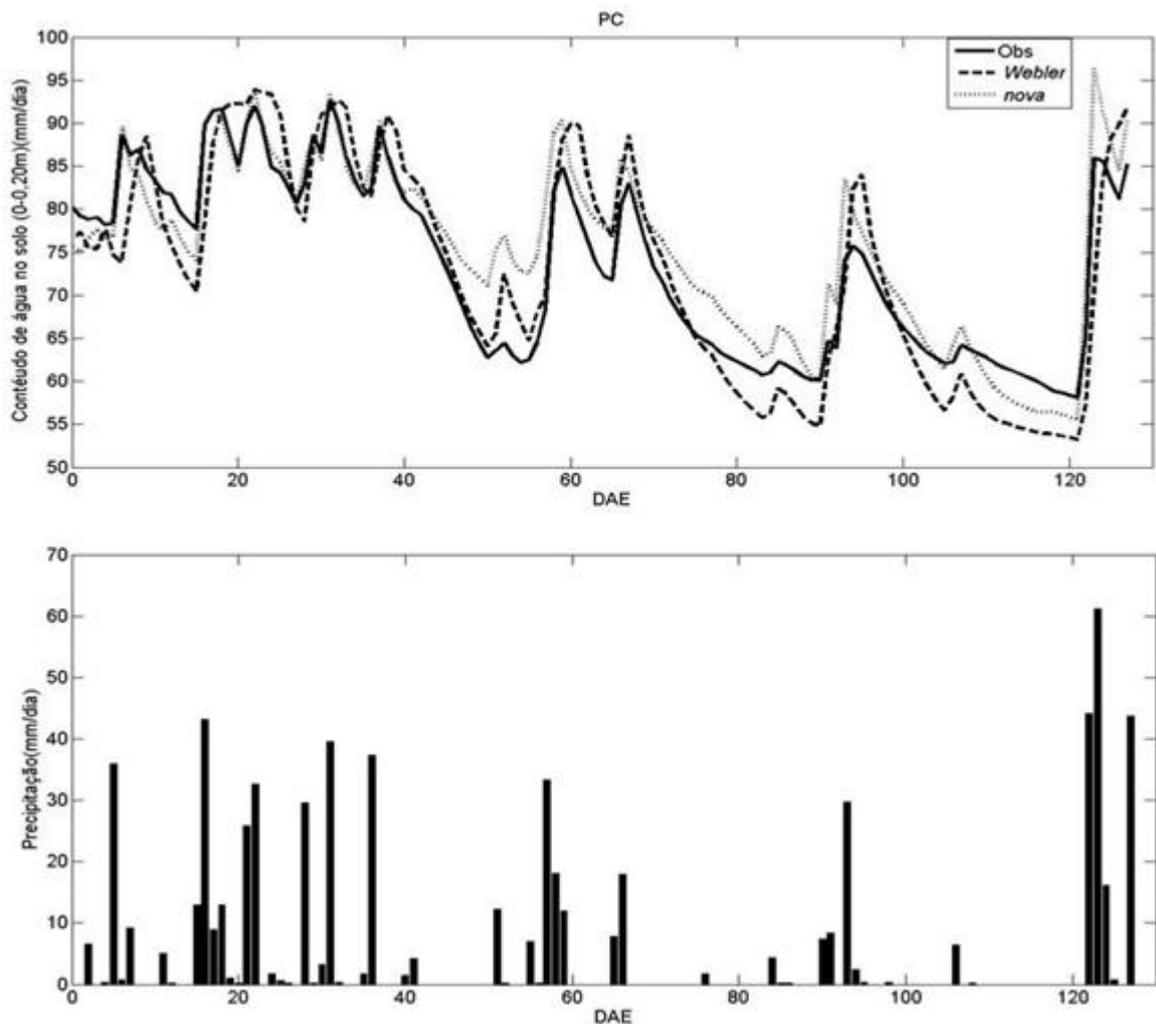


Figura 5.3 - Variação da umidade do solo na camada de (0- 0,20 m) para a estação do ciclo da soja no sistema plantio convencional (PC).

O modelo superestima os dados observados no período seco. Maior conteúdo de água no solo principalmente na simulação nova que possui maior condutividade hidráulica saturada e solo um pouco mais argiloso.

As simulações nova é melhor, principalmente nos primeiros 40 DAE quando o período de chuva foi mais regular.

