

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL

CALIBRAÇÃO E TESTE DO MODELO CROPGRO PARA
A CULTURA DO FEIJÃO

Miquéias Gomes dos Santos
Engenheiro Agrônomo

2015

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**CALIBRAÇÃO E TESTE DO MODELO CROPGRO PARA
A CULTURA DO FEIJÃO**

Miquéias Gomes dos Santos

Orientador: Prof. Dr. Rogério Teixeira de Faria

Coorientador: Prof. Dr. Luiz Fabiano Palaretti

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Produção Vegetal)

2015

M669c Santos, Miquéias Gomes dos
Calibração e teste do modelo CROPGRO para a cultura do feijão /
Miquéias Gomes dos Santos. -- Jaboticabal, 2015
viii, 44 p. : il. ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2015
Orientador: Rogério Teixeira de Faria
Banca examinadora: Patrícia Angélica Alves Marques, Alexandre
Barcellos Dalri
Bibliografia

1. DSSAT. 2. Irrigação. 3. *Phaseolus vulgaris*. 4. Simulação. 5.
Sistema de Plantio. I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências
Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.67:635.652

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da
Informação – Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de
Jaboticabal.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE JABOTICABAL
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS DE JABOTICABAL

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: CALIBRAÇÃO E TESTE DO MODELO CROPGRO PARA A CULTURA DO FEIJÃO

AUTOR: MIQUEÍAS GOMES DOS SANTOS

ORIENTADOR: Prof. Dr. ROGÉRIO TEIXEIRA DE FARIA

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. LUIZ FABIANO PALARETTI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE EM AGRONOMIA (PRODUÇÃO VEGETAL) , pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. ROGÉRIO TEIXEIRA DE FARIA

Departamento de Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal


Profa. Dra. PATRICIA ANGELICA ALVES MARQUES

Universidade de São Paulo / Piracicaba/SP


Prof. Dr. ALEXANDRE BARCELLOS DALRI

Departamento de Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal

Data da realização: 26 de fevereiro de 2015.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus que é digno de toda honra e toda glória, por ter me iluminado na escolha desta profissão e dando força nesta caminhada;

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), pela sua competência enquanto instituição;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Capes pela bolsa de estudo durante o período de mestrado;

Ao meu orientador Rogério Teixeira de Faria que com paciência, dedicação, sabedoria, confiança e correções me ajudou a crescer, tanto pessoalmente como profissionalmente;

Ao professor Luiz Carlos Pavani pelos ensinamentos e pelo apoio na elaboração desta tese;

À banca examinadora da Qualificação: Prof. Dr. José Renato Zanini, Prof. Dr. Glauco de Souza Rolim, Prof. Dr. Alexandre Barcellos Dalri, pelos conhecimentos transmitidos;

À banca examinadora da dissertação de mestrado: Prof. Dr. Patrícia Angelica Alves Marques e Alexandre Barcellos Dalri pela dedicação e pelos ensinamentos.

Aos meus pais, Osvaldo e Ernestina, por acreditarem no que faço e por lutarem para que eu concretizasse este sonho;

A minha namorada por está sempre ao meu lado, me incentivando e ajudando no que foi preciso;

Aos meus irmãos, Júnior e Shara, pelo carinho e apoio;

A todos os meus familiares que me ajudaram nessa caminhada, pela paciência e disposição em todos os momentos;

Aos meus colegas pelo companheirismo, amizade e por tornarem a jornada mais agradável;

A todas as pessoas que me ajudaram nesta caminhada, que Deus estenda suas mãos da mesma maneira. Muito obrigado sempre!

SUMÁRIO

RESUMO.....	VII
ABSTRACT.....	VIII
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 O CULTIVO DE FEIJÃO NO BRASIL.....	3
2.2 ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO NA CULTURA DO FEIJÃO.....	4
2.3 O SISTEMA PLANTIO DIRETO E A INTERAÇÃO SOLO-ÁGUA-ATMOSFERA.....	5
2.4 MODELOS DE SIMULAÇÃO DE CRESCIMENTO DE CULTURAS	8
2.5 O MODELO CROPGRO	9
3 MATERIAL E MÉTODOS	11
3.1 LOCAL, CLIMA E SOLO.....	11
3.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS EMPREGADOS.....	11
3.3 MONITORAMENTO DA IRRIGAÇÃO.....	13
3.3.1 Monitoramento de irrigação pelo tensiômetro.....	13
3.3.2 Manejo de irrigação pelo tanque Classe A	14
3.4 VARIÁVEIS AVALIADAS	15
3.4.1 Índice de área foliar	15
3.4.2 Massa seca.....	15
3.4.3 Produtividade de grãos.....	16
3.4.4 Umidade no solo.....	16
3.4.5 ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NO SOLO.....	17
3.5 CALIBRAÇÃO DO MODELO	17
3.6 TESTE DO MODELO.....	18
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
4.1 CALIBRAÇÃO DO MODELO	22
4.2 TESTE DO MODELO.....	25
4.3 APLICAÇÕES DO MODELO.....	33
5 CONCLUSÕES	36
REFERÊNCIAS.....	37

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. COEFICIENTES GENÉTICOS DA CULTIVAR DE FEIJOEIRO IAC-CARIOCA CALIBRADOS PELO MODELO CROPGRO.....	22
TABELA 2. NÚMERO DE DIAS NECESSÁRIOS PARA OCORRÊNCIA DOS ESTÁDIOS FENOLÓGICOS DO FEIJOEIRO, OBSERVADO E SIMULADO PELO MODELO CROPGRO DURANTE A FASE DE CALIBRAÇÃO.....	23
TABELA 3. PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DO FEIJOEIRO, OBSERVADA E SIMULADA PELO MODELO CROPGRO DURANTE A FASE DE CALIBRAÇÃO.	25
TABELA 4. NÚMERO DE DIAS NECESSÁRIOS PARA A OCORRÊNCIA DE ESTÁDIOS FENOLÓGICOS DO FEIJOEIRO, OBSERVADO E SIMULADO PELO MODELO CROPGRO DURANTE A FASE DE TESTE.....	26
TABELA 5. PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DO FEIJOEIRO, OBSERVADA E SIMULADA PELO MODELO CROPGRO DURANTE A FASE DE TESTE.	28
TABELA 6. PRECIPITAÇÃO E IRRIGAÇÃO OCORRIDAS DURANTE O CICLO DE CULTIVO DO FEIJOEIRO E, COMPONENTES HIDROLÓGICOS DO BALANÇO DE ÁGUA NO SOLO (MM) SIMULADOS PELO MODELO CROPGRO DURANTE O CICLO DA CULTURA EM 2003, EM JABOTICABAL, SP.....	33
TABELA 7. SIMULAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DO FEIJOEIRO E SEUS COMPONENTES, PELO MODELO CROPGRO CULTIVADO EM JABOTICABAL, SP.	34

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. ESQUEMA GERAL DA ÁREA EXPERIMENTAL, EM QUE CADA BLOCO EQUIVALE A ÁREA COMPREENDIDA ENTRE DUAS COTAS CONSECUTIVAS, SEM ESCALA.....	12
FIGURA 2. CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA DO SOLO PARA A CAMADA DE 0 A 0,40 M DE PROFUNDIDADE.	16
FIGURA 3. TEMPERATURAS MÍNIMAS, MÁXIMAS E MÉDIAS DURANTE OS CULTIVOS DE 2002 E 2003 EM JABOTICABAL, SP.....	20
FIGURA 4. RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL E PRECIPITAÇÃO DURANTE OS CULTIVOS DE 2002 E 2003 EM JABOTICABAL, SP.....	21
FIGURA 5. ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR DO FEIJOEIRO, OBSERVADO E SIMULADO NA FASE DE CALIBRAÇÃO DO MODELO CROPGRO.	24
FIGURA 6. MASSA SECA DO FEIJOEIRO, OBSERVADA E SIMULADA NA FASE DE CALIBRAÇÃO DO MODELO CROPGRO.	24
FIGURA 7. ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR DO FEIJOEIRO, OBSERVADO E SIMULADO NA FASE DE TESTE DO MODELO CROPGRO.	26
FIGURA 8. MASSA SECA DO FEIJOEIRO, OBSERVADA E SIMULADA NA FASE DE TESTE DO MODELO CROPGRO	27
FIGURA 9. UMIDADE DO SOLO NAS CAMADAS DE 0-20 E 20-30 CM, OBSERVADA E SIMULADA PELO MODELO CROPGRO.	29
FIGURA 10. VARIAÇÃO DO ARMAZENAMENTO DE ÁGUA PELO SOLO NO PERFIL DE 0-40 CM, OBSERVADAS E SIMULADAS PELO MODELO CROPGRO.	31
FIGURA 11. LÂMINA DE ÁGUA ADSORVIDA PELA PALHADA DO SOLO SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO E CONVENCIONAL, SIMULADA PELO MODELO CROPGRO.	35

CALIBRAÇÃO E TESTE DO MODELO CROPGRO PARA A CULTURA DO FEIJÃO

RESUMO – Modelos de simulação do crescimento de culturas possibilitam estimar a produtividade e componentes do balanço hídrico com baixo custo e alta precisão. O objetivo deste trabalho foi calibrar e avaliar o desempenho do modelo CROPGRO para a cultura do feijoeiro nas condições edafoclimáticas de Jaboticabal, SP. O modelo foi calibrado e avaliado com dados previamente coletados de dois experimentos conduzidos em 2002 e 2003. Os tratamentos desses experimentos corresponderam a dois métodos de monitoramento de irrigação, tensiômetros e tanque Classe A, sob dois sistemas de plantio, direto e convencional. Na calibração foi utilizado o experimento de 2002, e, na validação, o de 2003. Com os coeficientes genéticos calibrados para a cultivar IAC-Carioca, o modelo simulou corretamente a fenologia, o crescimento da área foliar, da massa seca e a produtividade de grãos, durante as fases de calibração e teste, sob sistema plantio direto e convencional, combinados com monitoramentos de irrigação por tensiômetro e tanque Classe A. As simulações de umidade no perfil do solo concordaram com as medidas obtidas no campo, em ambos sistemas de cultivos e métodos de monitoramento.

Palavras-chave: DSSAT, irrigação, *Phaseolus vulgaris*, simulação, sistema de plantio

CALIBRATION AND MODEL TEST ON CULTURE CROPGRO BEAN

ABSTRACT – Simulation models of crop growth make possible to estimate productivity and water balance components with low cost and high precision. The objective was to calibrate and evaluate the performance of CROPGRO model for the bean crop at conditions of Jaboticabal, SP. The model was calibrated and verified with data previously collected from two experiments conducted in 2002 and 2003. The treatment of those experiments corresponded to two irrigation monitoring methods, tensiometers and Class A pan, under two planting systems, no tillage and conventional. For calibration we used the 2002 experiment and in validation, 2003. Using the genetic coefficients calibrated for the IAC-Carioca, the model correctly simulated the phenology, growth of leaf area, dry matter and grain yield, throughout the period of calibration and testing, under no tillage and conventional tillage system, combined with monitoring of irrigation tensiometer and tank Class A. The moisture in the soil profile simulations agreed with the measurements obtained in the field, in both crop systems and monitoring methods.

Keywords: DSSAT, irrigation, *Phaseolus vulgaris*, simulation, planting system

1 INTRODUÇÃO

A cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) tem grande importância no cenário econômico brasileiro, sendo bastante difundido em todos os estados da federação, com área plantada de aproximadamente 3,3 milhões de hectares e rendimento médio de 1.030 kg ha⁻¹ (CONAB, 20014), aquém do seu potencial produtivo.

A produtividade do feijoeiro está diretamente relacionada ao nível de investimento em insumos e técnicas de produção, sendo obtidos altos rendimentos em sistemas de produção tecnificados. A adoção de técnicas como irrigação e práticas conservacionistas de preparo do solo, como o plantio direto, assegura a sustentabilidade dos sistemas produtivos, propiciando maiores rendimentos e contribuindo para a manutenção dos recursos naturais.

Embora de grande importância para a pesquisa agrícola, experimentos de campo nem sempre são viáveis, em função do tempo hábil ou de dificuldades logísticas, além de não serem capazes de responder pontualmente as dúvidas geradas, sobretudo quando envolvem fatores climáticos e suas interações com os fatores de produção. Neste contexto, os modelos computacionais apresentam-se como alternativa para se estimar a produtividade das culturas, em função das condições climáticas e práticas de manejo cultural e de solo, em um curto período (OLIVEIRA et al., 2012).

Exemplos desses modelos computacionais são os modelos incluídos no Sistema de Suporte à Decisão para Transferência de Agrotecnologia (DSSAT), que são capazes de simular o crescimento, o desenvolvimento e o balanço hídrico diversas culturas, em função das características de solo, a planta e a atmosfera (HOOGENBOOM et al., 2012). Dentre esses modelos computacionais, inclui-se o CROPGRO, que permite simular os principais processos fisiológicos de espécies leguminosas, tais como as culturas de feijão, amendoim e soja.

O modelo CROPGRO considera os processos de crescimento e desenvolvimento da cultura em etapas diárias. Constitui um modelo mecanicista e determinístico que simula a duração dos estádios vegetativos e reprodutivos,

acúmulo de biomassa e produção de grãos para uma dada cultivar, em função de tipos de solo, condições climáticas e práticas de manejo. Coeficientes específicos da cultura (fornecidos em um arquivo do programa) e coeficientes genéticos da cultivar (calibrado para o genótipo de interesse) possibilitam a simulação das respostas de uma dada cultivar em distintas condições ambientais.

Nos diversos modelos de cultura presentes no software DSSAT, dentre eles o CROPGRO, é utilizado um único módulo para estimativa do balanço de água no solo. Na literatura constam-se poucos estudos que sobre a eficiência do modelo CROPGRO em estimar a dinâmica da água no solo, sobretudo quando envolvem sistemas de plantio (convencional e direto). Dallacort et al. 2010, avaliando o módulo de equilíbrio de água no solo pelo modelo CROPGRO, relataram que o modelo apresentou deficiências na estimativa da umidade do solo. Faria & Bowen (2003), ao estudarem o desempenho do módulo de balanço de água no solo do modelo CROPGRO com o objetivo em estimar a umidade medida no solo descoberto e cultivado com feijão, promoveram mudanças no módulo do balanço de água no solo, que resultou numa melhora significativa das estimativas de umidade do solo simuladas pelo software DSSAT.

