**MANEJO DE IRRIGAÇÃO UTILIZANDO MODELOS DE SIMULAÇÃO DE
CRESCIMENTO DE CULTURAS CROPGRO E CERES**

ALEXANDRE BRYAN HEINEMANN

Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. **JOSÉ ANTÔNIO FRIZZONE**

Co-orientador: Dr. **ROGÉRIO TEIXEIRA DE FARIA**

Tese apresentada à Escola Superior de
Agricultura “Luiz de Queiroz”,
Universidade de São Paulo, para
obtenção do título de Doutor em
Agronomia, Área de Concentração:
Irrigação e Drenagem.

Piracicaba

Estado de São Paulo – Brasil

Fevereiro de 2001

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - Campus "Luiz de Queiroz"/USP

Heinemann, Alexandre Bryan

Manejo de irrigação utilizando modelos de simulação de crescimento de culturas
CROPGRO e CERES / Alexandre Bryan Heinemann. - - Piracicaba, 2001.
67 p.

Tese (doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2001.
Bibliografia.

1. Análise espacial 2. Balanço hídrico 3. Cultura agrícola 4. Irrigação por pivô central
5. Modelo matemático 6. SIG (Sistema de computador) 7. Simulação

CDD 631.7

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

À minha esposa, Giovana,

DEDICO

Aos meus pais, Tomas e Maria Ângela,

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. José Antônio Frizzzone (ESALQ/USP), pela orientação.

Ao Dr. Rogério Teixeira de Faria (IAPAR), pela orientação.

Ao Dr. Gerrit Hoogenboom (UGA), pela orientação.

Ao Prof. Dr. Marcos Vinícius Folegatti (ESALQ/USP), pelo apoio.

Ao Curso de Pós-Graduação em Irrigação e Drenagem, ao Departamento de Engenharia Rural e à Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, pela infraestrutura fornecida.

Ao “Department of Biological and Agricultural Engineering, The University of Georgia, Griffin Campus, USA”, pela infraestrutura fornecida.

À CAPES pela bolsa de estudos para a realização do Doutorado e bolsa sanduíche.

Aos professores e funcionários, pela ajuda e serviços prestados.

Aos amigos do curso de Pós-Graduação.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	v
SUMMARY.....	vii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	2
3 OTIMIZAÇÃO DO MANEJO DE UM SISTEMA DE IRRIGAÇÃO PIVÔ CENTRAL PARA FEIJÃO (<i>PHASEOLUS VULGARIS</i> L.) EM REGIÃO ÚMIDA.....	6
Resumo	6
Summary	7
3.1 Introdução	8
3.2 Material e Métodos	10
3.3 Resultados e Discussão	20
3.4 Conclusões	28
4 DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS NECESSIDADES HÍDRICAS DAS CULTURAS DO FEIJÃO, DO MILHO E DA SOJA UTILIZANDO-SE MODELOS DE CRESCIMENTO DE CULTURAS E SIG: UM EXEMPLO PARA O ESTADO DO PARANÁ.....	29
Resumo	29
Summary	30
4.1 Introdução	31
4.2 Material e Métodos	33
4.3 Resultados e Discussão	46
4.4 Conclusões	56
5 CONCLUSÕES	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

MANEJO DE IRRIGAÇÃO UTILIZANDO MODELOS DE SIMULAÇÃO DE CRESCIMENTO DE CULTURAS CROPGRO E CERES

Autor: ALEXANDRE BRYAN HEINEMANN

Orientador: Prof. Dr. JOSÉ ANTÔNIO FRIZZONE

Co-orientador: Dr. ROGÉRIO TEIXEIRA DE FARIA

RESUMO

Modelos de simulação de crescimento de culturas foram utilizados para avaliar o manejo de irrigação em duas situações. No primeiro caso, utilizou-se o modelo CROPGRO-Feijão para otimizar o manejo de um sistema de irrigação do tipo pivô central. O modelo CROPGRO foi modificado visando fornecer aos irrigantes informações para tomadas de decisões que simulem as situações práticas do manejo de irrigação em sistemas pivô central. No modelo modificado, considerou-se o número de dias em que o pivô central requer para completar uma revolução. Sistemas de irrigação pivô central, com três capacidades de aplicação de água foram avaliados para diferentes manejos de irrigação, sob o cultivo de feijão, no estado do Paraná, considerando-se a renda líquida como função objetivo. O manejo de irrigação que resultou na maior renda líquida foi o de irrigar toda a área em apenas um dia, quando a umidade nos primeiros 30cm do perfil do solo foi de 70 a 80% da capacidade de água disponível (CAD) no solo. O sistema de irrigação que apresentou a maior renda líquida foi o de capacidade de aplicação de lâmina de 6mm dia⁻¹. No segundo caso, modelos de simulações de crescimento de culturas (CROPGRO e CERES) foram combinados com um sistema de informação geográfica (AEGIS/WIN) para se determinar as necessidades hídricas das culturas do feijão, da soja e do milho, a vazão de irrigação, o nitrogênio lixiviado e o escoamento superficial anual, nos municípios compreendidos na bacia do Rio Tibagi,

Paraná. Os resultados estimados foram analisados utilizando-se métodos de análise espacial e representados em mapas temáticos para relacionar essas informações com o manejo de irrigação e planejamento. As quantidades máximas anuais de água utilizada para irrigação, de escoamento superficial e de nitrogênio lixiviado foram, respectivamente, $22.969\text{m}^3 \text{ ano}^{-1}$, $31.152\text{m}^3 \text{ ano}^{-1}$ e 1.488t ano^{-1} , para o município de Reserva, localizado na bacia do Rio Tibagi.