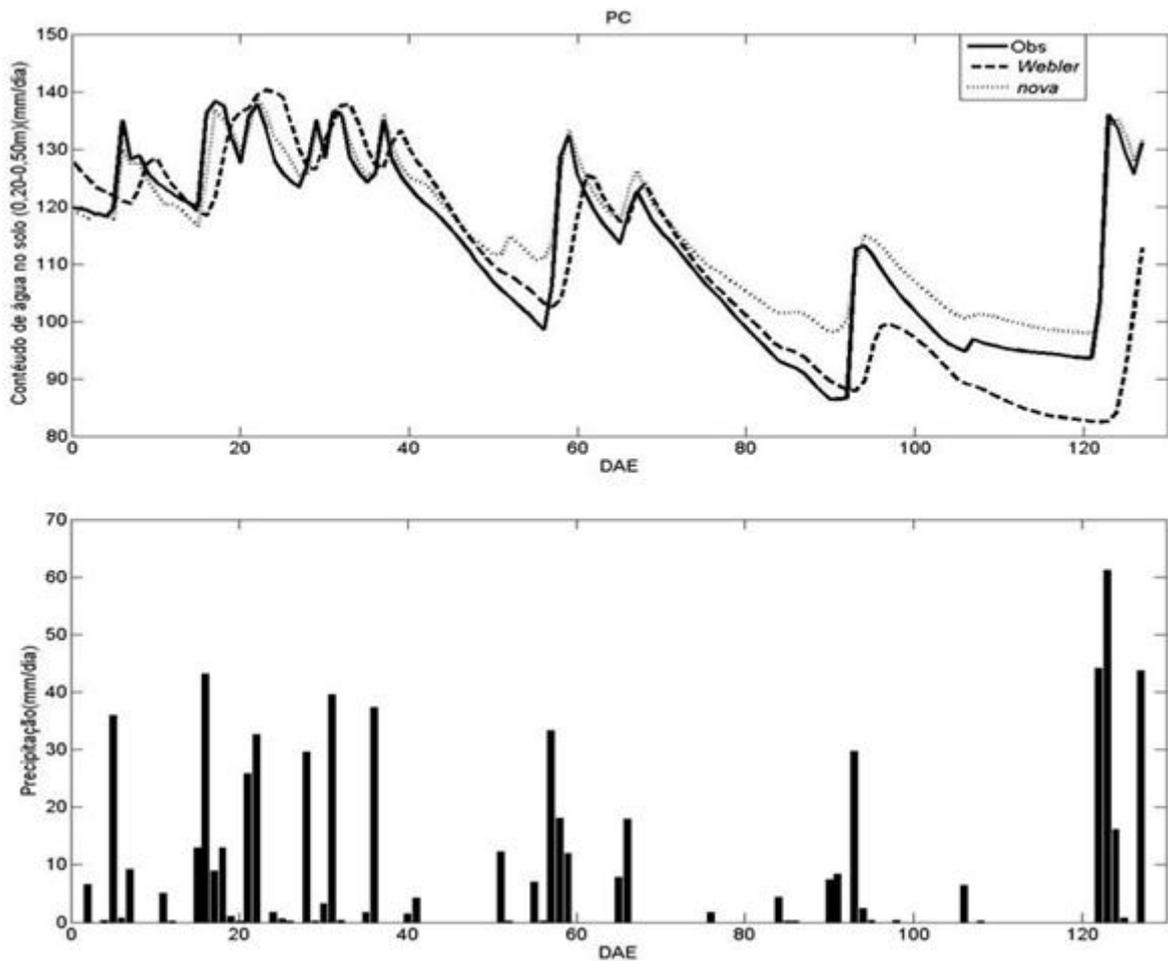


Figura 5.4 - Variação da umidade do solo na camada de (0,20- 0,50 m) para a estação do ciclo da soja no sistema plantio convencional (PC).

Em episódios de chuvas, a simulação nova representa uma absorção de água mais rápida que simulação Webler, em ambas as camadas, representando um menor erro quadrático e maior correlação tabela 5.2

Tabela 5.2 – Erro médio quadrático (ERRO) e coeficiente de correlação (COR) de duas diferentes simulações, utilizando o modelo Agro-IBIS para a cultura de soja 2009/2010 no sul do Brasil para diferentes camadas de umidade do solo em sistemas de manejos de plantio convencional e direto.

		Webler				Nova			
		Períodos úmidos		Períodos secos		Períodos úmidos		Períodos secos	
		ERRO	COR	ERRO	COR	ERRO	COR	ERRO	COR
0-0,20 (m)	PC	5,09	0,85	4,18	0,95	4,19	0,87	4,66	0,86
	PD	8,45	0,81	5,33	0,88	6,96	0,90	5,12	0,87
0,20-0,50 (m)	PC	8,78	0,78	6,11	0,91	4,83	0,95	5,84	0,97
	PD	12,77	0,79	17,00	0,65	12,06	0,87	15,14	0,72

Nos períodos secos a simulação Webler se aproxima melhor dos dados experimentais enquanto a simulação nova tende a manter o solo mais úmido em ambas as camadas, exceto para a fase da senescência. Nesta fase, a simulação Webler apresenta um IAF maior que o experimental e o utilizado na nova simulação. Desta forma, pela presença do maior IAF, as plantas tendem a extrair mais água, secando o solo mais que o observado. Quando da implementação de uma nova formulação para o IAF, que representa de forma mais coerente o comportamento dinâmico do IAF experimental para a fase da senescência, a partir do 88° DAE, o modelo (nova) tende a se aproximar dos dados experimentais na primeira camada. No entanto, devido ao menor IAF, as plantas não necessitam extrair água das camadas mais profundas. Assim, na fase da senescência, em (nova) o solo, na segunda camada (entre 0,20 m e 0,50 m), fica mais úmido, mas com resultados relativamente mais próximos aos observados que na de Webler (menor erro e maior correlação) (Tabela 5.2).