Além das características de solo e dados climáticos, a aplicação de determinado modelo do sistema DSSAT requer a calibração dos coeficientes genéticos da cultivar, caso esta não conste no banco de dados do sistema. Após a calibração do modelo, sua credibilidade necessita ser estabelecida por meio de sua validação nas condições de uso utilizando dados independentes dos utilizados na calibração. Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi calibrar e avaliar o desempenho do modelo CROPGRO para a cultura do feijão, testar o módulo de balanço hídrico do respectivo modelo sob dois sistemas de cultivo e dois métodos de monitoramento de irrigação, nas condições edafoclimáticas de Jaboticabal, SP.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O cultivo de feijão no Brasil

O feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.) está presente diariamente na mesa dos brasileiros, destacando-se como uma das mais importantes culturas do país. O cultivo é realizado em diferentes sistemas de produção, em pequenas e grandes áreas, em todo território nacional, evidenciando assim, não somente a importância econômica, como também social, contribuindo para a manutenção da população rural no campo.

O Brasil é o maior consumidor e produtor mundial dessa leguminosa com 3,58 milhões de toneladas produzidas no ano de 2014, segundo levantamento da CONAB (2014). Os maiores produtores de feijão no país são os estados do Paraná, Minas Gerais, Mato Grosso, Goiás e São Paulo, responsáveis por cerca 70% da produção nacional.

O feijoeiro é considerado uma cultura de risco, em função de sua exigência em relação ao clima, destacando-se o fato de que a disponibilidade hídrica e a temperatura do ar são aspectos determinantes para a exploração comercial da cultura (HOFFMANN JÚNIOR et al., 2007; GUIMARÃES ET al., 2011). No entanto, em função da curta duração do ciclo, aliado a sua insensibilidade ao fotoperíodo (FILGUEIRA, 2008), áreas aptas ao cultivo são encontradas facilmente, sobretudo pela dimensão continental que apresenta o país.

Dependendo da cultivar e da temperatura, o ciclo do feijoeiro varia de 65 a 100 dias. Essa característica de ciclo curto possibilita obter mais de uma colheita por ano ou a rotação com outras culturas. No Brasil, tem se destacado o cultivo de feijão em três épocas distintas, denominadas safra das águas, da seca e de inverno, normalmente conduzida sob irrigação. De modo geral, a safra das águas compreende um período de plantio de outubro a novembro, seguida da safra da seca, de janeiro a março, e por fim, a safra de inverno que tem o plantio nos meses de abril, maio e junho (CONAB, 2014).

A safra de inverno vem ganhando cada vez mais importância econômica, sobretudo no bioma cerrado, da região central do país, onde existe um período caracterizado pela falta de chuvas, compreendido entre maio e setembro (ROCHA et al., 2003). Entretanto, o clima dessa região atende todas as demais exigências da cultura, como é o caso do Estado de São Paulo que apresenta condições ideais de temperatura e insolação. Esse período também é caracterizado pela baixa umidade do ar, que tem provocado efeito positivo no desenvolvimento da cultura, implicando em ganhos em sanidade para cultura, em função, da menor predisposição do ambiente a ocorrência de doenças. Desse modo, através da irrigação, áreas antes não aproveitadas durante o período de baixa disponibilidade hídrica, tornaram-se importantes geradoras de ganhos para produtores, garantindo a oferta do produto durante todo o ano e diminuindo a variação dos preços.

2.2 Estimativa da evapotranspiração na cultura do feijão

Um dos principais entraves para o alcance da produtividade potencial do feijoeiro é a variabilidade climática, sobretudo a falta d'água, evidenciando a enorme importância da irrigação para assegurar a produtividade da cultura (SANTANA et al., 2009). O manejo da irrigação é de fundamental importância na eficiência com que a água é aplicada no solo, e para tal, mensurar a evapotranspiração é determinante no desenvolvimento de uma lavoura irrigada, além de contribuir para a preservação desse importante recurso natural (OLIVEIRA e CARVALHO, 1998).

Segundo Syperreck et al. (2008), a perda de água para a atmosfera está relacionado a fatores climáticos e ao modo como é aplicada ao solo, sendo a demanda por vapor d'água determinada pela quantidade de energia disponível. A escolha de um método que considere o maior número de variáveis na estimativa da perda de água de uma superfície vegetada é um importante passo para o sucesso de uma lavoura.

Dentre os métodos utilizados no manejo da irrigação do feijoeiro, destacam-se o método da tensiometria, juntamente com o do balanço hídrico simplificado

baseado na diferença entre a evapotranspiração estimada pelo método do tanque "Classe A" e a chuva, pelo fato de mensurarem de maneira prática a demanda hídrica da cultura (CUNHA et al., 2013). A tensiometria estima de maneira indireta o momento de se irrigar, utilizando dados de tensão de água no solo, permitindo entender as condições hídricas na rizosfera (LOPES et al., 2004). Por sua vez, o método tanque Classe A relaciona variáveis climáticas e culturais para estimar a evapotranspiração, e desse modo, essa medição representa grande parte da evapotranspiração potencial da cultura (FIGUEIREDO et al., 2002).

O monitoramento da irrigação por esses métodos apresenta diferença na estimativa da demanda de água pelo feijoeiro, interferindo no desenvolvimento da cultura, o que pode ser observado com frequência na literatura. Pavani et al. (2008), estudando o efeito desses métodos de monitoramento da irrigação no desenvolvimento da cultura, observaram que o manejo baseado no método do tanque Classe A proporciona maior eficiência no uso de da água de irrigação.

Em estudo realizado por Lopes et al. (2004), no qual foi avaliado o consumo de água pelas plantas e sobre a produtividade de grãos da cultura, em função desses mesmos métodos de monitoramento de irrigação, concluiu-se que o método do tensiômetro resulta em maiores variações na água disponível do solo, além da maior eficiência no uso da água, com economia de cerca de 15% na água aplicada, sem afetar a produtividade de grãos.

2.3 O sistema plantio direto e a interação solo-água-atmosfera

O sistema plantio direto compreende um complexo de práticas culturais que promovem a melhoria na qualidade do solo, elevando os índices de produtividade e tornando mais sustentáveis os cultivos agrícolas, além de contribuir para a preservação do meio ambiente (PEREIRA et al., 2011). O Brasil é um dos líderes mundiais no uso desse sistema, no qual, segundo a Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha (FEBRAPDP, 2012), ocupa uma área de aproximadamente 32 milhões de hectares.

O plantio direto na palha consolida-se cada vez mais, como uma importante ferramenta para a conservação dos recursos naturais, em função da pequena interferência na estrutura do solo, causada pela mobilização do solo somente na linha de semeadura (HICKMANN e COSTA, 2012; MELO JÚNIOR et al., 2011; WINCK et al., 2014). Além disso, a biomassa presente na superfície do solo confere proteção contra os fatores abióticos, diminuindo impacto das gotas de chuva, assim como o arraste proporcionado pela força da água, em função do aumento na taxa de infiltração do solo (SANTOS et al., 2009; SATO et al., 2012).

A melhoria na qualidade do solo alcançada através do sistema está diretamente relacionada à manutenção da cobertura, implicando num aporte maior de matéria orgânica e a consequente elevação dos teores de carbono orgânico do solo (BALBINOT JUNIOR et al., 2012). Segundo Figueiredo et al. (2008), dentre os inúmeros benefícios da matéria orgânica, destaca-se a alteração positiva nas condições físicas do solo. Consequentemente, a dinâmica da água no solo é alterada, em função do seu translocamento ocorrer por meio dos macroporos, assim, tanto a infiltração como o armazenamento são afetados, interferindo no desenvolvimento das culturas (ABREU et al., 2004; COLARES et al., 2008).

Damalgo et al. (2009), avaliando as alterações na retenção de água no solo e na sua disponibilidade às plantas, ao longo do perfil, em sistema plantio direto, em comparação com o preparo convencional, observaram que sob plantio direto ocorreu maior disponibilidade de água às plantas nas camadas superficiais. Os autores também relatam que a maior disponibilidade de água coincidiu com a maior retenção de água no solo.

De maneira isolada, a cobertura do solo por resíduos vegetais é um fator importante na diminuição da evaporação da água no solo (BAZARI et al., 2009), por criar uma camada isolante, impedindo a incidência direta de radiação sobre o solo. Além da menor oscilação de temperatura no solo (COSTA et al., 2007), a palhada diminui o fluxo de água que naturalmente ocorre entre o solo e a atmosfera, em função da barreira física que é formada. Esse efeito foi observado por Gava et al. (2013), que ao mensurarem a evaporação da água do solo sob pousio e coberto pela palhada do trigo, observaram a redução das perdas de água para atmosfera a medida que a quantidade de palha sobre o solo foi maior. Também Stone e Moreira

(2000) observaram maior eficiência no uso da água pelo sistema plantio direto em comparação aos outros sistemas de cultivo, sobretudo quando há adequada cobertura do solo.

Dalmago et al. (2010), estudando o efeito do sistema de cultivo na evaporação da água na superfície do solo, observaram sob preparo convencional a evaporação é maior em comparação ao plantio direto. Porém, segundo os autores esse efeito só é percebido logo após precipitações pluviais ou irrigações, pois à medida que o solo vai secando, a evaporação passa a ser maior no solo sob plantio direto.

Schwartz et al. (2010), ao avaliarem os efeitos do manejo do solo na dinâmica da água do solo, concluíram que em função da maior absorção de radiação, ocorreu um fluxo maior de vapor próximo da superfície, resultando na maior evaporação pelo sistema plantio direto em comparação ao sistema convencional. Esses autores ainda relatam que a dificuldade em mensurar os efeitos do preparo do solo nas suas propriedades, no entanto, é sabido que os mesmos provocam alterações na relação solo-água-planta.

Segundo Andrade (2008), em um primeiro instante, a evaporação da água no solo ocorre em função da quantidade de calor na atmosfera, e posteriormente, à medida que o solo seca, a evaporação diminui, sendo limitada pela diminuição da água disponível nas camadas superficiais, ocorrendo uma redução na taxa de evaporação ao longo do tempo.

Além disso, a palhada presente na superfície do solo absorve parte da água precipitada, diminuindo a disponibilidade para as plantas (GAVA et al., 2009). Em cultivos sob sequeiro o efeito da absorção de água pela palhada é positiva, em função de diminuir o escoamento superficial (SILVA et al., 2006), no entanto, em sistemas irrigados, sobretudo de baixa intensidade de precipitação, o volume absorvido pela biomassa pode comprometer o fornecimento de água as plantas. Segundo Gava et al. (2013), a biomassa proveniente de um cultivo de trigo pode absorver 1,5 mm de água, sem que esse volume seja armazenado no solo, ao contrário, é perdido facilmente para a atmosfera. Assim, faz-se necessário considerar o efeito combinado da palhada e regime hídrico, a fim de predizer qual sistema de cultivo proporciona maior economia de água.

2.4 Modelos de simulação de crescimento de culturas

Atualmente, o enorme desafio do setor agrícola em atender a crescente demanda por alimentos, causada pelo aumento da população mundial, tem tornado cada vez maior a necessidade por informações que auxiliem na tomada de decisão (JONES et al., 2003). A complexidade com que se apresentam os problemas exige soluções exponencialmente mais sofisticadas se comparadas a aquelas geradas em um passado recente, tornando necessário o uso de tecnologias que diminuam o tempo de espera para que as dúvidas sejam respondidas de modo abrangente, subsidiando assim, o surgimento de novas técnicas de produção, que auxiliem o agricultor a manter-se sempre competitivo.

Entre os diversos paradigmas enfrentados pelo setor agrícola, o desconhecimento das condições meteorológicas, gerada em função das alterações do clima, tem dificultado a tomada de decisões que direcionam os rumos que o setor deve seguir (SILVA et al., 2011). Além disso, segundo Lima Filho et al. (2013), existem diferentes técnicas de cultivo relacionadas a nutrição e a irrigação, que podem ser utilizadas em diversas culturas para o incremento da produção, entretanto, a dificuldade logística e de tempo, faz com que a maioria das novas tecnologias somente sejam utilizadas em culturas nobres.

Neste contexto, os modelos computacionais são alternativas capazes de gerar informações de modo rápido e abrangente. Os modelos de simulação utilizados na agricultura consideram diferentes aspectos, entre eles o solo, o clima, e a morfologia do vegetal em questão (OLIVEIRA et al., 2012). Segundo Hoogenboom (2000), para o estudo dos modelos de culturas é preciso à integração de disciplinas biológicas, físicas, e químicas, sendo, uma representação matemática do sistema solo-água-planta. Desse modo, os modelos baseiam-se em processos de crescimento e desenvolvimento da cultura, possibilitando a geração de previsões de safras e de rendimentos finais, associadas a diferentes opções de manejo (LORENÇONI et al., 2010; MARIN et al., 2011).

Para a execução dos modelos de simulação são necessárias variáveis de entrada, consideradas imprescindíveis, como temperatura do ar, precipitação e

radiação solar (HOOGENBOOM, 2012). Além disso, um modelo matemático somente pode ser aplicado, depois que seu desempenho for atestado nas condições específicas em que o mesmo será utilizado.

Os resultados obtidos com este método requerem uma cuidadosa comparação entre os resultados experimentais e simulados pelo modelo, durante um período representativo e nas condições climáticas do local estudado, a fim de que os mesmos sejam validados. Após a aferição da capacidade do modelo em simular a realidade de modo adequado, podem ser realizadas uma infinidade de experiências computacionais em diversos ambientes, com o objetivo de se definir qual o melhor manejo do sistema (JONES et al., 2003).

2.5 O modelo CROPGRO

O CROPGRO é um modelo mecanicista que prediz a produtividade pela simulação do desenvolvimento e crescimento das culturas, em etapa diária. Para tal, baseia-se em informações da planta, do clima, de manejo e solo (JONES et al., 2003).

O modelo CROPGRO faz parte de um conjunto de modelos de crescimento de culturas, presentes no sistema DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer), que é utilizado em larga escala em diferentes campos de aplicação (HOOGENBOOM, 2012). O DSSAT é formado por diferentes programas que operam em conjunto, com o objetivo de predizer o crescimento e desenvolvimento de culturas por meio de simulação, permitindo simular diferentes manejos para as culturas ao longo de anos (JONES et al., 2003).

O CROPGRO é o modelo do sistema DSSAT para leguminosas como soja, feijão, amendoim, grão de bico, além de cultivos de outras famílias (TIMSINA et al., 2007; THORP et al., 2012). Os dados de entrada requeridos para a simulação do crescimento das culturas incluem valores diários de temperatura máxima e mínima, precipitação, radiação e velocidade do vento. Além desses, é necessário incluir dados de capacidade de retenção de água do solo, suas características físico-

químicas, espaçamento entre plantas, regime de hídrico adotado na irrigação, sistema de cultivo, entre outros.