IRRIGATION MANAGEMENT USING SIMULATIONS CROP MODELS CROPGRO AND CERES

Author: ALEXANDRE BRYAN HEINEMANN
Adviser: Prof. Dr. JOSÉ ANTÔNIO FRIZZONE
Co-adviser: Dr. ROGÉRIO TEIXEIRA DE FARIA

SUMMARY

Two applications of simulation crop models in irrigation management were evaluated. In the first evaluation, the codes in the CROPGRO model were changed to allow the model giving practical information on management of center pivot irrigation systems. The modified model takes into account the number of days that a center pivot requires to complete one revolution. Different water management regimes for center pivot systems at three different capacities of water application were evaluated for dry bean in the State of Paraná, using net return as an objective criterion. The management regimes consisted of six different irrigation thresholds, ranging from 40 to 90% of the remaining available soil water content, using three different commodity prices to calculate net returns. The center pivot system that showed the highest net return was the system with application capacity of 6mm day^{-1} . The irrigation management regime that resulted the highest net return was the one irrigating the entire field in one day, when the soil moisture in the top 30cm of the profile dropped below 70 to 80% of available soil water. In the second evaluation, crop models (CROPGRO and CERES) were coupled with a Geographic Information System (AEGIS/WIN) to determine irrigation requirements, annual runoff and annual nitrogen leaching for beans, soybeans and maize in the Tibagi River basin in the State of Paraná, Brazil. The model results were analyzed using spatial analysis methods and displayed by thematic maps to relate this information

with irrigation management and planning. The maximum annual irrigation withdrawal, runoff and nitrogen leaching were, respectively, $22.969\text{m}^3 \text{ year}^{-1}$, $31.152\text{m}^3 \text{ year}^{-1}$ and $1.488\text{ton year}^{-1}$, in the Tibagi River Basin.

1 INTRODUÇÃO

Os modelos de simulação de crescimento de culturas vêm sendo amplamente utilizados em pesquisa agropecuária por possibilitarem uma avaliação a longo prazo do impacto de uma determinada intervenção no sistema de produção agrícola, por oferecerem recursos para análise de risco de estratégias de manejos que facilitem aos tomadores de decisão a compreensão das complexas interações ambientais envolvidas nos sistemas de produção e por proporcionarem respostas rápidas e mais econômicas em relação aos experimentos de campo. Em diversos países, esses modelos são utilizados como ferramentas para pesquisa, para tomadas de decisão e para treinamento e transferência de tecnologia.

O primeiro objetivo deste trabalho foi determinar estratégias de irrigação que otimizem a renda líquida do feijão irrigado, em Londrina, Paraná, utilizando-se o modelo CROPGRO modificado pela inclusão de uma rotina que considera o tempo de rotação do sistema pivô central. O segundo objetivo foi determinar as necessidades hídricas das culturas do feijão, da soja e do milho, o nitrogênio lixiviado e o escoamento superficial anual para os municípios compreendidos na bacia do Rio Tibagi, Paraná. Para isso, combinou-se os modelos CROPGRO e CERES ao sistema de informação geográfica denominado “Agricultural and Environmental Geographic Information System for Windows” (AEGIS/WIN).

2 REVISÃO DE LITERATURA

Modelos de simulação de crescimento de culturas

Segundo Sinclair e Seligman (1996), os modelos de simulação de crescimento de culturas consistem da “simulação dinâmica do crescimento de uma determinada cultura utilizando-se integração numérica de seus processos com a ajuda da computação”. Mais especificamente, isso implica em um programa computacional no qual se reproduzem e se descrevem os processos dinâmicos de crescimento de uma determinada cultura em relação ao ambiente e às práticas culturais, com capacidade de fornecer variáveis que estabeleçam o diagnóstico do estado da cultura (biomassa por unidade de área, estágio de desenvolvimento, rendimento, balanço de nitrogênio e carbono, etc.) em determinadas épocas do ciclo da mesma (Matthews et al., 2000).

Em consequência da grande variedade de modelos existentes, os mesmos foram classificados em dois grupos, conforme sua aplicação final por usuários (Passioura, 1996): a) modelos científicos, ou seja, aqueles que auxiliam no entendimento dos processos fisiológicos e interações ocorridas entre o sistema planta-solo-atmosfera, e b) modelos de engenharia, que aplicam a ciência para resolver um determinado problema, por exemplo, manejo de irrigação e otimização do uso de nitrogênio. Matthews et al. (2000) ampliou essa classificação e dividiu as aplicações dos modelos em três grupos: a) utilizados para pesquisa, b) utilizados para tomadas de decisão, e c) utilizados como ferramenta para transferência de tecnologia, treinamento e educação.