No início de períodos úmidos a simulação Webler apresenta uma defasagem em relação à resposta da infiltração da água no solo, por exemplo, no C3, onde ocorreu uma precipitação acumulada de aproximadamente 50 mm. Nos dados observados ou nos resultados da simulação nova, a infiltração ocorre de forma imediata, enquanto na antiga a defasagem é de 2 a 3 dias. Isto pode ser resultado das diferenças das propriedades do solo utilizado nas

simulações e experimentais, já que os modelos utilizam um valor médio para o solo, enquanto que experimentalmente esses valores variam com a profundidade, conforme descrito acima.

5.2 Evapotranspiração e particionamento entre a evaporação direta do solo e transpiração

A demanda hídrica da cultura de soja varia com as fases de desenvolvimento e é determinada pela perda de água por transpiração da cultura, assim como pelo estado das plantas quanto da condição hídrica e do manejo do solo. Uma das principais variáveis que determina as necessidades hídricas de uma cultura é a perda de água por evapotranspiração. A evapotranspiração é composta pelas perdas por evaporação da água que é interceptada pela folhagem, pela evaporação da água do solo e pela transpiração. O método de vórtices turbulentos integra todas essas componentes e, por isso, apenas a evapotranspiração é utilizada aqui na comparação com os resultados do modelo. A grande variabilidade da evapotranspiração está associada à ocorrência de chuva e com as fases de desenvolvimento da soja. A descrição detalhada das características físicas hídricas do solo não apresentou significativa diferença entre a simulação Weblor e a nova para ambos os sistemas de manejos.

Apenas na fase da senescência, onde na nova simulação utilizou o IAF ajustado nota-se uma melhora nos resultados para ambos os sistemas Figuras 5.5 e 5.6.

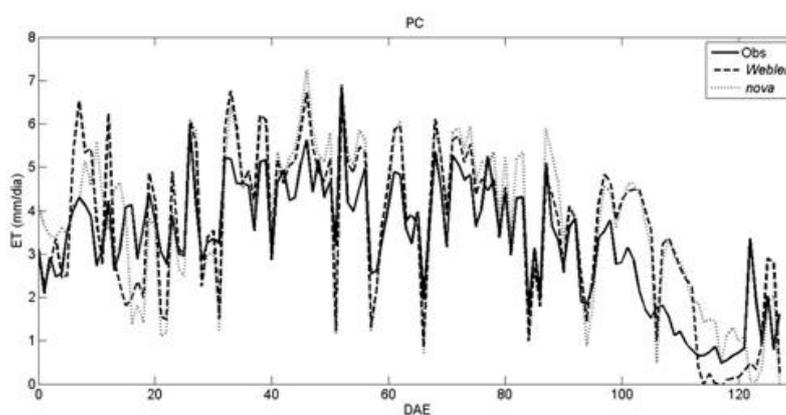


Figura 5.5 – Evapotranspiração simulada e observada para a estação do ciclo da soja no sistema plantio convencional (PC)

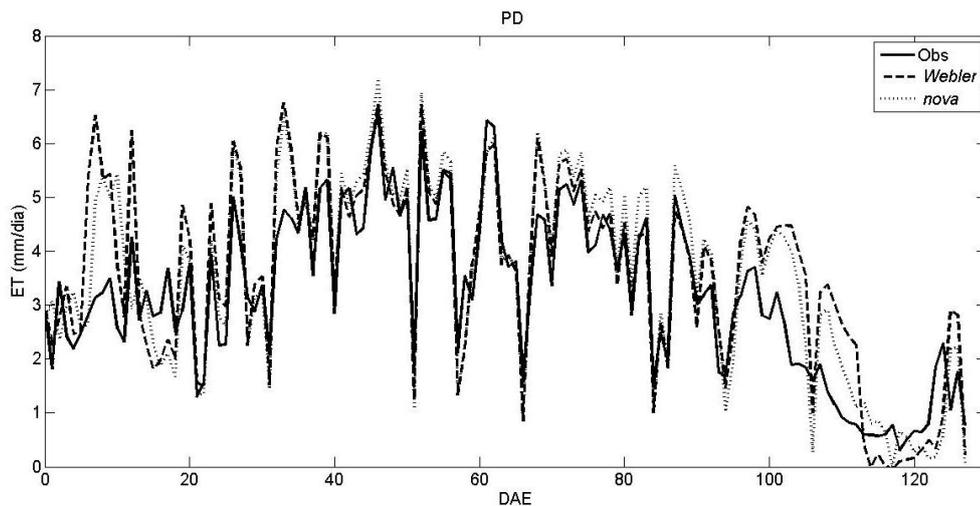


Figura 5.6 – Evapotranspiração simulada e observada para a estação do ciclo da soja no sistema plantio direto (PD)