Uma descrição detalhada do funcionamento e de como é a construção do modelo foi apresentada por Boote et al. (1998 e 2008). O crescimento da cultura é simulado com base no balanço de carbono, água e nitrogênio. O modelo estima a fotossíntese total diária em função da radiação fotossinteticamente ativa, convertida da radiação solar. Características da planta ou de manejo, tais como índice de área foliar específica, teor de nitrogênio nas folhas e densidade de semeadura afetam a absorção de radiação e, conseqüentemente, a fotossíntese. A fotossíntese é decrescida pela respiração e o restante é repartido nos diversos órgãos da planta. O processo de partição dos assimilados depende do estágio de desenvolvimento e tem como prioridade as sementes e vagens, seguidas das estruturas vegetativas tais como folhas, caules e raízes.

Segundo Faria e Bowen (2003), o balanço de água no solo é calculado a partir de processos empíricos, que estimam o fluxo de água no solo ao longo do perfil. O fluxo de drenagem se dá no sentido vertical, das camadas superiores para as inferiores, e para tal, é determinante a saturação das camadas superiores. O modelo promove a estimativa do balanço hídrico do solo através da entrada de dados meteorológicos, características da cultura, como índice de área foliar e profundidade de raízes, juntamente com a capacidade de retenção de água no solo e a profundidade do perfil. Usando um intervalo de tempo variável, incluindo valores diários de umidade do solo, fluxo para cada profundidade, o armazenamento de água no solo no perfil do solo, transpiração real e potencial, evaporação do solo e da precipitação interceptada no dossel da cultura, além da percolação, o modelo simula as entradas e saídas de água no solo (FARIA e MADRAMOOTOO, 1996; RITCHIE, 1998).

Como resultados o modelo fornece componentes do balanço hídrico, do balanço de nitrogênio na planta e solo, e variáveis de crescimento e desenvolvimento da cultura. Estes últimos são detalhados em produção de grãos e biomassa, componentes de rendimento e época de ocorrência dos estádios fenológicos.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizados para alimentar o modelo CROPGRO, dados de campo de dois experimentos conduzidos em 2002 e 2003, cujos detalhes metodológicos são descritos por Lopes (2006). Nestes experimentos, foram realizadas análises dos parâmetros genéticos relacionados com as fases fenológicas, componentes de rendimento do feijoeiro e o balanço de água no solo. Realizou-se simulações dentro do modelo CROPGRO (versão 4.5) da duração do ciclo da cultura, assim como a data dos estádios fenológicos, além das variáveis índice de área foliar, produção de matéria seca, produtividade de grãos, umidade do solo, evapotranspiração da cultura, número de irrigações.

3.1 Local, clima e solo

Os experimentos foram instalados no município de Jaboticabal, SP, cujas coordenadas geográficas são: 21°14'48" S e 48°16'44" W e altitude média de 557 m. O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho eutrófico típico, textura argilosa, A moderado, caulínítico apoférico, relevo suave a ondulado (EMBRAPA, 2013). O clima regional é tropical quente e úmido, com o período chuvoso compreendido entre outubro e março, e o seco entre abril e setembro. As normais climatológicas apresentadas na região durante o período de 1971 a 2000 são: pluviosidade média anual de 1.424 mm, temperatura média anual de 22,2 °C e umidade relativa de 70,8% (ESTAÇÃO AGROCLIMATOLÓGICA, 2014).

3.2 Delineamento experimental e tratamentos empregados

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados, em fatorial 2x2, composto por três blocos, com três parcelas de cada tratamento em

cada bloco. Os tratamentos corresponderam a dois métodos de monitoramento de irrigação e a dois sistemas de cultivo: monitoramento por tensiometria, com o sistema plantio convencional (TENS-PC); monitoramento por tensiometria, com o sistema plantio direto (TENS-PD); monitoramento por meio do balanço hídrico climatológico simplificado pelo tanque Classe A, com o sistema plantio convencional (TCA-PC); o mesmo monitoramento, com o sistema plantio direto (TCA-PD).

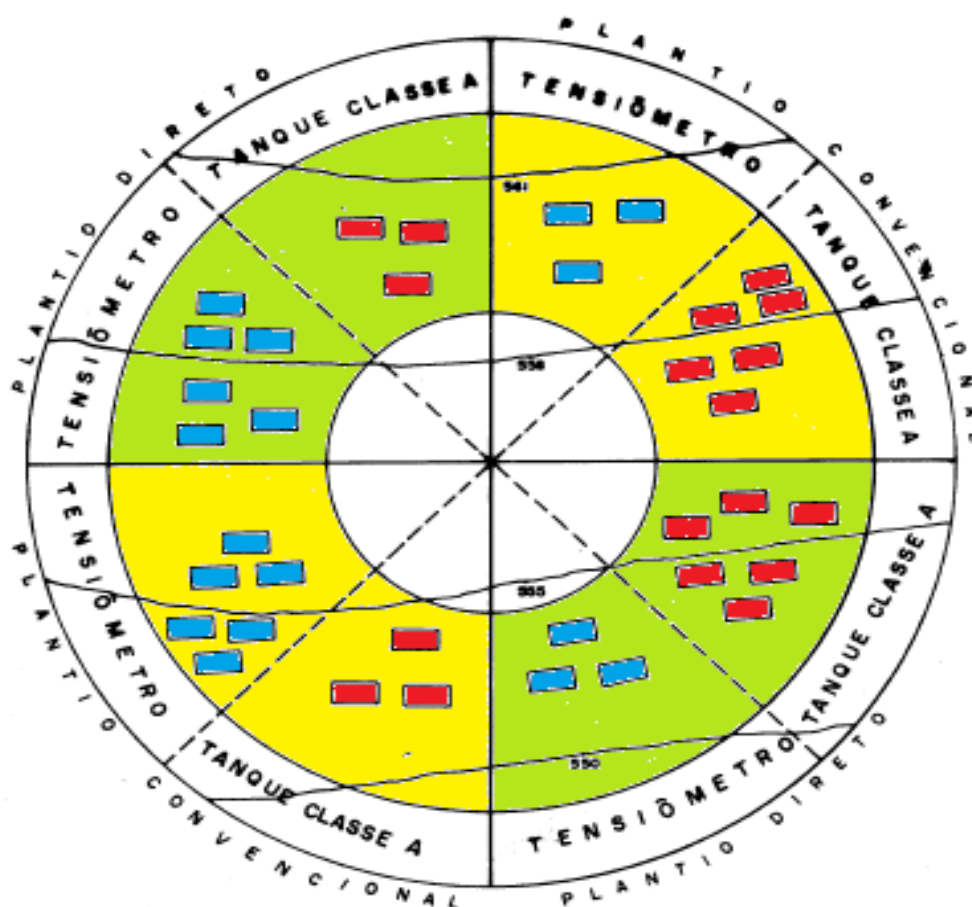


Figura 1. Esquema geral da área experimental, em que cada bloco equivale à área compreendida entre duas cotas consecutivas, sem escala.

A cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*, L), cultivar IAC-Carioca, foi semeada 08/06/2002 e 02/07/2003, no espaçamento de 0,45 m entre linhas e a densidade populacional de 31,2 e 41,4 sementes m⁻² nos experimentos de 2002 e 2003, respectivamente.

A área foi manejada com sucessão das culturas, com feijoeiro no inverno e milho no verão, sob os sistemas plantio direto e convencional, adotando-se 2000 kg ha⁻¹ (2002) e 3500 kg ha⁻¹ (2003) de massa seca da palhada resultante da cultura anterior, com a incorporação de 100% do resíduo no plantio convencional a 20 cm de profundidade. O controle de plantas invasoras, pragas e insetos foi realizado de acordo o recomendado a cada sistema de cultivo. As correções e adubações foram realizadas de acordo com a análise química do solo e baseadas na recomendação para a cultura (AMBROSANO et al., 1996).

3.3 Monitoramento da irrigação

Através da curva característica de retenção de água no solo, determinou-se a água disponível consumida do solo até o dia da irrigação (ADC), para TENS e TCA, sendo o dia definido como o de irrigação, em ambos monitoramentos, o que a umidade atual do solo (Θ_a) atingiu valor igual ou menor ao da umidade crítica do solo (Θ_c), -40 kPa para o feijoeiro, considerando também se nesse dia ou nos três dias posteriores, a probabilidade de ocorrência de chuva, igual ou maior do que a água facilmente disponível (AFD), fosse maior ou igual a 70%. Se isto acontecesse, verificava-se se este evento se confirmava no dia, e com qual quantidade, caso contrário, acompanhava-se a previsão do dia seguinte e dos dois dias posteriores a este, se necessário. Não se confirmando nesses a ocorrência de chuva, procedia-se à irrigação com a lâmina correspondente à ADC.

3.3.1 Monitoramento de irrigação pelo tensiômetro

Nas parcelas em que o manejo da irrigação foi efetuado por tensiometria, foram instalados, na parte central de cada uma delas, um conjunto de 2 tensiômetros a 0,15 m e a 0,30 m de profundidade, sendo que o tensiômetro de 0,15

m foi o de decisão enquanto que o de 0,30 m o de controle. O momento de se proceder à irrigação foi definido quando a média das leituras dos tensiômetros de decisão acusasse valores de tensão da água no solo igual ou superior a -40 kPa. A lâmina líquida de irrigação (LL) foi calculada pela diferença entre a umidade do solo na capacidade de campo (Θ_{cc}) e a umidade atual na camada 0-40 cm no momento da irrigação (Θ_a). A umidade atual do solo no momento da irrigação foi determinada por tensiômetro e convertida para umidade por meio da curva de retenção de água no solo. A lâmina de irrigação ou água disponível consumida até o dia da irrigação ($ADC_{(Tens)}$), foi calculada conforme a (Eq. 1):

$$LL_{(TENS)} = (\Theta_{cc} - \Theta_a) 1000 Z \text{ (mm)} \quad (1)$$

em que:

Θ_{cc} – umidade do solo na capacidade de campo ($m^3 m^{-3}$);

Θ_a – umidade atual do solo no momento da irrigação ($m^3 m^{-3}$);

Z – profundidade do sistema radicular (m).

3.3.2 Manejo de irrigação pelo tanque Classe A

No monitoramento pelo método tanque Classe A, considerou-se o balanço em 24 horas entre a evapotranspiração da cultura (ET_c) e a chuva efetiva, incorporada ao solo na camada de 0 a 0,40 m de profundidade. A lâmina líquida de irrigação, tomada como referência para ser aplicada, foi obtida a partir do balanço hídrico climatológico simplificado (Eq. 2):

$$(Tca) \sum_{i=1}^n (E_c - P_e)_i \quad (2)$$

em que,

ADC – água disponível consumida até o dia da irrigação (mm);

Pe – chuva efetiva diária (24 h), mm;

i – intervalo entre irrigações (dias).

3.4 Variáveis avaliadas

3.4.1 Índice de área foliar

Foi avaliado semanalmente em cada parcela, a partir dos 26 até 95 dias após à semeadura (DAS), para o ano de 2002 e, dos 51 aos 100 DAS para o ano de 2003, realizando-se 2 amostragens por parcela, de forma não destrutiva, com o instrumento LAI-2000 da Li-Cor. Esse aparelho calcula o índice de área foliar ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) por meio de medições da radiação solar sobre e sob o dossel da cultura, através de um sensor óptico (LI-COR, 1992).

3.4.2 Massa seca

Semanalmente, dos 26 aos 95 DAS para o primeiro ano e, dos 51 aos 100 DAS para o segundo ano, foram realizadas amostragens de plantas para determinação de massa seca total (kg ha^{-1}), incluindo órgãos produtivos e vegetativos (à exceção das raízes). Essas amostragens foram sempre realizadas após a estimativa do índice de área foliar, e consistiram na retirada de três plantas por parcela, sendo 27 plantas por tratamento, totalizando 108 plantas por amostragem semanal. As amostras foram acondicionadas em sacos de papel e levados para secagem em estufa à, aproximadamente, 70 °C por, no mínimo, 24 h. Em seguida, faziam-se as pesagens em balança de precisão de 0,01 g, determinando assim, a massa seca de cada planta.

3.4.3 Produtividade de grãos

Ao final do ciclo da cultura, em ambos os anos, foram avaliadas as produtividades de grãos (kg ha^{-1}), sendo coletadas dentro da área útil de cada parcela todas as plantas, das quais foram separados os grãos. A área destinada à avaliação da produção de cada parcela foi de $5,535 \text{ m}^2$.

3.4.4 Umidade no solo

A umidade do solo foi estimada diariamente, a partir dos 42 até os 101 DAS no segundo ano. A umidade no perfil foi avaliada de forma indireta, por meio de 30 tensiômetros com manômetro de mercúrio instalados a 0,10; 0,15; 0,30; 0,50 e 0,70 m, em todas as parcelas, conjugados com a curva de retenção de água do solo (Figura 2) para a obtenção da umidade volumétrica ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), pelo modelo de VAN GENUCHTEN (1980). As leituras dos tensiômetros foram realizadas todos os dias pela manhã (em torno das 8:00 horas) e transformadas em potencial mátrico, posteriormente transformadas em umidade volumétrica.

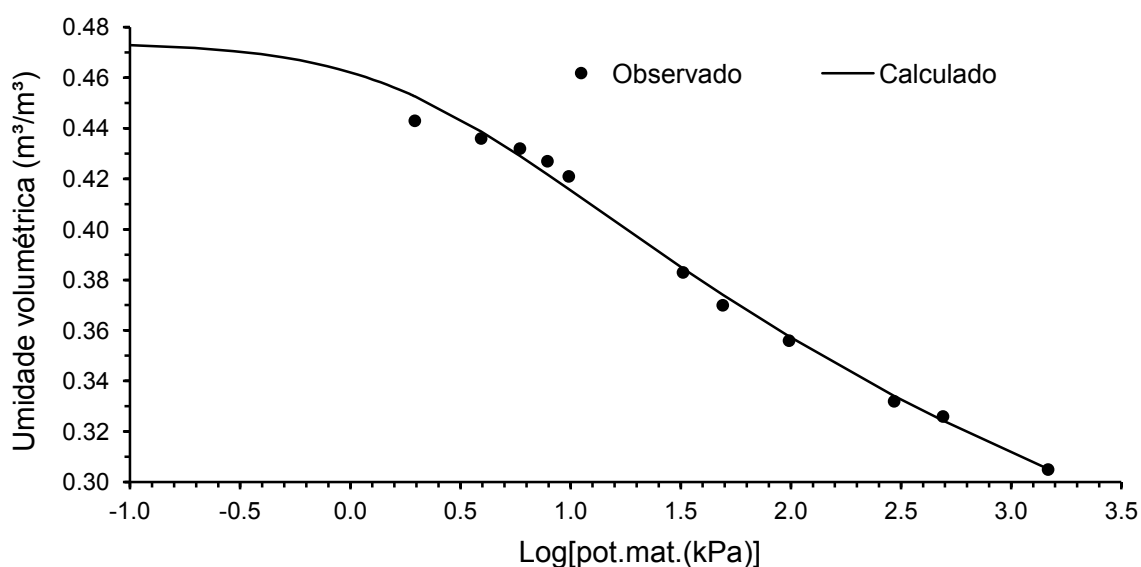


Figura 2. Curva de retenção de água do solo para a camada de 0 a 0,40 m de profundidade.