Sinclair e Seligman (1996) e Matthews et al. (2000) realizaram uma excelente revisão sobre o desenvolvimento dos modelos de simulação para crescimento de culturas. A história dos modelos, quanto ao seu desenvolvimento, pode ser dividida em quatro diferentes fases: infância, juventude, adolescência e maturidade.

A fase da infância começou com o surgimento dos modelos de crescimento de culturas despertada pelo desenvolvimento do primeiro computador “mainframe” nos anos 60 (Bouman et al., 1996). Os primeiros modelos foram desenvolvidos para estimar a interceptação de luz e a fotossíntese pelo dossel das culturas (de Wit, 1970). Esses modelos eram simples, porém possibilitaram estimar quantitativamente as taxas de crescimento de várias culturas.

A fase da juventude ocorreu nos anos 70, com o avanço dos equipamentos utilizados nos experimentos de campo, que forneceram bases para descrever os vários processos fisiológicos e suas interações, que foram incorporados nos modelos aumentando a sua complexidade. O número de parâmetros necessário para executar o modelo aumentou drasticamente.

A fase da adolescência começou no início dos anos 80, quando houve uma reavaliação dos conceitos básicos dos modelos de crescimento de culturas. Nessa reavaliação assumiu-se que uma redução na complexidade dos modelos conduziria a um melhor desempenho dos mesmos. Utilizando-se somente parâmetros considerados “chave”, poderia se obter respostas para grande parte das variações de um sistema. Isso conduziu ao surgimento de versões simplificadas de modelos, denominados “summary models” (Penning de Vries et al., 1989). Assumiu-se também que modelos universais poderiam ser desenvolvidos para cada cultura, com o objetivo de se solucionar determinado problema.

A fase da maturidade ocorreu nos anos 90, permitindo o aumento do conhecimento e uma melhor compreensão das limitações dos modelos de crescimento.

O Sistema de Suporte à Decisão (SSD) é definido como um sistema computacional que auxilia o usuário a resolver problemas complexos ou tomar decisões. Esse sistema fornece resultados quantitativos e qualitativos com ênfase no usuário final, responsável pela tomada de decisão (Matthews et al., 2000). Frequentemente, o SSD utiliza informações fornecidas por modelos de simulação de crescimento de culturas para efetuar as análises.

O “Decision Support System for Agrotechnology Transfer” (DSSAT) surgiu como um dos resultados do projeto “International Benchmark Sites Network for

Agrotenology Transfer” (IBSNAT). Esse projeto tinha como proposta fornecer uma ferramenta para os tomadores de decisão na área agrícola que pudesse ajudar na escolha de estratégias através dos resultados de simulações advindos de diferentes práticas agrícolas e/ou políticas agrícolas (Uehara e Tsuji, 1998).

O DSSAT é um sistema que facilita a aplicação de modelos de crescimento de culturas na pesquisa, educação, extensão e tomadas de decisões (Hoogenboom et al., 1999). Os dezessete modelos de simulação que fazem parte do sistema DSSAT são: a) CERES-genérico para o trigo, milho, arroz, sorgo, milheto e cevada (Ritchie et al., 1998), b) CROPGRO-genérico para soja, feijão, amendoim e grão-de-bico (Boote et al., 1998a), c) SUBSTOR para batata, d) CROPSIM para mandioca, e) OILCROP para girassol, f) CROPGRO para tomate, gramínea e culturas de outono, e g) CANEGRO para cana-de-açúcar.

Esses modelos simulam o desenvolvimento vegetativo e reprodutivo, como data de emergência, ocorrência da primeira folha, início do florescimento, início do crescimento da semente e a maturidade. Os modelos também simulam a fotossíntese, a respiração, a partição de nutrientes entre as partes da planta e a senescência.

O DSSAT usa um conjunto de arquivos de dados com formato padronizado (Jones et al., 1994), correspondentes às características de clima (ArquivoW), dados de solo (ArquivoS), detalhes experimentais (ArquivoX) e os dados observados (ArquivoA e ArquivoT). O arquivo de detalhes experimental é definido de maneira que o mesmo possa ser utilizado como um documento para armazenar dados experimentais e/ou por modeladores para avaliação e aplicação de modelos. Os modelos de crescimento possuem três diferentes arquivos de entrada para informações referentes aos coeficientes genéticos. O arquivo espécies, que contém respostas específicas de uma determinada cultura em relação às condições ambientais (ArquivoS); o arquivo ecotipo, que define os coeficientes genéticos das culturas para grupos de variedades que apresentam respostas similares ou possuem similares “backgrounds” genéticos (ArquivoE); e o arquivo cultivar, que define os coeficientes genéticos para uma única variedade, como o número de dias entre a data de plantio e o florescimento ou maturidade fisiológica sobre

condições “ótimas” de crescimento (ArquivoC). O número de coeficientes varia entre os modelos, sendo o menor número 6 e o maior 15 (Hoogenboom, 2000).