Isto pode estar associado ao efeito de cobertura da folhagem seca na evaporação da água a superfície do solo, tendo em vista que esse efeito da cobertura de material morto na evaporação do solo não é considerado no modelo, o que pode explicar as diferenças na evapotranspiração.

Embora o plantio direto tenha IAF superior, em comparação com plantio convencional, não mostraram diferenças significativas na evapotranspiração figura 5.6.

Para a soja do plantio convencional conforme a figura 5.5 a perda por evapotranspiração até o 30° DAE foi determinada principalmente pela evaporação do solo com uma taxa média de 3,5 mm/dia. Após este período a evapotranspiração aumentou gradualmente acompanhando o crescimento da cultura, chegando a atingir taxa média da ordem de 5 a 6 mm/dia no período de máximo IAF, que corresponde ao período de enchimento de grãos (R5). Até 90° DAE a evapotranspiração da superfície sofre um incremento em função do rápido crescimento da cultura e maior cobertura do solo pela folhagem, atingindo valores da ordem de 5,5 mm/dia.

As componentes de evaporação direta da água do solo e a transpiração não foram medidas, mas a análise de como o modelo representa essas perdas separadamente é crucial quando se representa o ciclo de desenvolvimento de uma cultura agrícola, que demanda consumo hídrico diferenciado nas suas fases fenológicas, conforme apresentados na Figura 5.7.

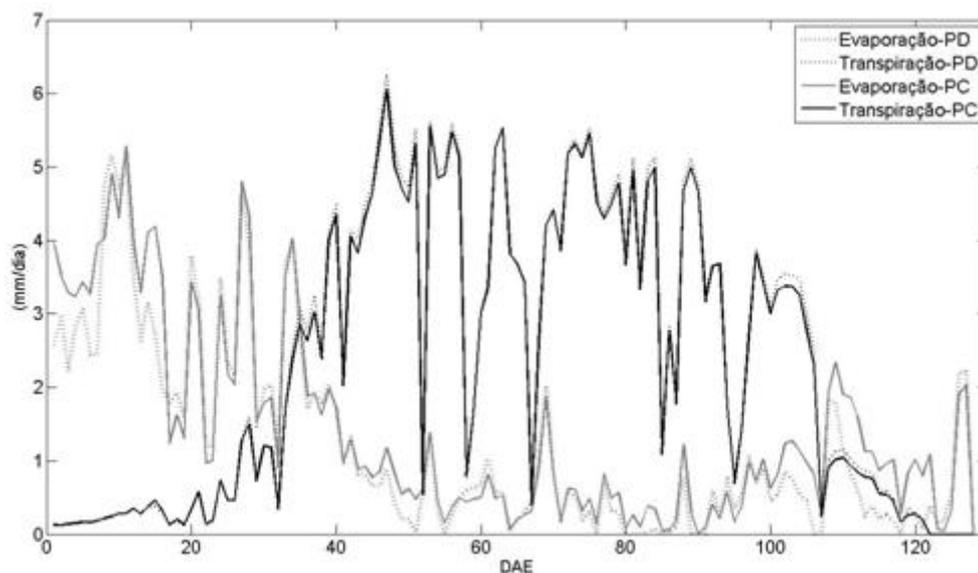


Figura 5.7 – Simulação da evaporação e transpiração para os sistemas de plantios: (PD) e (PC) utilizando a nova simulação.

A partição da perda por evapotranspiração em transpiração e evaporação do solo mantêm-se praticamente inalterada no PD. Com exceção das fases iniciais e finais do ciclo da cultura em que as perdas por evaporação do solo, foram menores.

Enquanto que para o plantio convencional durante os estádios iniciais de desenvolvimento da cultura, até 30° DAE, as perdas de água por evaporação do solo são expressivas, pois nesse período, a área foliar é ausente ou pequena. O solo nesta fase se encontra descoberto em virtude do revolvimento parcial decorrente do próprio sistema de plantio. A frequente precipitação contribui para manter o solo úmido e, portanto, auxilia o modelo a simular uma taxa de evaporação do solo elevada, da ordem de 3 mm/dia. No entanto na fase vegetativa e reprodutiva da cultura onde predomina a transpiração o PC e PD permanecem praticamente os mesmos. Desta maneira a precipitação ou práticas de irrigação precisam compensar estas perdas.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado um estudo sobre o balanço hídrico em uma cultura de soja sob os sistemas de plantio direto e convencional na safra de 2009-2010 no Sul do Brasil. Além disso, um ajuste na descrição da senescência foliar é proposta para as simulações da cultura da soja com o modelo Agro-IBIS.