3.4.5 Armazenamento de água no solo

O armazenamento de água no solo (A_z) foi calculado diariamente (Eq. 3) até a profundidade de 0,40 m pelo método do trapézio (LIBARDI, 2005):

$$A_z = \Theta_a 1000 Z \quad (3)$$

em que:

A_z – lâmina de água armazenada no solo (mm);

Θ_a – umidade em base de volume média do perfil no dia atual ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$);

Z – profundidade do sistema radicular (m).

3.5 Calibração do modelo

No procedimento de calibração dos coeficientes genéticos utilizou-se o aplicativo GenSelect/GenCalc incluído no sistema DSSAT com os dados dos quatro tratamentos do experimento conduzido em 2002.

A calibração do modelo foi iniciada utilizando-se os coeficientes genéticos da cultivar Carioca, fornecidos no programa, simulando-se o desenvolvimento da cultura durante o mesmo período de condução dos experimentos. O processo de calibração consistiu no ajuste dos coeficientes genéticos relacionados com o desenvolvimento da cultura, com o objetivo de minimizar os desvios entre as datas de ocorrência da floração, aparecimento da primeira vagem e maturidade fisiológica, simuladas pelo modelo e observadas experimentalmente. A seguir, foram calibrados os coeficientes genéticos relacionados com o crescimento da cultura, a fim de que as estimativas do modelo da produtividade de massa seca e de grãos, índice de área foliar, e componentes de rendimento (número de vagens por planta, número de grãos por vagem e massa unitária de grãos) coincidisse com os valores experimentais.

3.6 Teste do modelo

O teste estatístico do modelo CROPGRO teve o objetivo de determinar o grau de ajuste das variáveis biométricas estimadas em relação às observações experimentais em campo (variáveis avaliadas). Foram determinados os seguintes índices estatísticos: coeficiente de determinação (R^2), o índice de concordância (dW) (WILLMOTT et al., 1985), erro absoluto médio (EAM).

O coeficiente de determinação (R^2) é uma medida de ajustamento do modelo, em relação aos valores observados (Eq. 4). O coeficiente varia entre 0 e 1, indicando, em percentagem, o quanto o modelo consegue explicar os valores observados, assim, quanto maior o for, maior a concordância entre os valores observados e os estimados. O índice de concordância proposto por Willmot (dW), avalia a exatidão do modelo, indicando o grau de afastamento dos valores estimados em relação aos valores observados (Eq. 5). Varia de 0, pior desempenho ou desempenho nulo a 1, desempenho perfeito. O erro absoluto médio (EAM) é baseado na soma dos valores absolutos da diferença entre os valores observados e os estimados pelo modelo (Eq. 6). Quanto menor o valor de EAM, maior a precisão do modelo, ou seja:

$$R^2 = \frac{(\sum (i - \bar{i})(j - \bar{j}))^2}{\sum (i - \bar{i})^2 \sum (j - \bar{j})^2} \quad (4)$$

em que:

- média dos valores observados no campo;
- $\bar{i}$ – valores observados no campo;
- média dos valores simulados pelo modelo;
- $\bar{j}$ – valores simulados pelo modelo.

$$dW = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - i)^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P} + i - \bar{i})^2} \quad (5)$$

em que:

P_i – valor estimado pelo modelo;

i – valor observado em campo;

$\bar{i}$ – média dos valores observados em campo;

i – ordem do dado observado;

n – número de dados.

$$EAM = \frac{\sum_{i=1}^n |i - P_i|}{n} \quad (6)$$

em que:

i – valor observado em campo;

P_i – valor estimado pelo modelo;

i – ordem do dado observado;

n – número de dados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As condições climáticas durante os cultivos foram semelhantes, como mostram as Figuras 3 e 4. A temperatura se manteve dentro da faixa ideal para o feijoeiro, que se situa entre 18 e 25°C (ADRADE; CARVALHO; VIEIRA, 2006), sendo as médias de 21,8 e 21,9°C, nos cultivos de 2002 e 2003, respectivamente.

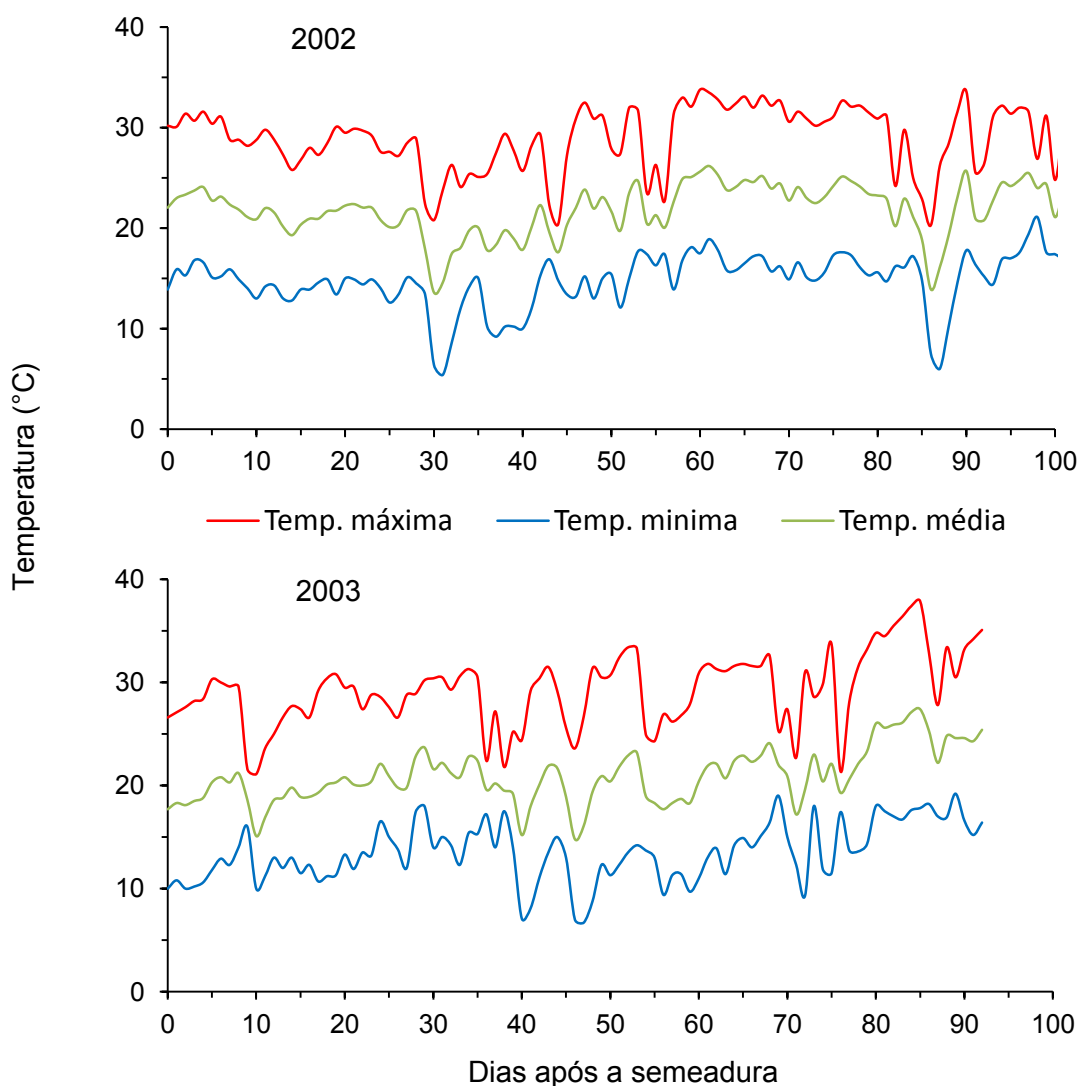


Figura 3. Temperaturas mínimas, máximas e médias durante os cultivos de 2002 e 2003 em Jaboticabal, SP.

Houve radiação solar plena durante os ciclos da cultura, em função da pouca nebulosidade desse período, ocasionada pela baixa ocorrência de chuvas (Figura 4).

Como previsto, o regime de chuvas durante os cultivos não atenderam a demanda hídrica da cultura. As precipitações ocorridas somaram 166 mm durante o cultivo de 2002 e 82 mm em 2003. Segundo Klar e Fernandes (1997), na região central do estado de São Paulo, durante o ciclo do feijoeiro de inverno a evapotranspiração média é de 157 mm. Apesar do volume precipitado durante o cultivo de 2002 superar a demanda hídrica da cultura, a má distribuição ocasionou suprimento hídrico inadequado, sobretudo nos estádios de maior exigência, justificando assim, o uso da irrigação.

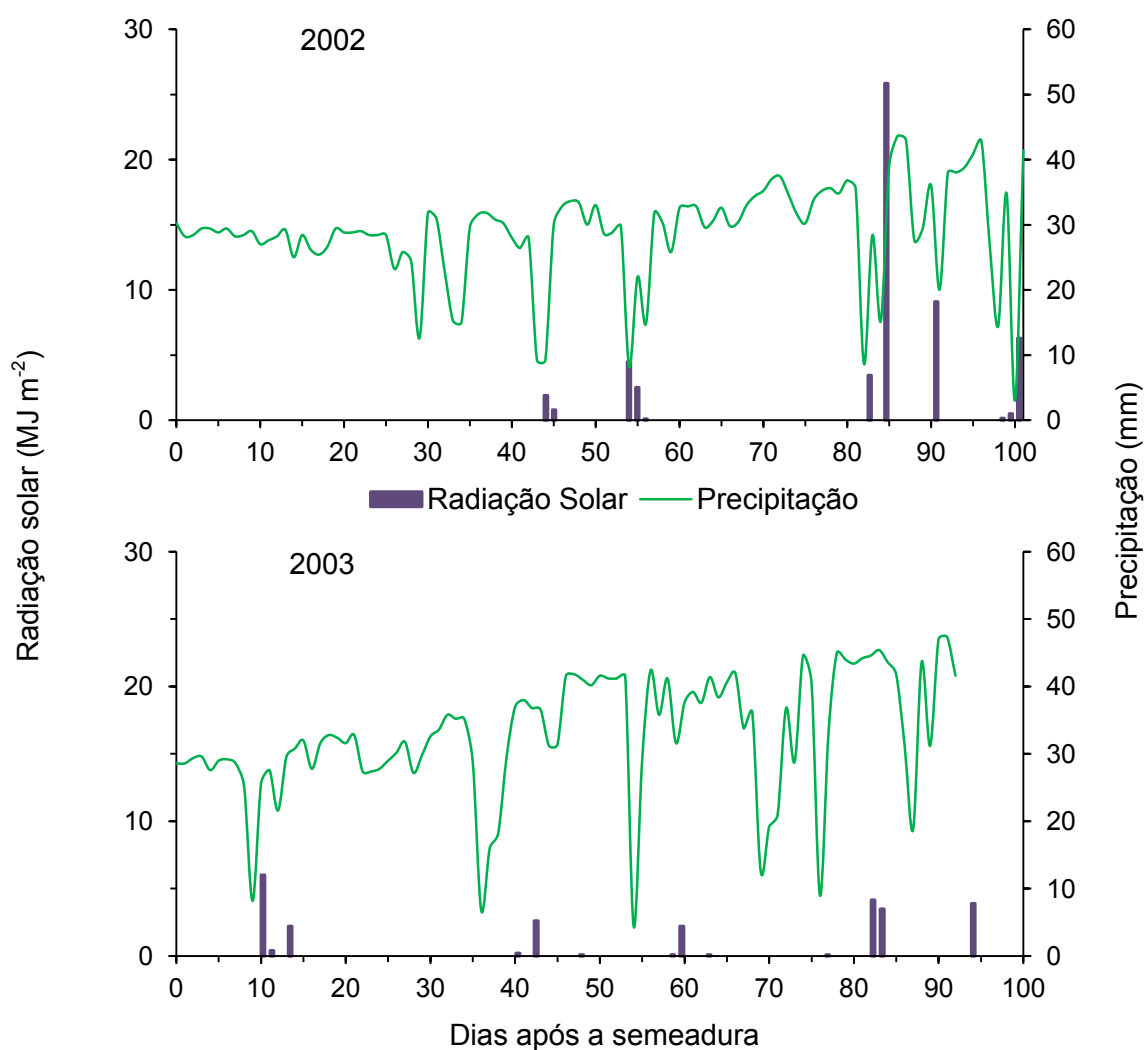


Figura 4. Radiação solar global e precipitação durante os cultivos de 2002 e 2003 em Jaboticabal, SP.

4.1 Calibração do modelo

Os coeficientes genéticos utilizados no modelo CROPGRO que foram calibrados para a cultivar IAC-Carioca são apresentados na Tabela 1. Assumindo-se a insensibilidade da cultivar ao fotoperíodo, foram ajustados os seguintes parâmetros: EM-FL; FL-SH; FL-SD; SD-PM; FL-LF; SIZLF; WTPSD; SFDUR; SDPDV; PODUR.

Tabela 1. Coeficientes genéticos da cultivar de feijoeiro IAC-Carioca, calibrados pelo modelo CROPGRO.