O DSSAT inclui três diferentes tipos de programas de aplicação: análise sazonal, análise seqüencial e análise espacial. Na análise sazonal, diferentes estratégias de manejo são avaliadas para uma determinada época do ano, porém repetidas para vários anos utilizando-se dados climáticos históricos ou geradores de dados climáticos (Thornton e Hoogenboom, 1994). Na análise seqüencial, diferentes rotações de culturas são avaliadas através de diversos anos. Nesse caso, o modelo é executado seqüencialmente, ou seja, o resultado da primeira simulação é usado para definir os dados de entrada para a simulação seguinte (Thornton et al., 1995). Na análise espacial, há possibilidade de unir modelos de crescimento do DSSAT e sistema de informação geográfica (SIG), podendo analisar as variabilidades espaciais em uma determinada região (Thornton et al., 1997). Os programas de aplicação incluem ferramentas para executar os modelos e programas de análise para sumarizar os resultados gerados pelos modelos. Entre as variáveis que podem ser calculadas incluem a média, o desvio padrão, a variância, a distribuição cumulativa de probabilidades e outras, não somente para o rendimento, mas também para os componentes do mesmo. Há a possibilidade do cálculo de variáveis econômicas, como a renda líquida, levando-se em consideração os custos e os preços para um determinado manejo. Neste estudo foram utilizados os aplicativos sazonal e espacial do DSSAT.

3 OTIMIZAÇÃO DO MANEJO DE UM SISTEMA DE IRRIGAÇÃO PIVÔ CENTRAL PARA FEIJÃO (*PHASEOLUS VULGARIS* L.) EM REGIÃO ÚMIDA

Resumo

No plantio da primavera, períodos de seca podem ocasionar significativa redução nos rendimentos do feijão no Brasil. Porém, o uso de irrigação pode possibilitar a obtenção de produtividades elevadas e reduzir os riscos associados à variabilidade das condições climáticas. Sistemas de irrigação por pivô central são comumente utilizados na cultura do feijoeiro e são operados para completarem uma revolução em períodos de mais de um dia. No entanto, os modelos de simulação de crescimento de culturas assumem a irrigação de uma determinada área num mesmo dia. Este trabalho apresenta modificações realizadas no modelo de simulação de crescimento CROPGRO visando fornecer aos irrigantes informações para tomadas de decisões que simulem as situações práticas do manejo de irrigação. O modelo modificado considera o número de dias que o pivô central requer para completar uma revolução. Diferentes turnos de rega foram simulados adotando-se sistemas pivô central com diferentes capacidades de aplicação de água e os resultados foram avaliados para a cultura do feijão em função da renda líquida para o estado do Paraná. Os turnos de rega avaliados incluem a revolução do equipamento de irrigação em um, dois ou três dias. Foram aplicados seis diferentes níveis críticos de umidade do solo para determinar o momento de irrigação, variando-se de 40 a 90% da capacidade de água disponível (CAD) no solo. A capacidade do sistema de irrigação pivô central que maximizou a renda líquida foi a correspondente à aplicação de uma lâmina de 6mm dia⁻¹. O turno de rega que resultou na máxima renda líquida foi

irrigar a área em um dia quando o nível crítico de umidade do solo nos primeiros 30cm do perfil do solo foi de 70 a 80% da capacidade de água disponível no solo (CAD).

Palavras Chaves: Modelos de Crescimento, DSSAT, Irrigação e Feijão.

Summary

During the spring growing season, periods of drought can cause a significant reduction in dry bean yield in Brazil. Therefore, irrigation is applied to reduce the risks associated with the variability in weather conditions. The common irrigation system is a center pivot system. Irrigation managers usually operate a center pivot irrigation system in such a way that it requires more than one day to complete the irrigation of an entire field. In general, crop model simulations assume that irrigation of an entire field is completed in one day. This article presents modification made in the CROPGRO simulation model to provide irrigation managers with decision support information that is equivalent to their local conditions. The modified model takes into account the number of days that a center pivot irrigation system requires to complete one revolution. Different management regimes for three different water capacity center pivot systems were evaluated for dry bean as a function of net return for the State of Paraná. The management regimes that were evaluated included the completion of the center pivot revolution in either one, two or three days. Six different irrigation thresholds were applied, ranging from 40 to 90% of the remaining available soil water content, and three different commodity prices were analyzed. The center pivot system that showed the highest net return was the system that applied 6mm day^{-1} . The irrigation management regime that resulted in the highest net return was to irrigate the entire field in one day, when the soil water content in the top 30cm of the profile dropped below 70 to 80% of available soil water.

Key words: Crop Model, DSSAT, Irrigation and Dry bean.