Os resultados da análise física e hidráulica indicam que a palhada como gestão de conservação no sistema de plantio direto afeta positivamente as variáveis relacionadas com a retenção de água do solo. O aumento da microporosidade e macroporosidade, e a diminuição na condutividade hidráulica saturada levantam a hipótese de uma leve compactação da camada superficial do solo no sistema plantio direto. Houve também diferenças nas propriedades físicas das camadas mais profundas do solo entre os dois sistemas de gestão, que por sua vez resultou em diferenças no conteúdo de água no solo. O PD mostrou maior capacidade de retenção de água, portanto, tornando-se mais adequados para dar suporte as plantas durante os períodos de seca e também permitindo maiores valores de índice de área foliar, quando comparado com PC.

Em relação ao monitoramento de fluxos de água nas parcelas para o cálculo do balanço hídrico, o plantio direto apresenta valores mais baixos para todos os componentes do sistema de perda de água (escoamento superficial, evapotranspiração e drenagem no perfil) proporcionando um maior armazenamento de água no solo durante o ciclo da cultura, inclusive no período de baixa ocorrência de precipitação.

Estes resultados mostram que o balanço hídrico no PD apresenta 40% mais água do que o PC, sendo que a drenagem no perfil apresenta as maiores diferenças. Esta informação pode ser útil na análise das estimativas por meio da modelagem da interação superfície-atmosfera, pois as alterações na gestão do manejo do solo, que geralmente não são considerados nos modelos, apresentaram diferenças significativas, principalmente na quantidade de água disponível no solo.

O ajuste do modelo Agro-IBIS para a cultura de soja, só foi possível com as medidas simultâneas de variáveis fenológicas, hidrológicas e meteorológicas do sítio experimental que forneceram informações úteis ao longo de todo ciclo de desenvolvimento da soja.

As alterações realizadas no modelo Agro-IBIS permitiram o melhor ajuste dos resultados aos dados medidos em todas as variáveis. Das principais mudanças que foram

adicionadas, tais como o ajuste de propriedades físicas do solo, definição de coeficientes da curva de retenção, e fenologia da cultura, a principal foi à consideração de um novo fator de declínio do índice de área foliar na fase de senescência que reduziu sobremaneira o erro nas componentes do balanço de água da superfície de soja.

O conteúdo de água no solo analisado para duas camadas é bem representado pelo modelo Agro-IBIS, especialmente no PC. O mesmo acontece para o IAF e evapotranspiração, devido ao forte acoplamento entre atividade fisiológica e perda de água para atmosfera através da transpiração. Apesar de não ter uma parametrização física considerando os resíduos da cultura sobre a superfície no caso do PD, o modelo tem um desempenho satisfatório para o sistema de manejo. Mas, as diferenças são mais pronunciadas especialmente no conteúdo de água no solo na camada de 0,20 a 0,50m Figura 5.2, com subestimação durante todo o ciclo da cultura.

A evapotranspiração apresenta também resultados consistentes, especialmente durante o estágio vegetativo da cultura, quando existe a total cobertura do solo pela área sombreada da planta.

O maior erro nas estimativas de estoque de água no solo no modelo para plantio direto indica a necessidade de considerar os gradientes de propriedades do solo típica desse sistema de plantio. Outros processos como o efeito da cobertura da palha no balanço de calor e água do solo precisam ser incorporados no modelo para representar fielmente o sistema de plantio direto.

Os índices de habilidade do modelo Agro-IBIS aos dados medidos indicam a potencialidade de aplicação do modelo a estudos de impacto em escala regional considerando cenários climáticos pretéritos e futuros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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. et al. 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.

AUBINET, M. et al. Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: the EUROFLUX methodology, **Advances in Ecological Research**, v.30, p.113–175, 2000.

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.

BARCELOS, A.A.; CASSOL, A.E; DENARDIN, J.E. Infiltração de água em um Latossolo Vermelho-Escuro sob condições de chuva intensa em diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.35-43, 1999.

BARNI, N.A.; MATZENAUER, R. Ampliação do calendário de semeadura da soja no Rio Grande do Sul pelo uso de cultivares adaptados aos distintos ambientes. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v.6, p.189-203, 2000.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. (Ed.). **Matéria orgânica do solo: fundamentos e caracterização**. Porto Alegre: Gênese, 1999. p. 9-26.