CULTIVAR	CSDL	PPSEN	EM-FL	FL-SH	FL-SD	SD-PM	FL-LF
IAC-Carioca	12,17	0,0	24,0	6,0	18,0	16,0	30,0
LFMAX	SLAVR	SIZLF	XFRT	WTPSD	SFDUR	SDPDV	PODUR
1,00	300	133,0	1,00	0,275	20,0	4,0	10,0

CSDL - Limite da duração do dia abaixo do qual não há efeito no desenvolvimento reprodutivo (horas); PPSSEN - Declividade da resposta do desenvolvimento ao fotoperíodo (hora^{-1}); EM-FL - Tempo entre emergência e florescimento (R1) (dias fototérmicos); FL-SH - Tempo entre primeira flor e primeira vagem (R3) (dias fototérmicos); FL-SD - Tempo entre primeira flor e primeira semente (R5) (dias fototérmicos); SD-PM - Tempo entre primeira semente (R5) e maturação fisiológica (R7) (dias fototérmicos); FL-LF - Tempo entre primeira flor (R1) e fim da expansão de folhas (dias fototérmicos); LFMAX - Taxa máxima de fotossíntese de folhas a 30 °C, 350 ppm CO₂, e alta luminosidade ($\text{mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$); SLAVR - Área foliar específica da cultivar sob condições padrões de crescimento ($\text{cm}^2 \text{ g}^{-1}$); SIZLF - Tamanho máximo de folha completa (folha trifoliada) (cm^2); XFRT - Fração máxima do crescimento diário que é repartido para semente + vagem; WTPSD - Massa máxima de sementes (g); SFDUR - Duração de enchimento de grãos para condições padrões de crescimento (dias fototérmicos); SDPDV - Média de grãos por vagem sob condições padrões de crescimento; PODUR - Tempo requerido para a cultivar atingir o enchimento de vagens sob condições padrões ótimas (dias fototérmicos)

Em decorrência das baixas temperaturas ocorridas durante o ciclo da cultura, para melhoria da estimativa da data de florescimento foi necessário ajustar os coeficientes OPTBI em 20 °C e SLOBI em 0.05 °C⁻¹. O valor do coeficiente OPTBI corresponde à temperatura mínima acima da qual não há efeito em atrasar o desenvolvimento no período emergência-florescimento; o valor do coeficiente SLOBI corresponde à taxa de atraso da fase fenológica por unidade de temperatura abaixo da temperatura estabelecida para OPTBI. Esse procedimento foi também adotado por Faria et al. (2002) para simular adequadamente a duração da fase vegetativa do feijoeiro cultivado no inverno no estado Paraná.

O modelo estimou corretamente a duração do ciclo da cultura e as datas dos estádios fenológicos (Tabela 2). As datas simuladas e observadas coincidiram satisfatoriamente, sendo o florescimento estimado em 54 dias após a semeadura (DAS), o aparecimento da primeira vagem em 61 DAS e a maturação fisiológica em 96 DAS. Corroborando com estes resultados, outros estudos presentes na literatura também evidenciam a capacidade do modelo em simular a fenologia das cultivares de feijão (MEIRELES et al., 2002; OLIVEIRA et al., 2012).

Tabela 2. Número de dias necessários para ocorrência dos estádios fenológicos do feijoeiro, observado e simulado pelo modelo CROPGRO durante a fase de calibração.

Tratamento	Florescimento		1° Vagem		Maturação Fisiol.	
	O	S	O	S	O	S
TENS – PC	54	54	61	61	96	95
TENS – PD	54	54	61	61	96	95
TCA – PC	54	54	61	61	96	96
TCA – PD	54	54	61	61	96	96

O – observado; S – simulado;

Houve alta correlação entre os índices de área foliar simulados pelo CROPGRO e os observados no campo, evidenciada pelos indicadores de desempenho utilizados na avaliação (Figura 5). Os índices de concordância variaram de 0,94 a 0,99, os coeficientes de determinação de 0,74 a 0,77 e os erros absolutos médios entre 0,59 m² m⁻² a 0,98 m² m⁻².

Para produtividade de massa seca os índices de concordância e os coeficientes de determinação evidenciaram alta correlação entre os dados experimentais e os simulados pelo modelo. Os índices de concordância variaram de 0,92 e 0,96 e os coeficientes de determinação de 0,92 e 0,98. As estimativas foram subestimadas em cerca de 21%, 24%, 26% e 23%, para todos os tratamentos TENS-PC, TENS-PD, TCA-PC e TCA-PD, respectivamente (Figura 6). O valor máximo de massa seca estimada (5914 kg ha⁻¹) ocorreu com o tratamento TCA-PD, aos 96 DAS, porém no campo, o tratamento mais produtivo foi TCA-PC, com 7977 kg ha⁻¹ aos 88 DAS.

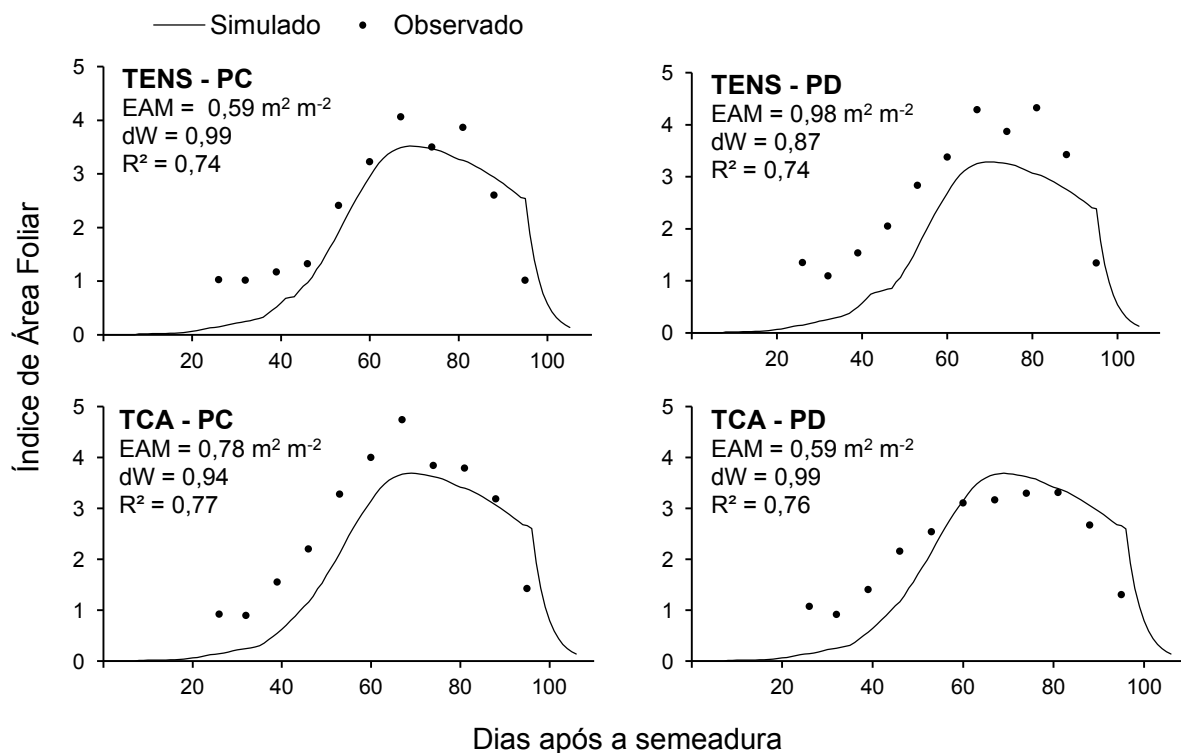


Figura 5. Índice de área foliar do feijoeiro, observado e simulado na fase de calibração do modelo CROPGRO.

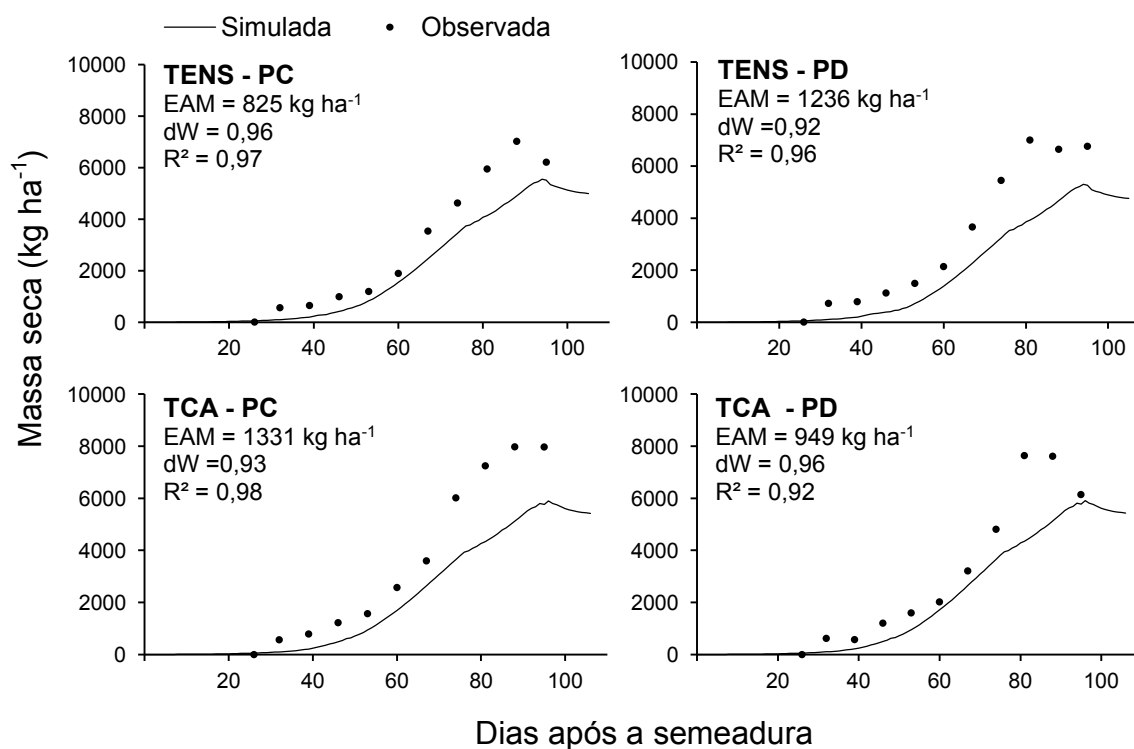


Figura 6. Massa seca do feijoeiro, observada e simulada na fase de calibração do modelo CROPGRO.

As estimativas da produtividade de grãos apresentaram alta correlação entre os valores simulados e os observados (Tabela 3), com variação máxima de 5,0%, refletindo a boa precisão ocorrida na calibração do modelo. Oliveira et al. (2012), calibrando o modelo CROPGRO para diferentes cultivares de feijão, encontraram variação de até 15,94% entre as produtividades da cultura estimadas e as observadas no campo. As produtividades médias simuladas foram similares entre os quatro tratamentos, mostrando que os sistemas de cultivo e os métodos de monitoramento de irrigação condicionaram o desenvolvimento ideal da cultura.

Tabela 3. Produtividade de grãos do feijoeiro, observada e simulada pelo modelo CROPGRO durante a fase de calibração.

Tratamento	Simulada	Observada	Diferença	Diferença
	(kg ha ⁻¹)			(%)
TENS – PC	2311	2397	-86	-3,6
TENS – PD	2225	2342	-117	-5,0
TCA – PC	2594	2630	-36	-1,4
TCA – PD	2593	2471	122	4,9

% = [(Simulada – Observada) / Observada] x 100

4.2 Teste do modelo

Assim como na fase de calibração, o modelo também foi preciso na estimativa da duração do ciclo da cultura (Tabela 4). No entanto, as datas de ocorrência da floração e aparecimento da primeira vagem foram subestimadas. O florescimento simulado pelo modelo ocorreu aos 59 DAS, enquanto no campo se deu aos 72 DAS. A data da aparição da primeira vagem foi simulada em 67 DAS, porém no campo ocorreu aos 79 DAS. A discrepância entre os dados pode ser explicada por imprecisão do modelo ou pela forma de avaliação em campo, que foi feita visualmente, assumindo a ocorrência dos estádios quando 50% plantas apresentava pelo menos uma flor ou uma vagem.

Tabela 4. Número de dias necessários para a ocorrência de estádios fenológicos do feijoeiro, observado e simulado pelo modelo CROPGRO durante a fase de teste.

Tratamento	Florescimento		1° Vagem		Maturação Fisiol.	
	O	S	O	S	O	S
TENS – PC	72	59	79	67	100	100
TENS – PD	72	59	79	67	100	100
TCA – PC	72	59	79	67	100	100
TCA – PD	72	59	79	67	100	100

O – observado; S – simulado;

O modelo estimou satisfatoriamente a área foliar, como evidencia o bom ajuste entre os dados simulados e observados no campo (Figura 7). Os índices de concordância variaram de 0,75 (TENS-PC) a 0,99 (TENS-PD e TCA-PD), os coeficientes de determinação de 0,74 (TCA-PD) a 0,93 (TCA-PC) e os erros absolutos médios de 0,82 (TENS-PD) a 1,08 (TENS-PC).

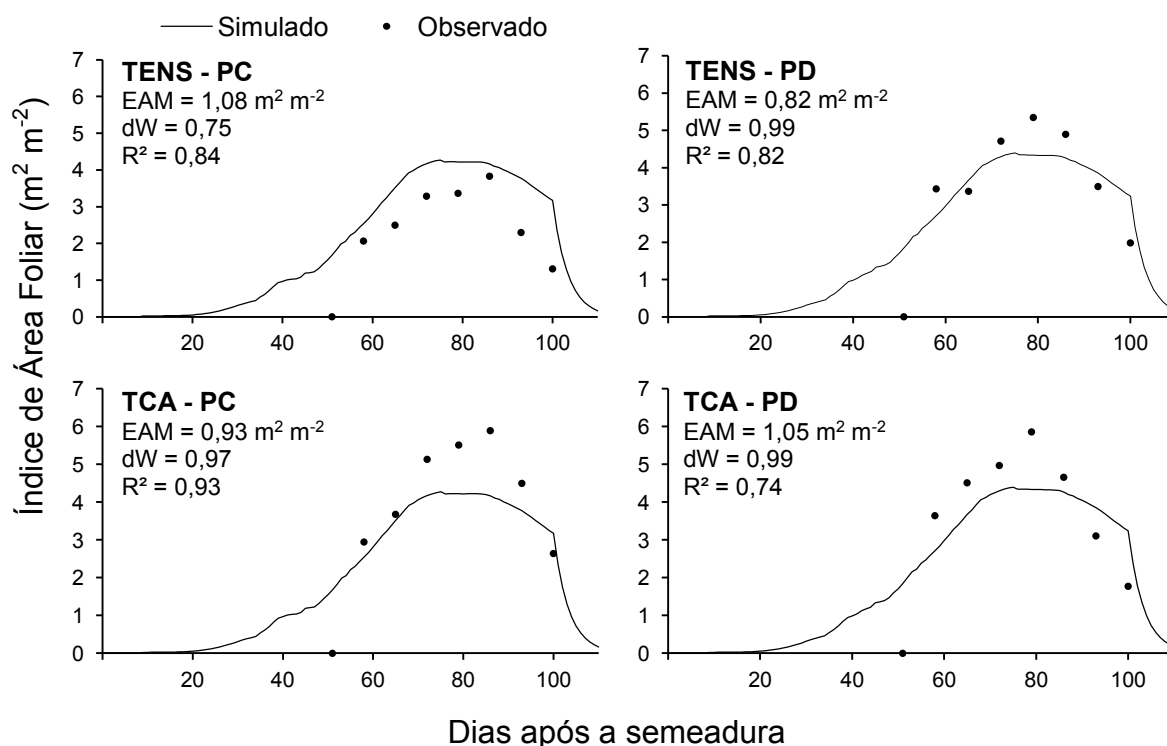


Figura 7. Índice de área foliar do feijoeiro, observado e simulado na fase de teste do modelo CROPGRO.