3.1 Introdução

O Feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma das principais fontes de proteína cultivado em diversas regiões do mundo, entretanto, a produtividade é normalmente baixa devido ao estresse hídrico (Singh et al., 1991). Estima-se que ocorre estresse hídrico em 60% das áreas de produção de feijão na América Latina (Laing et al., 1984). No Brasil, o feijão é uma das culturas mais importantes, sendo o estado do Paraná um dos líderes na produção dessa leguminosa. Para a região de Londrina, que possui um clima subtropical úmido, a ocorrência de veranicos (curtos períodos de estresse hídrico) é um dos principais fatores que afeta o rendimento do feijão. Durante a primavera, veranicos são comuns e podem ocasionar severa redução no rendimento em sistemas de produção não irrigados (Caramori et al., 1987). Irrigações utilizando o sistema pivô central são aplicadas para aumentar a produtividade e reduzir a variação no rendimento. Nessa região, a maioria dos equipamentos de irrigação tipo pivô central é projetada com uma capacidade de aplicação variando de 5 a 7mm dia⁻¹, para uma área média irrigada de 60ha. Os irrigantes normalmente operam o sistema com períodos de revolução de mais de um dia.

Devido ao clima úmido, é comum que ocorra precipitação depois que parte da área tenha sido irrigada, ocorrendo variações espaciais de umidade no solo e, conseqüentemente, variações de disponibilidade de água na planta, mesmo que o solo na área seja homogêneo.

As decisões mais importantes a serem tomadas pelos irrigantes são: de quando irrigar e de quanto de água aplicar. Para essa definição, há que se considerar vários fatores no processo de tomada de decisão, para assegurar que o valor adicional da receita proporcionada pela mudança no manejo de irrigação seja maior que o custo da irrigação. Irrigações com datas fixas, baseadas nas condições climáticas médias, conduzem a um ineficiente uso da água devido à variabilidade temporal na quantidade e distribuição da precipitação (Smith et al., 1985; Villalobos e Fereres, 1989). Pela complexidade do processo de tomada de decisão, pesquisadores têm desenvolvido sistemas de suporte à decisão (SSD) com base em modelos computacionais. Esses sistemas podem fornecer

informações para as diversas opções de manejo, considerando-se as condições ambientais locais (Tsuji et al., 1998). Os SSD também possibilitam a compreensão científica das complexas interações ambientais que se apresentam aos tomadores de decisão. Frequentemente, informações de modelos de simulação são utilizadas como base para os SSD (Keating e Grace, 1997). Neste estudo foi utilizado o SSD “Decision Support System for Agrotechnology Transfer” (DSSAT). O DSSAT consiste de um conjunto de modelos de simulação de culturas que foram integrados em um único programa. Esse programa facilita a aplicação de modelos de simulação de culturas em pesquisas e tomadas de decisão (Jones et al., 1998; Tsuji et al., 1994). A grande vantagem do DSSAT tem sido na padronização e processamento dos dados de entrada e saída. O CROPGRO, um modelo genérico para leguminosas, foi utilizado neste estudo para estimar o rendimento do feijão e as quantidades de irrigação necessárias para determinadas condições edafoclimáticas.

Muitos pesquisadores têm usado os modelos de simulação do DSSAT para identificar cenários ótimos de irrigação para regiões úmidas. Boggess et al. (1983), utilizando o modelo SOYGRO v.4.2, estudaram estratégias de irrigação e o impacto dos resultados na renda líquida. As melhores estratégias de irrigação foram definidas em função da água disponível no solo, profundidade do manejo de irrigação e séries históricas de dados climáticos. Martin et al. (1985) avaliaram diferentes estratégias de irrigação para regiões úmidas utilizando o modelo CERES-maize. Boggess e Ritchie (1988) utilizaram os modelos CERES-maize e SOYGRO para identificar estratégias de irrigação e aplicaram dominância estocástica para avaliar os riscos associados às diferentes estratégias. Faria et al. (1997a), utilizando o modelo BEANGRO para feijão, identificaram as estratégias de irrigação que forneceram o máximo benefício econômico para a região de Londrina, Paraná. Determinaram que a estratégia ótima de irrigação é irrigar quando o nível de umidade crítica no solo for igual a 60% da CAD.

Em todos os trabalhos consultados na literatura, assumiu-se que a irrigação da área total era realizada em um dia. Entretanto, esta situação muitas vezes não ocorre em condições de lavoura, sendo necessário mais de um dia para irrigar toda a área.

O objetivo deste trabalho foi determinar estratégias de irrigação que otimizem a renda líquida do feijão irrigado, em Londrina, Paraná, utilizando-se o modelo CROPGRO modificado pela inclusão de uma rotina que considera o tempo de rotação do sistema pivô central.

3.2 Material e Métodos

Modelos de Crescimento de Culturas

CROPGRO é um modelo orientado a processo, desenvolvido para leguminosas, que simula o crescimento, o desenvolvimento vegetativo e os balanços de nitrogênio e água na cultura e no solo. A versão utilizada neste estudo (v3.5, 98.0) simula o rendimento para soja, feijão, amendoim e grão-de-bico (Boote et al., 1997; Boote et al., 1998b; Hoogenboom et al., 1999). O processo de desenvolvimento do modelo CROPGRO utiliza dados climáticos diários, exceto, para alguns processos como fotossíntese, em que o passo de cálculo é horário utilizando-se o modelo “leaf-hedgerow” (Boote et al., 1998a).