BERLATO, M.A.; FARENZENA, H.; FONTANA, D.C. Associação entre El niño oscilação sul e a produtividade do milho no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.40, p.423-432, 2005.

BERLATO, M.A.; FONTANA, D.C. **El Niño e La Niña: impactos no clima, na vegetação e na agricultura do Rio Grande do Sul: aplicações de previsões climáticas na agricultura**, Editora UFRGS. Porto Alegre.2003.

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.

BONAN, G. B. A land surface model (LSM version 1.0) for ecological, hydrological, and atmospheric studies: **Technical description and user's guide**. NCAR Technical Note, 1996.

BOTTA, G.F.; BECERRA, T.A.; BRAVO, X.L.; TOURN, M. Tillage and traffic effects (planters and tractors) on soil compaction and soybean (*Glycine max L.*) yields in an Argentine pampas. **Soil Tillage Research**, v.110, p.167-174. 2010.

CAMPBELL, G.S. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. **Soil Science**, Baltimore v.117, n.2, p.311-313. 1974.

CAMPBELL, G.S.; NORMAN, J.M. **An introduction to environmental biophysics**. 2nd ed. Springer Verlag, New York, 1997.

CASSOL, E.A. et al. Infiltração de água e perdas de água e solo por erosão influenciadas por diferentes métodos de melhoramento da pastagem nativa gaúcha. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p. 923-931, 1999.

CHAUVEL, A. Os latossolos amarelos, álicos, argilosos dentro dos ecossistemas das bacias experimentais do INPA e da região vizinha. **Acta Amazonica**, v.12, p.47-60, 1982.

CHAVEZ, L. F. et al. 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.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied Hydrology**. United States of America: McGraw-Hill, 1988.

Conab, 2011, **The National Supply Company, Ministry of Agriculture**, Livestock and Supply, <http://www.conab.gov.br/> Acesso em setembro de 2011.

CUADRA, S. V.; COSTA, M. H.; KUCHARIK, C. J.; DA ROCHA, H. R.; TATSCH, J. D.; INMAN-BAMBER, G.; DA ROCHA, R. P.; LEITE, C. C.; CABRAL, M. R. A biophysical model of sugarcane growth. **GCB Bioenergy**, v. 4, p. 36-48, 2012.

DENARDIN, J.E.; KOCHHANN, R.A. Requisitos para implantação e a manutenção do sistema plantio direto. IN: **Plantio direto no Brasil**. Passo Fundo: Aldeia Norte, 1993. P.19-27.

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.

ENGEL, F.L.; BERTOL, I.; RITTER, M.R.; GONZALEZ, A.P.; SMITH, P.B.J.; VAZQUEZ, V.E. Soil erosion under simulated rainfall in relation to phenological stages of soybeans and tillage methods in Lages, Santa Catarina, Brazil. **Soil Tillage Research**, v.103, p.216-221, 2009.

ESCOBAR, L. F. et al. 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. et al. Protection of soil organic C and N in temperate and tropical soils: effect of native and agroecosystems. **Biogeochemistry**, v.92, p.129–143, 2009.

FALGE, E. et al. Gap filling Strategies for long term energy flux data sets. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.107, p. 71-77, 2001b.

FEHR, W.E.; CAVINESS, C.E. **Stages of soybean development. cooperative extension service and agriculture and home economics experiment station**. Special Report 80. Iowa State University, Ames, IA, 1977.

FERREIRA, F.P. et al. Condutividade hidráulica saturada, infiltração de água e compactação do solo no sistema de plantio direto. In: XIII Reunião Brasileira de manejo e conservação do solo e da água. Ilhéus: Bahia, 2000. Disponível em: www.ufsm.br/ppgcs/congressos/XIIIReuniao_Brasileira_Ilheus/733.pdf.

FOLEY, J.A. et al. An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance and vegetation dynamics. **Global Biogeochemical Cycles**, v.10, p. 603-628, 1996.

FILHO, G. A. et al. Preparo convencional e cultivo mínimo do solo na cultura de mandioca em condições de adubação verde com ervilhaca e aveia preta. **Ciência Rural**, v.30, p. 953-957, 2000.

GICHERU, P. Effects of residue mulch no tillage on soil moisture conservation. **Soil technology**, v.7, p. 209-220, 1994.

GUBIANI, P.I.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; GELAIN, N.S.; MINELLA, J.P. 2010. Decreasing head permeameter associated software for determination of hydraulic conductivity of saturated soil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p.1-5, 2010.

GRISMER, M. E. et al. Pan evaporation to reference evapotranspiration conversion methods. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.128, p.180-184, 2002.

KERTZMANN, F.F. **Modificações na estrutura e no comportamento de um Latossolo Roxo provocados pela compactação**. 1996. 153f. Tese (Doutorado em Geografia Física) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

HANAN, N.P. et al. Testing a model of CO₂, water and energy exchange in Great Plains tallgrass prairie and wheat ecosystems. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.131, p. 162-179, 2005.