O maior índice de área foliar foi estimado com os tratamentos sob plantio direto (4,39 m² m⁻²) aos 75 DAS, valor subestimado em 26%, em relação ao

observado experimentalmente, que ocorreu aos 86 DAS ($5,89 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$). Em contrapartida, os tratamentos sob plantio convencional apresentaram a menor estimativa do índice de área foliar ($4,27 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$), também aos 75 DAS, superestimando em 22% a observação experimental ($3,82 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ aos 86 DAS). Esses resultados são superiores aos encontrados por Dallacort et al. (2011), que avaliaram a correlação entre estimativas do modelo CROPGRO com observações a campo, de experimentos conduzidos com diferentes datas de plantio, nas condições edafoclimáticas de Maringá, PR, observaram o que IAF máximo simulado pelo modelo foi de $2,55 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$.

O comportamento da massa seca acumulada é apresentado na Figura 8, na qual se observa que a estimativa do modelo subestima os valores experimentais em todos os tratamentos, exceto o TENS-PC, entretanto, seguiu o curso dos dados observados ao longo do ciclo da cultura. Ocorreu alta correlação entre os valores estimados e os dados de campo, como evidencia os índices de concordância (0,88 a 0,99) e os coeficientes de determinação (0,83 a 0,90). Os erros absolutos médios variaram de 833 kg ha^{-1} para o tratamento TENS-PD a 1351 kg ha^{-1} para TENS-PC.

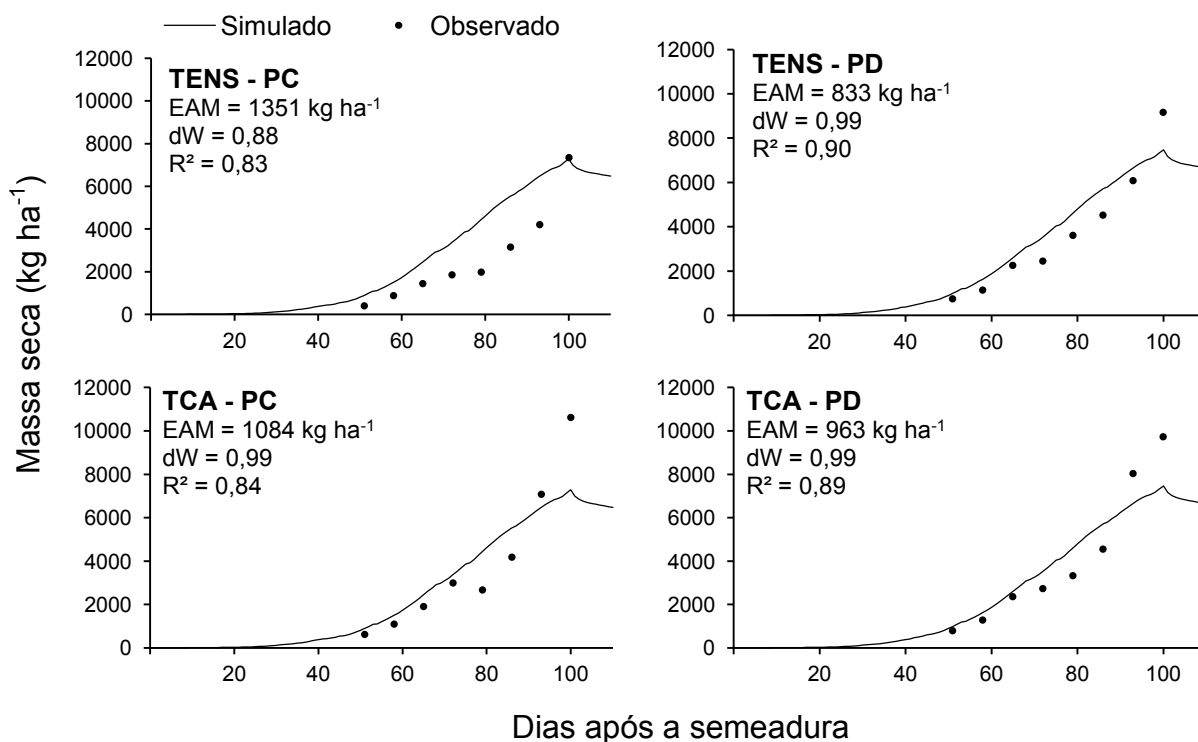


Figura 8. Massa seca do feijoeiro, observada e simulada na fase de teste do modelo CROPGRO.

As maiores estimativas de produção de massa seca foram alcançadas sob plantio direto, com 7466 kg ha⁻¹ aos 100 DAS, independentemente do monitoramento de irrigação. No campo, o tratamento TCA-PC e TENS-PC, apresentaram a maior e a menor produção de biomassa, com produtividades de 10614 kg ha⁻¹ e 7345 kg ha⁻¹, respectivamente, também aos 100 DAS. As variações entre os valores simulados e os observados experimentalmente foram de 0,9%, 18,5% 31,4% e 23,2%, equivalente aos tratamentos TENS-PC, TENS-PD, TCA-PC e TCA-PD, em respectivo.

As estimativas das produtividades de grãos foram próximas dos valores observados, exceto no tratamento TENS-PC, no qual o modelo superestimou em 51,6%, em comparação a observação no campo (Tabela 5). Para os demais tratamentos houve boa concordância entre as estimativas e os dados observados a campo, com variações de 2,0%, 16,7% e 3,9 %, para TENS-PD, TCA-PC e TCA-PD, respectivamente, evidenciando que o modelo simula adequadamente a produtividade da cultura. Meireles et al. (2002) calibrando e testando o modelo CROPGRO para cultivar Carioca, por meio de um experimento com diferentes espaçamentos e doses de fertilizantes, observaram que os valores simulados superaram os experimentais na ordem de 10,8% a 15,4%.

Tabela 5. Produtividade de grãos do feijoeiro, observada e simulada pelo modelo CROPGRO durante a fase de teste.

Tratamento	Simulado	Observado	Diferença	Diferença
		(kg ha ⁻¹)		(%)
TENS – PC	2829	1866	963	51,6
TENS – PD	2861	2805	56	2,0
TCA – PC	2829	3394	-565	-16,7
TCA – PD	2861	2754	107	3,9

$$\% = [(Simulada - Observada) / Observada] \times 100$$

A comparação das estimativas da umidade do solo pelo modelo CROPGRO nas camadas 0-20 e 20-40 cm, com a umidade do solo média medida por tensiômetro é mostrado na Figura 9. Em geral, os valores simulados seguem a variação da medida de umidade do solo ocasionada pelos tratamentos, como refletido pelos elevados índices de concordância que variaram de 0,63 a 93 para o

perfil de 0-20 cm, e 0,53 a 0,99 para o perfil de 20-40 cm. O ajuste do modelo aos dados de campo foi satisfatório, sobretudo quando o monitoramento da irrigação se deu pelo método do tensiômetro, como evidencia os erros médios absolutos, que apresentaram variação de $0,009 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ a $0,027 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e de $0,001 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ a $0,022 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, para os perfis de 0-20 cm e 20-40 cm, respectivamente.

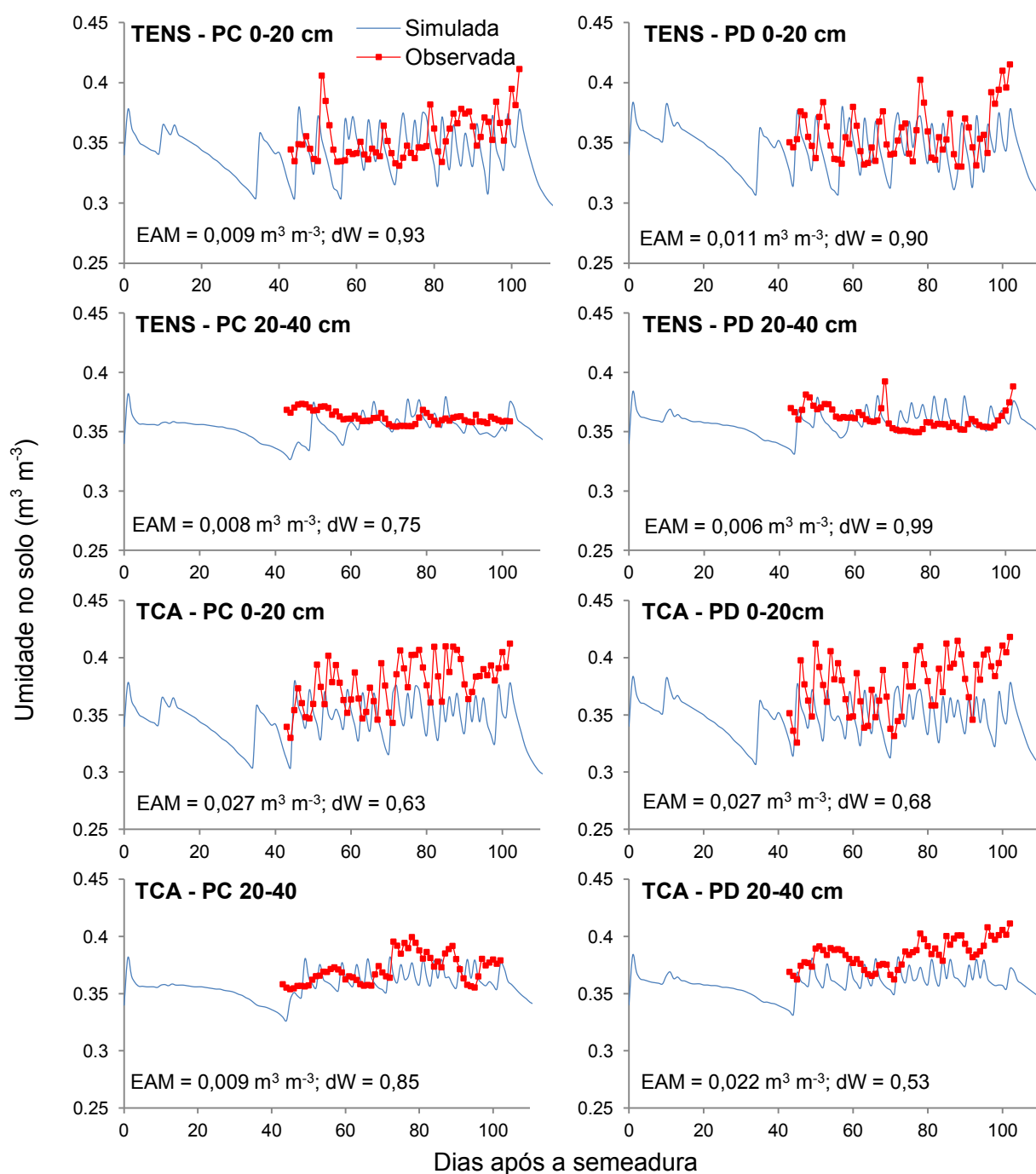


Figura 9. Umidade do solo nas camadas de 0-20 e 20-30 cm, observada e simulada pelo modelo CROGRO.

O monitoramento da irrigação pelo método TCA manteve o solo com valores médios de umidade superiores ao monitoramento pelo TENS. Comportamento semelhante ao do TCA em relação ao TENS pode ser observado para o PD em relação ao PC, apesar de ocorrer de maneira menos acentuada. Assim como aconteceu no compartimento superior, na camada 20-40 cm, os maiores valores de umidade do solo, ocorreram no tratamento de manejo de irrigação TCA, tanto para no manejo do solo por PC quanto no PD. Como esperado, as maiores variações de umidade no solo ocorreram na camada superior do perfil, em função da maior exposição da camada aos fatores abióticos, que estão diretamente ligados à perda de água pelo solo. A estimativa da umidade do solo para as camadas inferiores apresentaram variações mais acentuadas, em relação aos dados de campo, indicando que o modelo superestimou o efeito de variáveis como evaporação e drenagem.

Faria & Bowen (2003), ao estudarem o desempenho do módulo de balanço de água no solo do modelo CROPGRO em estimar a umidade medida em solo descoberto e cultivado com feijão, promoveram mudanças no módulo do balanço de água no solo, que resultou numa melhora significativa das estimativas de umidade do solo. Por sua vez, Dallacort et al. 2011, avaliando o módulo de equilíbrio de água no solo pelo modelo CROPGRO, relataram que o modelo apresentou deficiências na estimativa da umidade do solo, sobretudo após as precipitações.

A variação entre os dados simulados e observados no experimento (Figura 8) pode ser explicada pelas leituras dos tensiômetros no campo, que foram realizadas diariamente pela manhã, desconsiderando assim, o efeito de precipitações ou irrigações ocorridas após a avaliação. Já o modelo considera o balanço em 24 horas, levando em conta todos os eventos meteorológicos ocorridos nesse intervalo. Outros autores também associaram a discrepância entre os dados estimados e simulados a eventuais erros ocorridos nas medições de campo (DALLACORT et al., 2011; FARIA et al., 1994; FARIA e MADRAMOOTOO, 1996).

Seguindo a mesma tendência, o armazenamento de água no solo também apresentou maiores discrepâncias entre as estimativas do modelo e as observações experimentais, nos tratamentos com monitoramento de irrigação pelo método tanque classe A (Figura 10). No entanto, a correlação entre os dados é considerada

satisfatória, como reflete os coeficientes de determinação, que foram 0,88, 0,91 e 0,64, para TENS-PC, TENS-PD e para ambos tratamentos com TCA, respectivamente. Os erros médios absolutos variaram de 2,4 mm a 7,6 mm, nos tratamentos TENS-PD e TCA-PD, respectivamente, evidenciando que houve somente influência do monitoramento da irrigação.

As estimativas do armazenamento de água pelo modelo, quando comparadas as observações a campo, foram subestimadas em todos os tratamentos. A simulação dos tratamentos monitorados por tensiometria resultaram em armazenamento médio de 104,3 mm, enquanto no campo foi observado o armazenamento de 107,4 mm, o que representa uma variação de 2,65%. Para os tratamentos com TCA, a estimativa foi de 105,03 mm e o observado de 113,2 mm, uma diferença de 4,77%.