A performance do modelo BEANGRO para feijão, uma versão anterior ao modelo CROPGRO-Feijão, tem sido avaliada em diversas regiões do mundo. Os rendimentos simulados de feijão mostraram uma boa comparação com os dados observados para condições de estresse hídrico em regiões tropicais (White et al., 1995; Faria et al., 1997b). As variáveis de entrada e saída para os modelos BEANGRO e CROPGRO são idênticas, mudando-se somente a estrutura dos códigos dos modelos (Hoogenboom et al., 1992; Hoogenboom et al., 1994).

No modelo CROPGRO, o módulo de balanço hídrico no solo considera todos os processos que afetam diretamente o conteúdo de água do solo. Como outros modelos de simulação do DSSAT, o balanço hídrico é calculado com a mínima quantidade de dados de entrada (Ritchie, 1998). O balanço hídrico no solo é um modelo unidimensional e baseia-se em quatro equações para calcular as variações de

armazenamento de água (Hoogenboom et al., 1992; Jones e Ritchie, 1990). Essas variações podem ser descritas pela seguinte equação (1):

$$\Delta S = P + I - EP - ES - R - D \quad (1)$$

em que, ΔS representa a variação de armazenamento de água no solo, P e I são dados de entrada correspondentes à precipitação e à irrigação, EP e ES são dados de saída correspondentes à evaporação da planta e do solo, R o escoamento superficial e D a drenagem, sendo que ambos são dados de saída do perfil do solo. A água no solo é distribuída em várias camadas (máximo de 20) com a espessura das mesmas determinadas pelo usuário (Ritchie, 1985).

A infiltração da água no solo é calculada pela diferença entre a precipitação ou irrigação e escoamento superficial. O escoamento superficial é calculado pelo procedimento modificado do USDA-Soil Conservation Service (SCS), denominado “técnica do número da curva” (Williams, 1991). A drenagem é calculada através do método denominado “tipping bucket”, assumindo-se para cada camada de solo um valor fixo para o solo saturado, a condutividade hidráulica do solo saturado e a capacidade de campo. A água disponível no solo varia entre o ponto de murcha permanente e a capacidade de campo. Se a quantidade de água disponível em uma determinada camada do solo for maior que o valor máximo da capacidade de campo, o excesso de água é drenado para a próxima camada, baseado no coeficiente de drenagem especificado no arquivo de dados de entrada do perfil do solo. O cálculo desse processo é diário (Jones e Ritchie, 1990; Ritchie, 1985).

A evapotranspiração é baseada no processo descrito por Ritchie (1972). Esse processo separa a evaporação do solo da transpiração da planta. A evapotranspiração potencial é calculada usando a equação de Priestley-Taylor ou FAO24-Penman. A grande vantagem do método de Priestley-Taylor (1972) para se calcular a evapotranspiração potencial é que os dados de entrada são somente os valores diários de radiação solar, temperatura máxima e mínima e o valor do albedo do solo. A evaporação do solo é dada em função da quantidade de água disponível na camada superficial do

solo e energia que alcança a superfície do solo, que é proporcional ao índice de área foliar e albedo do solo. A taxa de extração de água pela raiz é calculada usando-se a aproximação "law of the limiting". Nessa aproximação, a resistência das raízes determina a taxa de fluxo de água para as mesmas. Se as raízes são incapazes de extrair a quantidade de água perdida por transpiração em razão da alta resistência ao fluxo no solo e/ou baixa quantidade de água disponível no solo em uma ou mais camadas, a transpiração é reduzida proporcionalmente. Quando ocorre o estresse hídrico na planta, são introduzidos fatores que reduzem a fotossíntese, a expansão do crescimento e o aumento da partição da biomassa para as raízes (Hoogenboom et al., 1992).

O modelo CROPGRO calcula o nitrogênio extraído pela planta e a fixação do mesmo. Somente os movimentos de nitrato e uréia são considerados e ambos são dependentes do movimento de água no solo. Informações adicionais sobre o balanço de nitrogênio podem ser encontradas em Godwin e Singh (1998).

Modificações realizadas no modelo CROPGRO

Foram feitas modificações nos códigos do modelo CROPGRO para se considerar o tempo que um sistema de irrigação pivô central gasta para completar uma revolução. Essas modificações foram necessárias, pois, o modelo assume que a irrigação é realizada em um dia na área total, usando o processo diário da rotina do balanço hídrico no solo. A estrutura modificada no modelo CROPGRO é ilustrada na Figura 1.

Essas modificações incluem a adição de uma nova sub-rotina no modelo, a criação de um novo módulo de entrada de dados (IRRIGA) e modificações no módulo "driver". A nova sub-rotina foi adicionada no módulo que executa a simulação para armazenar todas as datas de irrigação em um novo arquivo temporário denominado IRRIGA.DAT, no final da primeira execução do modelo. Introduziu-se uma restrição no módulo "driver", que é implementada quando o número de tratamentos ou número de dias que o equipamento requer para completar uma revolução é maior que um.