HODNETT, M. G.; OYAMA, M. D.; TOMASELLA, J.; MARQUES FILHO, A. de O. Comparison of long-term soil water storage behavior under pasture and forest in three areas of Amazonia. **Amazonian Deforestation and Climate**. Chichester: John Wiley. p. 57-77, 1996.

HORTON, R.; BRISTOW, K.L.; KLUITENBERG, G.J.; SAUER, T.J. Crop residue effects on surface radiation and energy balance review. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 54, p. 27-37, 1996.

HUSSAIN, I.; OLSON, R.K.; EBELAH, A.S. Impacts of tillage and no-till on production of maize and soybean on an eroded Illinois silt loam soil. **Soil Tillage Research**, v.42, p.37- 49, 1999.

INGWERSEN, J. et al. Comparison of Noah simulations with eddy covariance and soil water measurements at a winter wheat stand. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.151, p. 345–355, 2011.

KARAM, F.; MASSAD, R.; SFEIR, T.; MOUNZER, O. ROUPHAEL, Y. Evapotranspiration and seed yield of field grown soybean under deficit irrigation conditions. **Agricultural Water Management**, v.75, p.226-244, 2005.

KAY, B.D.; VAN DEN BYGAART, A.J. Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. **Soil Tillage Research**, v.66, p.107-118, 2002.

KLEIN, V.A.; LIBARDI, P.L. Density and distribution of pore diameter of an Oxisol under different land use systems and management. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.857-867, 2002.

KLUTHCOUSKI, J.; FANCELLI, A.L.; DOURADO - NETO, D. Manejo do solo e o rendimento de soja, milho, feijão e arroz em plantio direto. **Scientia Agrícola**, v.57, p.97-104, 2000.

KUCHARIK, C.J. et al. Testing the performance of a dynamic global ecosystem model: water balance, carbon balance and vegetation structure. **Global Biogeochemical Cycles**, v.14, p. 795-825, 2000.

KUCHARIK, C.J.; BRYE, K.R. Integrated BIOSphere Simulator (IBIS) Yield and Nitrate Loss Predictions for Wisconsin Maize Receiving Varied Amounts of Nitrogen Fertilizer. **Journal of Environmental Quality**, v. 32, p. 247-268, 2003.

KUCHARIK, C.J. Evaluation of a Process-Based Agro-Ecosystem Model (Agro IBIS) across the U.S. Corn Belt: Simulations of the Interannual Variability in Maize Yield. **Earth Interactions**, v.7, 2003.

KUCHARIK, C.J.; TWINE, T.E. Residue, respiration, and residuals: Evaluation of a dynamic agroecosystem model using eddy flux measurements and biometric data. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.146, p.134–158, 2007.

LAL, R. Mulching effects on runoff, soil erosion and crop response on alfisols in Western Nigeria. **Journal of Sustainable Agriculture**, v.11, p.135-154, 1998.

LAMARI, L. Assess 2.0: Image Analysis Software for Plant Disease Quantification. Department of Plant Science, University of Manitoba, Winnipeg, Canada. **The American Phytopathological Society**. 2008.

LEYS, A.; GOVERS, G.; GILLIJNS, K.; BERCKMOES, E.; TAKKEN, I. Scale effects on runoff and erosion from arable land Losses under conventional tillage and conservation: The role of residue cover. **Journal of Hydrology**, v.390, p.143-154, 2010.

LOKUPITIYA, E. et al. Incorporation of crop phenology in Simple Biosphere Model (SiBcrop) to Improve land-atmosphere carbon Exchanges from croplands, **Biogeosciences**, v.6, p.969-986, 2009.

MAHANAMA, S. P. P. and KOSTER, R. D. Intercomparison of soil moisture memory in two land surface models. **Journal Hydrometeorology**, v.4, p.1134–1146, 2003.

MARTORANO, L.G. Indicadores da condição hídrica do solo com soja em plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, p.397- 405, 2009.

NOVAK, M. et al. Simulating the radiation distribution within a barley-straw mulch. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.102, p. 173-186, 2000.

PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDYAMA, G.C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba, Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz, 1997.

PRUSKI, F.F.; BRANDÃO, V.S.; SILVA, D.D. **Escoamento superficial**. Viçosa:UFV, 2003. 88p.

REICHARDT, K. **A Água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Editora Manole Ltda, 1990. 188p.

REICHERT, J. M.; SUZUKY, L.A.e.S., Dalvan, J.R.; HORN, R.; HAKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness in no-till crop production in highly weathered subtropical soils. **Soil Tillage Research**, v.102, p.242-254, 2009.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, Planta e Atmosfera: Conceitos, Processos e Aplicações**. São Paulo: Editora Manole Ltda, 2004.