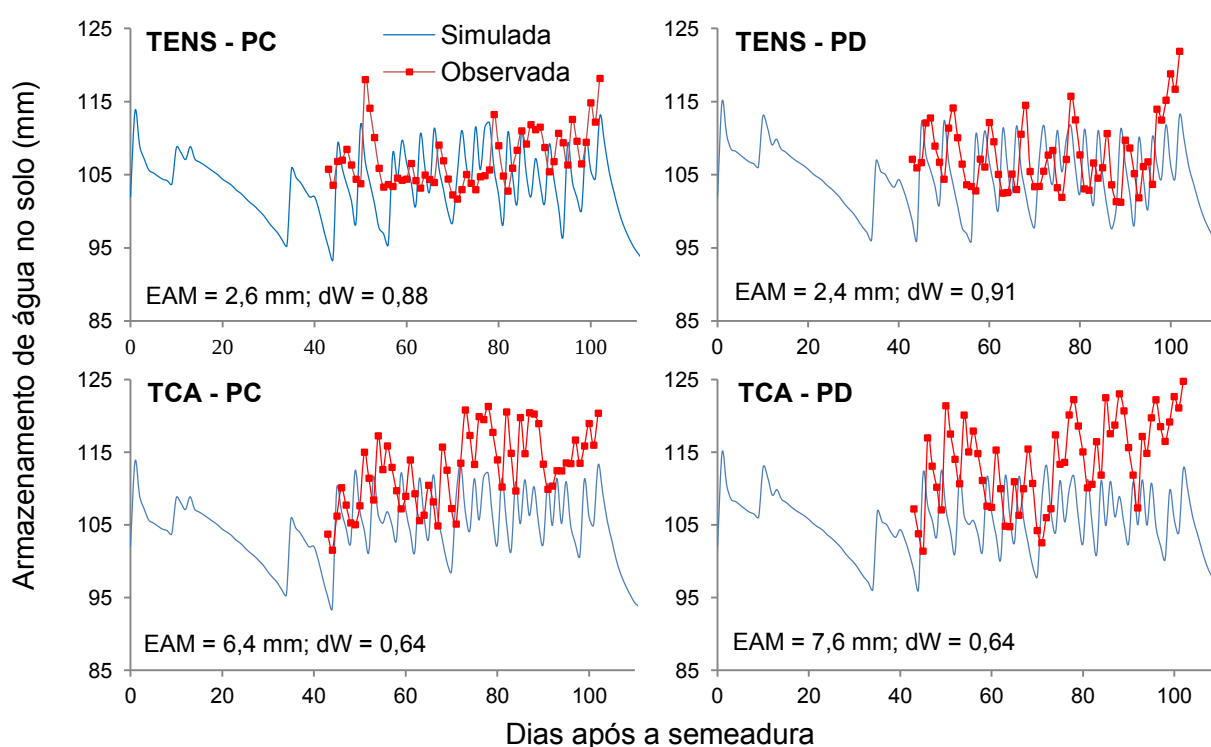


Figura 10. Variação do armazenamento de água pelo solo no perfil de 0-40 cm, observadas e simuladas pelo modelo CROGRO.

O monitoramento de irrigação por TCA, tanto para PC quanto para PD, resultou, no geral, em maiores armazenamentos de água no solo, em relação ao monitoramento pelo TENS (PC e PD). Isso evidencia que as plantas de feijoeiro que

se desenvolveram com o monitoramento de irrigação por meio do TCA, estiveram sujeitas a maior disponibilidade hídrica em relação às submetidas ao monitoramento por TENS, entretanto, este último não proporcionou déficit hídrico às plantas. A diferenciação na disponibilidade hídrica no solo entre os monitoramentos, foi traduzida no índice de área foliar, na produção de matéria seca e na produtividade de grãos, apesar de ocorrer em pequena escala (Figuras 7 e 8, Tabela 5).

Lopes et al. (2011), avaliando a influencia do monitoramento da irrigação sobre o feijoeiro comum, concluíram que o monitoramento de irrigação pelo TCA, proporciona maiores valores de produtividade de grãos em relação ao manejo por tensiometria. Cunha et al. (2013), estudando formas de monitoramento da irrigação do feijoeiro cultivado no sistema de integração lavoura-pecuária, observaram que o monitoramento de irrigação pela tensiometria reduz as lâminas de água em até 40%, causando reduções na produtividade da cultura. Diferentemente, resultados encontrados por Pavani et al. (2008), evidenciam economia de 15% na demanda de água pela cultura, sem diminuição na produtividade. Os autores ainda relatam que o monitoramento da irrigação pelo TENS provoca maior variação de água no solo, quando comparado ao TCA.

Os resultados das simulações dos tratamentos mostram que os sistemas de cultivo tiveram pouca influência sobre o crescimento e a produtividade do feijoeiro, indicando que ocorreu adequada disponibilidade de água durante o ciclo da cultura. Ainda assim, observa-se um efeito positivo da cobertura do solo na eficiência no uso de água pela cultura, no sistema plantio direto. Resultados semelhantes encontraram Ferreira et al. (2011), que ao avaliarem o efeito de sistemas de cultivo na produtividade do feijoeiro comum, observaram aumento na produtividade da cultura sob sistema plantio direto. Bizari et al. (2009), estudando o coeficientes de cultura (K_c) e a produtividade do feijoeiro, em função de sistemas de cultivo, concluíram que sob PD o feijoeiro é mais eficiente no uso da água, quando comparado ao PC.

Num estudo realizado por Dalmago et al. (2010), com o objetivo de avaliar o efeito do sistema de cultivo na evaporação de água do solo, concluíram que sob PC a perda de água para a atmosfera é mais acentuada em comparação ao PD. Stone & Moreira (2006), avaliando o efeito das palhadas de diversas culturas na perda de

água do feijoeiro irrigado, concluíram que a evapotranspiração cultura é dependente da quantidade de biomassa das culturas de cobertura, que resultam em maior ou menor percentual de cobertura morta sobre o solo.

Apesar das discrepâncias entre estimativas e os valores observados no campo, os resultados indicam que o modelo CROPGRO é adequado para estimativas da fenologia, produção e balanço de água no solo na cultura do feijoeiro, sob regimes hídricos e quantidade de cobertura sobre o solo. Isto habilita a utilização do modelo, alimentado com os coeficientes genéticos da cultivar IAC-Carioca, para na estimativa da produtividade e componentes do balanço hídrico em simulações de longo período, a fim de estimar riscos da cultura em relação às variáveis climáticas, bem como avaliar a viabilidade econômica da cultura sob irrigação e sequeiro.

4.3 Aplicações do modelo

Evidenciada a capacidade do modelo CROPGRO em simular o crescimento e o balanço hídrico da cultura do feijoeiro, o mesmo pode ser utilizado para a estimativa de outras variáveis, dentre eles, os componentes hidrológicos do balanço hídrico (Tabela 6).

Tabela 6. Precipitação e irrigação ocorridas durante o ciclo de cultivo do feijoeiro e, componentes hidrológicos do balanço de água no solo (mm) simulados pelo modelo CROPGRO durante o ciclo da cultura em 2003, em Jaboticabal, SP.

Tratamentos	P	I	ET ₀	ΔA	ET _r	D	Es
TENS - PC	82	254	393	4	327	7	0
TENS - PD	82	287	384	10	300	61	0
TCA - PC	82	330	394	4	328	81	0
TCA - PD	82	330	384	9	300	104	0

P – precipitação; I – irrigação; ET₀ – evapotranspiração potencial da cultura; ΔA – Água extraída; ET_r – evapotranspiração real da cultura; D – drenagem; Es – escoamento superficial.

As estimativas de evapotranspiração real variaram de 300 mm no PD a cerca 328 mm no PC, independentemente do método de monitoramento da irrigação. A drenagem acumulada durante os cultivos variou de 7 mm para tratamento TENS-PC a 104 mm para TCA-PD, sendo provocada pela diferença no fornecimento de água a cultura entre os métodos de monitoramento. O armazenamento inicial de água no solo se manteve positivo, principalmente sob PD, evidenciando a menor perda de água nesse sistema de plantio, em função da maior retenção de água no perfil do solo.

Como esperado, as estimativas de evaporação de água na superfície do solo (E) para os tratamentos sob PC foram mais acentuadas, respondendo por 38% das perdas de água por evapotranspiração, enquanto sob PD, esse componente foi responsável por 20% da perda de água (Tabela 7). Desse modo, apesar da evapotranspiração estimada para os tratamentos serem próximas, sob PD as plantas transpiraram mais, influenciando positivamente o desenvolvimento da cultura.

Tabela 7. Simulação da evapotranspiração do feijoeiro e seus componentes, pelo modelo CROPGRO cultivado em Jaboticabal, SP.

Tratamentos	ETr	Componentes da ETr		
		T	E	Ec
TENS - PC	327	201	124	2
TENS - PD	300	225	61	14
TCA - PC	328	200	126	2
TCA - PD	300	225	61	14

ETr – evapotranspiração real da cultura; T – transpiração; E – evaporação do solo; Ec – evaporação da cobertura;

A evaporação de água diretamente da cobertura morta sobre o solo foi maior no PD, em função da adsorção de parte dessa pela palhada, que posteriormente, é facilmente perdida para a atmosfera (Tabela 7 e Figura 10). Entretanto, esse volume não correspondeu a 1% da evapotranspiração, em ambos os sistemas plantio, mostrando que a cobertura morta sobre o solo não foi capaz de produzir os efeitos esperados para o plantio direto.

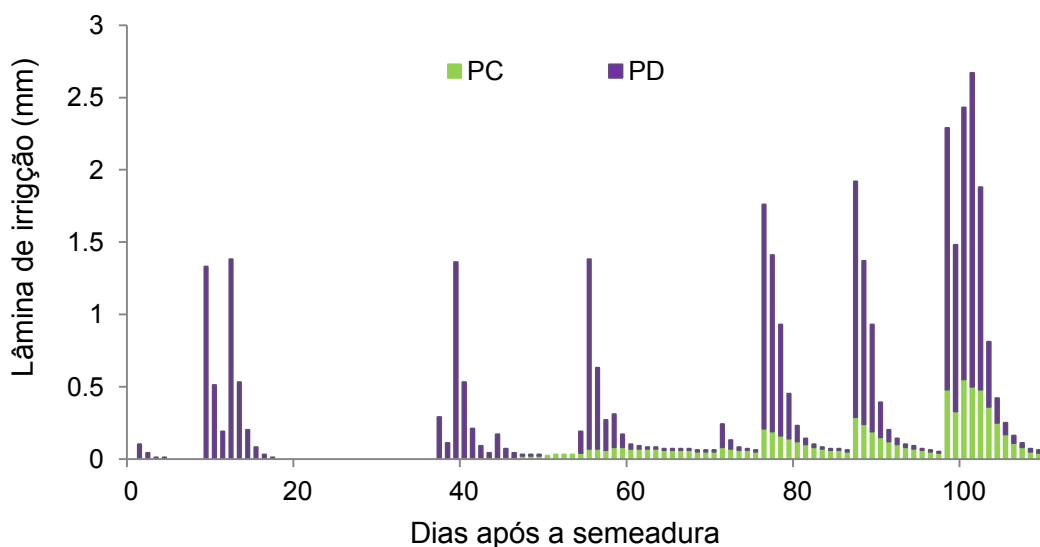


Figura 11. Lâmina de água adsorvida pela palhada do solo sob sistema plantio direto e convencional, simulada pelo modelo CROPGRO.

As estimativas geradas pelo modelo corroboram com estudos realizados experimentalmente, que evidenciam que a eficiência do uso da água pelo feijoeiro está diretamente relacionada à utilização práticas que reduzam o as perdas de água, como a adoção do monitoramento correto da irrigação, além de estratégias que favoreçam o armazenamento de água no solo, através da diminuição da evaporação e aumento da infiltração da água no solo (BERNARDES et al., 2010; PAVANI et al., 2008; CUNHA et al., 2013; LOPES et al., 2011).

5 CONCLUSÕES

- Os coeficientes genéticos requeridos pelo modelo CROPGRO foram calibrados para a cultivar IAC-Carioca em experimentos de campo.
- O modelo calibrado simulou satisfatoriamente a fenologia e o crescimento de área foliar e massa seca, e produtividade de grãos, durante as fases de calibração e teste, sob sistema plantio direto e convencional combinados com monitoramentos de irrigação por tensiômetro e tanque classe A.
- As simulações de umidade no perfil do solo concordaram com as medidas obtidas no campo, em ambos sistemas de cultivos e métodos de monitoramento.

REFERÊNCIAS

- ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 3, p. 519-531, 2004.
- AMBROSANO, E.J.; WUTKE, E.B.; BULISANI, E.A.; CANTARELLA, H. Feijão. In: VANRAIJ, B., CANTARELLA, H., QUAGGIO, J.A., FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. 2 ed. Campinas: IAC, 1996. p.194- 195.
- ANDRADE, M. J. B.; CARVALHO, A. J.; VIEIRA, N. M. B. Exigências edafoclimáticas. In: VIEIRA, C.; PAULA JUNIOR, T. J.; BORÉM, A. **Feijão**. 2. ed. Viçosa: UFV, 2006, p. 115-142.
- BALBINOT JUNIOR, A. A.; VEIGA, M. da; VOGT, G. A.; SPAGNOLLO, E. Atributos de solo e produtividade de feijão após diferentes formas de uso do solo no inverno, no quinto ano de experimentação. **Ciência Rural**, v. 42, n. 3, p. 401-406, 2012.
- BERNARDES, TATIELY GOMES; SILVEIRA, PM da; MESQUITA, MARCOS ANTÔNIO MACHADO. Produtividade do feijoeiro irrigado devido a reguladores de crescimento e culturas antecessoras de cobertura. **Bragantia**, v. 69, n. 2, p. 371-375, 2010.
- BIZARI, D. R.; MATSURA, E. E.; ROQUE, M. W.; SOUZA, A. L. de. Consumo de água e produção de grãos do feijoeiro irrigado em sistemas plantio direto e convencional. **Ciência Rural**, v.39, n.7, p. 2073-2079, 2009.
- BOOTE, K. J.; JONES, J. W.; HOOGENBOOM, G.; PICKERING, N. B. The CROPGRO model for grain legumes. In: TSUJI, G. Y.; HOOGENBOOM, G.; THORNTON, P. K. (Ed.). **Understanding options for agricultural production**. Dordrecht: Kluwer, 1998. p. 99-128.
- BOOTE, K. J.; SAL, F.; HOOGENBOOM, G.; JONES, J. W. Experience with water balance, evapotranspiration, and predictions of water stress effects in the CROPGRO model. **Response of Crops to Limited Water: Understanding and Modeling Water Stress Effects on Plant Growth Processes**, n. responseofcrops, p. 59-103, 2008.