Figura 1. Diagrama do modelo modificado CROPGRO para manejo de irrigação com sistema pivô central

O novo módulo, denominado IRRIGA, tem como objetivo ler as datas de irrigação do arquivo temporário, que é criado no final da primeira execução do modelo. Esse módulo também adiciona um ou mais dias para o equipamento completar uma revolução conforme o manejo de irrigação adotado e cria um novo arquivo temporário (IBSNAT35.INP), que inclui as novas datas de irrigação baseadas no manejo obtido na primeira sessão da área a ser irrigada. Essas modificações também permitem o uso de dois ou mais tipos de solo e culturas em diferentes segmentos da área a ser irrigada pelo sistema pivô central.

Os intervalos entre o início e o término das irrigações podem afetar o rendimento da cultura, em função da localização das plantas no campo, ou seja, as plantas nos extremos, início da área irrigada e final da área irrigada, são as primeiras e as últimas a receberem água. Para se considerar uma possível diferença no rendimento entre a primeira parcela da área a ser irrigada e as demais parcelas, a produtividade e a lâmina total aplicada foram simuladas para cada parcela irrigada conforme o turno de rega adotado. Informações adicionais sobre as diferentes opções de frequências de irrigação são encontradas nos itens seguintes.

Condições Locais

O modelo BEANGRO, versão 1.02, foi calibrado e validado para Londrina por Faria et al. (1997b). Os coeficientes genéticos da variedade IAPAR 57, largamente cultivada na região, foram obtidos utilizando-se dados de campo de diferentes épocas de plantio e manejos de irrigação. Rendimentos simulados de feijão mostraram uma boa comparação com os dados observados para as diferentes épocas de plantio e manejos de irrigação para Londrina. Os coeficientes de determinação (R^2) entre os dados simulados e observados para maturidade fisiológica, biomassa e rendimento foram 0,82, 0,70 e 0,91, respectivamente (Faria et al., 1997b). As informações climáticas requeridas pelo modelo CROPGRO foram obtidas na estação meteorológica do Instituto Agrônomo do Paraná, localizada em Londrina (Latitude 23,45° S, Longitude 51,95° W). Essa região possui um clima caracterizado como subtropical úmido, com a precipitação variando de 1200 a 1900mm, sendo que 2/3 da precipitação total ocorre durante a primavera e o verão, ou seja, de outubro a março. Os parâmetros climáticos utilizados no modelo CROPGRO incluem dados históricos do período de 1976 a 1997 de precipitação, temperaturas máxima e mínima, e radiação solar, cujas médias mensais para os 22 anos da série histórica são ilustradas na Figura 2.

Figura 2. Média mensal das temperaturas máximas (Tmax) e mínimas (Tmin), radiação solar (Rsolar) e precipitação para 22 anos de dados históricos (1976-1997)

Os dados de solo usados como entrada no modelo são apresentados na Tabela 1, sendo obtidos por análises realizadas em campo, na Estação Experimental do IAPAR, em Londrina (Faria et al., 1994). O solo, classificado como Latossolo Roxo, é caracterizado pelo alto teor de argila (40 e 60%), um perfil profundo, alta taxa de infiltração, lençol freático profundo e baixa quantidade de matéria orgânica.

Os dados de entrada no modelo para as práticas culturais incluem: espaçamento entre linhas de plantio igual a 0,5m, densidade de plantio de 24 plantas m^{-2} e data de semeadura em 15 de agosto. Foram utilizados os coeficientes genéticos obtidos por Faria et al. (1997b) para simular o crescimento e desenvolvimento da cultivar de feijão IAPAR 57.

Tabela 1. Características do Latossolo Roxo de Londrina, Paraná

Profundidade (cm)	Parâmetros do Solo					
	SLL ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)	SDUL ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)	SSAT ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)	SBDM (g cm^{-3})	SSKS (cm h^{-1})	SRGF
0-10	0,20	0,35	0,43	1,1	1,9	1,00
10-25	0,27	0,38	0,43	1,0	1,9	0,25
25-40	0,27	0,38	0,43	1,0	1,9	0,25
40-55	0,27	0,36	0,43	1,0	1,9	0,10
55-70	0,27	0,36	0,43	1,0	1,9	0,10
70-130	0,27	0,36	0,43	0,9	1,9	0,00

SLL – Ponto de Murcha Permanente

SDUL – Capacidade de Campo

SSAT – Quantidade de água no solo saturado

SBDM – Densidade do solo

SSKS – Condutividade hidráulica em solo saturado

SRGF – Fator de crescimento de raiz

Características das Estratégias de Irrigação

Na região de Londrina, o sistema de irrigação mais utilizado é o pivô central, geralmente com capacidade de aplicação de água variando de 5 a 7mm dia⁻¹, o que é equivalente a uma vazão de 125 a 175m³ h⁻¹ para uma área irrigada de 60ha. Uma vantagem desse sistema de irrigação é a possibilidade de se aplicar diferentes lâminas de água pelo ajuste da velocidade de rotação.