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

SALTON, J.C.; HERNANI, L.C.; FONTES, C.Z. **Sistema plantio direto. O produtor pergunta, a Embrapa responde**. Brasília: Embrapa-SPI; Dourados : Embrapa-CPAO, 248p, 1998.

SATURNINO, H.M. Evolução do plantio direto e as perspectivas nos cerrados. **Informe Agropecuário**. Belo Horizonte, v.22, n.208, p.5-12, jan/fev.2001.

SAUER, T.J.; HATFIELD, J.L.; PRUEGER, J.H.; NORMAN, J.M. Surface energy balance of a corn residue-covered field. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.89, p.155–168, 1998.

SCOPEL, E.; MULLER, B.; ARREOLA-TOSTADO, J.M.; CHAVEZ-GUERRA, E.; MARAVX, F. Quantifying and modeling the effects of a light crop residue mulch the water balance: an application to rainfed maize in western Mexico. In: **World congress of soil science**, v.16, 1998. Montpelliu – France. CD Rom.

SELLERS, P.J. et al. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part I. Model formulation. **Journal of Climate**, v. 9, p. 676–705, 1996c.

SMITH, M. et al. Report on the expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements. **FAO Land and Water Development Division**, FAO, Rome, 1991.

SILVA, V. R. **Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação**. 2003. 171 f. Tese. (Doutorado em Agronomia) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

SILVEIRA, P.M.; STONE, L.F. Sistemas de preparo do solo e rotação de culturas na produtividade de milho, soja e trigo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n.2, p.240-244, 2003.

SINGER, J.; HEITMAN, J.L.; HERNANDEZ - RAMIREZ, G.; SAUER, T.; PRUEGER, J.H.; HATFIELD, J.L. Contrasting methods for estimating evapotranspiration in soybean. **Agricultural Water Management**, v.98, p.157-163, 2010.

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.

STEINER, J.L.; SCHOMBERG, H.H. Impacts of crop residue at the Earth-atmosphere interface: introduction. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 54, p. 1-4, 1996.

SUYKER, A.E. et al. 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. Evapotranspiration of irrigated and rainfed maize-soybean cropping systems. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.149, p.443-452, 2009.

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.

SUR, H.S. et al. Effects of rates and modes of mulch application on runoff, sediment an nitrogen loss on cropped an uncropped fields. **Tropical agriculture**, v.1, p.319-322, 1992

TAN, C.S. et al. Effect of tillage and water table control on evapotranspiration, surface runoff and tile drainage soil water content under maize on a clay loam soil. **Agricultural Water Management**, v.54, p.173-188, 2002.

TESAR, M. B. **Physiological basis of crop growth and development**, American Society of Agronomy, Madison. 1984.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M. G.; ROSSATO, L. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. **Soil Science Society America Journal**, v.64, p.327–338, 2000.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M. G. Soil hydraulic properties and van Genuchten parameters for an oxisol under pasture in central Amazonia. In **Amazonian Deforestation and Climate**, GASH, J.H.C.; NOBRE, C.A.; ROBERTS, J.M.; VICTORIA, R.L. (eds). JOHN WILEY and SONS: West Sussex, p.101–124, 1996.

TORMENA, C.A.; BARBOSA, M.C.; COSTA, A.C.S.; GONÇALVES, A.C.A. Density, porosity and penetration resistance in cultivated Oxisol under different tillage systems. **Scientia Horticulturae**, v.59, p.795-801, 2002.

VAN LIER, Q. J. **Soil Physics**, first ed. Brazilian Society of Soil Science. Viçosa. 2010.

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.

VILLA NOVA, N. A.; SALATI, E.; MATSUI, E. Estimativa da evapotranspiração na bacia Amazonica. **Acta Amazonica**, v.6, p.215-228, 1976.

ZIMMERMANN, F.L. **Crescimento de plantas de milho e armazenamento de água no solo em dois sistemas de cultivo**. 2001. 101f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)-Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2001.

WEBB, E.K.; PEARNAN, G.I.; LEUNING, R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.106, p.85-100, 1980.

WEBLER, G.; ROBERTI, D.R.; CUADRA, S.V.; MOREIRA, V.S.; COSTA, M.H. Evaluation of a dynamic agroecosystem model (Agro-IBIS) for soybean in Southern Brazil. **Aceito na revista Earth interactions**, 2012.

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.

WÜRSCHÉ, W. DENARDIN, L.E. Conservação e manejo dos solos - I. Planalto Rio-grandense. Considerações gerais. **Circular Técnica Nacional de Pesquisa do Trigo**, Passo Fundo, n.2, p.1-20, 1980.

WYNGAARD, J.C. Scalar fluxes in the planetary boundary layer - theory, modeling and measurement. **Boundary Layer Meteorology**, v.50, p.49-75, 1990.