COLLARES, G. L.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Compactação de um latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 3, p. 933-942, 2008.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento safra brasileira grãos – Safra 2013/14**. Décimo Primeiro Levantamento. Brasília, 2014, v. 1, n. 11, p. 1-82, 2014.

COSTA, D. M. A. da; MELO, H. N. de. S.; FERREIRA, S. R. Eficiência da cobertura morta na retenção de umidade no solo. **Holos**, v. 23, p. 59-69, 2007.

CUNHA, P. C. R. da; SILVEIRA, P. M. da; NASCIMENTO, J. L. do; ALVES JÚNIOR, J. Manejo da irrigação no feijoeiro cultivado em plantio direto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 7, p. 735-742, 2013.

DALLACORT, R.; FREITAS, P. S. L. de; FARIA, R. T. de; GONÇALVES, A. C. A.; JÁCOME, G. A.; REZENDE, R. Soil water balance simulated by CROPGRO-Drybean model for edaphoclimatic conditions in Maringá. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**, v. 14, n. 4, p. 351–357, 2010.

DALLACORT, R.; FREITAS, P. S. L. de; FARIA, R. T.; GONCALVES, A. C. A.; REZENDE, R.; GUIMARÃES, R. M. L. Simulation of bean crop growth, evapotranspiration and yield in Paraná State by the CROPGRO-Dry bean model. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 33, n. 3, p. 429-436, 2011.

DALMAGO, G. A.; BERGAMASCHI, H.; BERGONCI, J. I.; KRÜGER, C. A. M. B.; COMIRAN, F.; HECKLER, B. M. M. Retenção e disponibilidade de água às plantas, em solo sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, p. 855-864, 2009.

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

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília, 2013. 353 p.

ESTAÇÃO AGROCLIMATOLÓGICA. **Normais Climatológicas FCAV/UNESP**. Disponível em: <http://www.fcav.unesp.br/#!/estacao-agroclimatologica/dados/estacao-convencional/>, acesso em 23 de setembro de 2014.

FARIA, R. T.; BOWEN, W. T. Evaluation of DSSAT soil-water balance module under cropped and bare soil conditions. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 46, n. 4, p. 489-498, 2003.

FARIA, R. T.; OLIVEIRA, D.; HOOGENBOOM, G. Drybeans development and yield simulation by CROPGRO. **Annual Report of the Bean Improvement Cooperative, Michigan State University**, v. 45, n.1, p. 132-133, 2002.

FARIA, R. T.; MADRAMOOTOO, C. A.; BOISVERT, J.; PRASHER, S.O. A Comparison of the performance of SWACROP and the versatile soil moisture budget models in Brazil. **Canadian Agricultural Engineering**, n. 36, p. 1-12, 1994.

FARIA, R. T.; MADRAMOOTOO, C. A. Simulation of soil moisture profiles for wheat Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 31, n. 1, p. 35-49, 1996.

FEBRAPDP. FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTIO DIRETO NA PALHA. **Evolução da área cultivada no sistema de plantio direto na palha – Brasil**. Disponível em: http://www.febiapdp.org.br/download/PD_Brasil_2013.I.pdf, acesso em 17 de janeiro de 2015.

FERREIRA, E. P. de B.; STONE, L. F.; PARTELLI, F. L.; DIDONET, A. D. Produtividade do feijoeiro comum influenciada por plantas de cobertura e sistemas de manejo do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 7, p. 695-701, 2011.

FIQUEIREDO, F. P.; SOARES, A. A. COSTA, L.C.; RAMOS, M. M.; OLIVEIRA, F. G. Análise comparativa das estimativas da evapotranspiração de referência, pelos métodos de Penman-monteith e tanque Classe “A”, nas condições edafoclimáticas do Norte de Minas Gerais. **Unimontes Científica**, v. 4, n. 2, p. 135-142, 2002.

FIGUEIREDO, C. C.; RAMOS, M. L. G.; TOSTES, R. Propriedades físicas e matéria orgânica de um latossolo vermelho sob sistemas de manejo e cerrado nativo. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 24, n. 3, p. 24-30, 2008.

FILGUEIRA, F. A. R. **Novo Manual de Olericultura**: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças. Viçosa: UFV, 2008. 421 p.

GAVA, R.; FARIA, R. T.; FREITAS, P. S. L.; LENA, B. P. Retenção de umidade pela cobertura morta em sistema de plantio direto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 38., 2009, Juazeiro e Petrolina. **Anais ...** Jaboticabal: Associação Brasileira de Engenharia Agrícola, 2009. 1. CD-ROM.

GAVA, R.; FREITAS, P. S. L. de; FARIA, R. T. de; REZENDE, R.; FRIZZONE, J. A. Soil water evaporation under densities of coverage with vegetable residue. **Engenharia Agrícola**, v. 33, n. 1, p. 89-98, 2013.

GUIMARÃES, C. M.; STONE, L. F.; DEL PELOSO, M. J.; OLIVEIRA, J. P. de. Genótipos de feijoeiro comum sob deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 7, p. 649-656, 2011.

HICKMANN, C.; COSTA, L. M. da. Estoque de carbono no solo e agregados em Argissolo sob diferentes manejos de longa duração. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 10, p. 1055-1061, 2012.

HOOGENBOOM, G. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 103, n. 1, p. 137–157, 2000.

HOOGENBOOM, G., J.W. JONES, P.W. WILKENS, C.H. PORTER, K.J. BOOTE, L.A. HUNT, U. SINGH, J.L. LIZASO, J.W. WHITE, O. URYASEV, F.S. ROYCE, R. OGOSHI, A.J. GIJSMAN, G.Y. TSUJI, AND J. KOO. **Decision support system for agrotechnology transfer**: version 4.5. Honolulu: University of Hawaii, 2012. [CD-ROM].

IBSNAT. International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer – project 1989. Documentantion for IBSNAT Crop Models Input & Output Files Version 1.1: for the decision support system for agrotechnology transfer (DSSAT V. 2.1). IBSNAT project. Honolulu: University of Hawaii, 1989. 61p.

JONES, J.W.; HOOGENBOOMB, G.; PORTER, C.H.; BOOTE, K.J.; BATCHELOR, W.D.; HUNT, L. A.; WILKENS, P. W.; SINGHE, U.; GIJSMANA, A. J.; RITCHIE, J.T. The DSSAT cropping system model. **European Journal Agronomy**, v. 18, n. 3, p. 235-265, 2003.

JULIANO GOMES DE ANDRADE, J. G. de. Perdas de água por evaporação de um Solo cultivado com milho nos sistemas de Plantio direto e convencional. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

KLAR, A. E., FERNANDES M. A. Water needs for winter bean crop. **Scientia Agricola** v. 54, n. 3, p. 133-138, 1997.

LI-COR. LAI-2000: Plant Canopy Analyzer. **Instruction Manual**. 1992. 172p.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: Edusp, 2005, 335p.

LOPES, A. da S. **Manejo do solo e da irrigação da cultura do feijoeiro sob pivô central**. 2006. 141 f. Tese (Doutorado em Agronomia-Produção Vegetal) – Faculdade de Ciências Agrária e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2006.

LOPES, A. S.; OLIVEIRA, G. Q.; SOUTO FILHO, S. N.; GOES, R. J.; CAMACHO, M. A. Manejo de irrigação e nitrogênio no feijoeiro comum cultivado em sistema plantio direto. **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, n. 1, p. 51-56, 2011.

LOPES, A. S.; PAVANI, L. C.; CORA, J. E.; ZANINI, J. R.; MIRANDA, H. A. Manejo da irrigação (tensiometria e balanço hídrico climatológico) para a cultura do feijoeiro em sistemas de cultivo direto e convencional. **Engenharia Agrícola**, v. 24, n. 1, p. 89-100, 2004.

LORENÇONI, R.; DOURADO NETO, D.; HEINEMANN, A. B. Calibração e avaliação do modelo ORYZA-APSIM para o arroz de terras altas no Brasil. **Revista Ciência Agronômica**, v. 41, n. 4, p. 605-613, 2010.

MARIN, F. R.; JONES, J. W.; ROYCE, F.; SUGUITANI, C.; DONZELI, J. L.; WANDER FILHO, J. P.; NASSIF, D. S. Parameterization and evaluation of predictions of DSSAT/CANEGRO for Brazilian sugarcane. **Agronomy Journal**, v. 103, n. 2, p. 304-315, 2011.

MEIRELES, E. J. L.; PEREIRA, A. P.; SENTELHAS, P. C.; STONE, L. F.; ZIMMERMANN, F. J. P. Calibration and test of the cropgro-dry bean model for edaphoclimatic conditions in 402 the savannas of central Brazil. **Scientia Agricola**, v. 59, n. 4, p. 723-729, 2002.

MELO JÚNIOR, H. B. de; CAMARGO, R. de; WENDLING, B. Sistema de plantio direto na conservação do solo e água e recuperação de áreas degradadas. **Enciclopédia Biosfera**, v. 7, n. 12, p. 1-17, 2011.

MORAES, W. B.; JESUS JUNIOR, WC.; MORAES, W. B.; CECÍLIO, R. A. Potenciais impactos das mudanças climáticas globais sobre a agricultura. **Revista Trópical – Ciências Agrárias e Biológicas**. v. 5, n. 2, p. 3-14, 2011.

NASCIMENTO, J. L.; STONE, L. F.; OLIVEIRA, L. F. C. Demanda total de água do feijoeiro nos sistemas de plantio convencional e direto. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 31, n. 2, p. 159-161, 2001.

NUNES, U. R.; ANDRADE JÚNIOR, V. C.; SILVA, E. de. B.; SANTOS, N. F.; COSTA, H. A. O.; FERREIRA, C. A. Produção de palhada de plantas de cobertura e rendimento do feijão em plantio direto. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 41, n. 6, p. 943-948, 2006.

OLIVEIRA, E. C. de; COSTA, J. M. N. da; PAULA JÚNIOR, T. J. de; FERREIRA, W. P. M.; JUSTINO, F. B.; NEVES, L. de O. The performance of the CROPGRO model for bean (*Phaseolus vulgaris* L.) yield simulation. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 34, n. 3, p. 239-246, 2012.

OLIVEIRA, M. A. A. de; CARVALHO, D. F. de. Estimativa da evapotranspiração de referência e da demanda suplementar de irrigação para o milho (*Zea mays* L.) em Seropédica e Campos, Estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 2, n. 2, p. 132-135, 1998.

PAVANI, L. C.; LOPES, A. S.; GALBEIRO, R. B. Manejo da irrigação na cultura do feijoeiro em sistemas plantio direto e convencional. **Engenharia Agrícola**, v. 28, n. 1, p. 12-21, 2008.

PEREIRA, R. A.; ALVES, P. L. C. da; CORRÊA, M. P.; DIAS, T. C. S. de. Influência da cobertura de aveia-preta e milheto sobre comunidade de plantas daninhas e produção de soja. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 6, n. 1, p. 1-10, 2011.

RITCHIE, J. T. Soil water balance and plant water stress. In: **Understanding options for agricultural production**. Springer Netherlands, 1998. p. 41-54.

ROCHA, O. C.; GUERRA, A. F.; AZEVEDO, H. M. Ajuste do modelo Christiansen-Hargreaves para estimativa da evapotranspiração do feijão no cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 2, p. 263-268, 2003.

SANTANA, M. J. *et al.* Viabilidade técnica e econômica da aplicação de água na cultura do feijoeiro comum (*Phaseolus Vulgaris* L.). **Ciência e Agrotecnologia**, v. 33, n. 2, p. 532-538, 2009.

SANTOS, T. E. M. dos; MONTENEGRO, A. A. A.; PEDROSA, E. M. R. Características hidráulicas e perdas de solo e água sob cultivo do feijoeiro no semi-árido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 3, p. 217–225, 2009.

SATO, J. H.; FIGUEIREDO, C. C. de; LEÃO, T. P.; RAMOS, M. L. G.; KATO, E. Matéria orgânica e infiltração da água em solo sob consórcio milho e forrageiras. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 2, p. 189–193, 2012.

SCHWARTZ, R. C.; BAUMHARDT, R. L.; EVETT, S. R. Tillage effects on soil water redistribution and bare soil evaporation throughout a season. **Soil and Tillage Research**, v. 110, n. 2, p. 221–229, 2010.

SILVA, F. A. M. da; PINTO, H. S.; SCOPEL, E.; CORBEELS, M.; AFFHOLDER, F. Dinâmica da água nas palhadas de milho, milheto e soja utilizadas em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 5, p. 717-724, 2006.

SILVA, J. C. da; HELDWEIN, A. B.; RADONS, S. Z.; MALDANER, I. C.; TRENTIN, G.; GRIMM, E. L. Necessidade de irrigação para o feijoeiro na região central do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 10, p. 1030–1036, 2011.

STONE, L. F.; MOREIRA, J. A. A. Efeitos de preparo do solo no uso da água e na produtividade do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, n. 4, p. 835-841, 2000.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. D.; MOREIRA, J. A. A.; BRAZ, A. J. B. P. Evapotranspiração do feijoeiro irrigado em plantio direto sobre diferentes palhadas de culturas de cobertura. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 4, p. 577-582, 2006.

SYPERRECK, V. L. G.; ELCIO SILVÉRIO KLOSOWSKI, E. S.; GRECO, M.; FURLANETTO, C. Avaliação de desempenho de métodos para estimativas de evapotranspiração de referência para a região de Palotina, Estado do Paraná. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 30, p. 603-609, 2008.

THORP, K.R.; WHITEA, J.W.; PORTER, C.H.; HOOGENBOOM, G.; NEARING, G.S.; FRENCH, A.N. Methodology to evaluate the performance of simulation models for alternative compiler and operating system configurations. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.81, p. 62-71, 2012.

TIMSINA, J.; BOOTE, K. J.; DUFFIELD, S. Evaluating the CROPGRO Soybean Model for Predicting Impacts of Insect Defoliation and Depodding. **Agronomy Journal**, v. 99, n. 1, p.148-157, 2007.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of insaturated soils. **Soil Science Society of American Journal**, v. 41, n. 5, p. 892-898, 1980.

WILLMOTT, C. J.; AKLESON, G. S.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; EGA ES, D. R.; 'D NN E , J.; R WE, C. M. Statistic for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, v. 90, n. 5, p. 8 995-9005, 1985.

WINCK, B. R.; VEZZANI, F. M.; DIECKOW, J.; FAVARETTO, N.; MOLIN, R. Carbono e nitrogênio nas frações granulométricas da matéria orgânica do solo, em sistemas de culturas sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 3, p. 980-989, 2014.