Neste estudo, sistemas de irrigação pivô central com diferentes capacidades de aplicação de água (5, 6 e 7mm dia⁻¹) foram considerados para determinar as estratégias de irrigação que otimizam a renda líquida do feijão na região úmida de Londrina, Paraná. Para cada sistema, os três seguintes turnos de rega foram analisados:

- irrigar toda a área em um dia, aplicando-se lâminas de 5, 6 e 7mm. Nesse caso é assumido que toda a área irrigada terá o mesmo teor de umidade do solo (Figura 3a).
- irrigar toda a área em dois dias, aplicando-se lâminas de 10, 12 e 14mm devido à redução na velocidade de rotação do equipamento pela metade. Nesse caso haverá duas seções de 30ha, podendo cada seção ter diferente valor de umidade do solo devido às diferenças no tempo em que a irrigação ocorreu em cada seção (Figura 3b).

c) irrigar toda a área em três dias, aplicando-se lâminas de 15, 18 e 21mm. Nesse caso haverá três seções de 20ha, podendo cada seção ter distintos valores de umidade do solo (Figura 3c).

Figura 3. Diferentes estratégias de irrigação simuladas com o modelo modificado CROPGRO, para irrigação da área em um dia (a), dois dias (b) e três dias (c)

As estratégias de irrigação utilizadas neste estudo, correspondentes aos sistemas pivô central com três capacidades de aplicação de água e operados com três velocidades de rotação, foram resumidas na tabela 2.

Tabela 2. Lâminas de irrigação resultantes das diferentes estratégias de irrigação simuladas.

	Tempo de revolução do pivô central		
	1 dia	2 dias	3 dias
Capacidade de	5	10	15
Aplicação	6	12	18
(mm)	7	14	21

O momento de irrigação foi definido de acordo com os diferentes níveis críticos de umidade remanescentes da fração de água disponível no solo (CAD), considerando-se a profundidade de 30cm do perfil do solo. Foram considerados seis níveis críticos de umidade, ou seja, de 40 a 90% da CAD, em intervalos de 10%. A lâmina de água aplicada depende do turno de rega, isto é, um, dois ou três dias para cada

pivô central. Para cada estratégia de simulação, o valor da umidade inicial do solo foi ajustado para a capacidade de campo e as simulações foram iniciadas no dia de plantio.

Neste estudo, após atingir o nível crítico de umidade do solo preconizado como critério para a aplicação de irrigação, considerou-se que todas as seções seriam irrigadas, mesmo com a ocorrência de precipitação após a irrigação da 1ª ou 2ª seções, ou seja, não se encerrará a irrigação mesmo que isso implique em irrigar em um dia com chuva. Normalmente, a probabilidade de chuva para dois ou três dias é desconhecida ou insuficiente para tomadas de decisões no manejo de irrigação.

Critério de Decisão

Neste estudo, a função objetivo foi a maximização da renda líquida, conforme equação (2):

$$NP = \max \{P \cdot Y_{(d,i)} - C_t(d,i)\} \quad (2)$$

sendo, P o preço do produto, em US kg⁻¹, Y o rendimento de grãos simulado pelo modelo para cada ano dos dados climáticos utilizados, em kg ha⁻¹, C_t o custo total, a ser definido na equação (3), d é um elemento de {d₁, d₂, ..., d_n} e representa os diferentes níveis críticos de umidades do solo, variando de 40 a 90% da CAD, e i um elemento de {i₁, i₂, ..., i_n} representando os estados da natureza (anos de simulações variando de 1976 a 1997).

A renda líquida foi considerada como o principal critério de decisão, sendo definida como a renda bruta, correspondente ao produto da produtividade pelo valor do produto (“commodity”), menos o custo de produção. O custo de produção (C_t) foi dividido em custo fixo (C_o), associado aos custos básicos de produção da cultura e ao custo da irrigação (C_i), dados em US ha⁻¹, ou seja (equação 3):

$$C_t = C_o + C_i \quad (3)$$

O custo da irrigação (C_i) foi definido pela seguinte relação (equação 4):

$$C_i = C_c + (C_e \cdot D + C_w \cdot D) \quad (4)$$

sendo, C_c o custo anual do capital investido nos equipamentos de irrigação (US ha^{-1}), C_e o custo operacional da irrigação, incluindo o preço do bombeamento (US mm^{-1}), C_w o custo da água (US mm^{-1}), e D a lâmina total de irrigação aplicada durante o ciclo da cultura, em mm.

O valor de C_c , obtido de Faria et al. (1997a), foi de $\text{US } 341,67\text{ha}^{-1}$, e o custo anual do capital (C_c), obtido de Frizzzone et al. (1994), foi de $\text{US } 121,67\text{ha}^{-1}$. O custo anual do capital incluiu a depreciação sobre dez anos e juros de 12% ao ano. Os componentes do C_e incluíram a energia e os custos operacionais. O valor de C_e foi de $\text{US } 0,42\text{mm}^{-1}$, obtido de Faria et al. (1997a). Esse valor foi baseado na média de vários projetos de irrigação que utilizaram pivôs centrais. O valor de C_w foi considerado nulo por não haver cobrança de tarifa de uso de água quando a mesma é retirada de rios e/ou represas. O custo anual do capital investido nos equipamentos de irrigação (C_c) foi considerado o mesmo para os três sistemas pivô central de diferentes capacidades de aplicação.

Três análises foram realizadas utilizando-se três diferentes preços do produto. Na primeira análise, o preço do produto foi $\text{US } 0,42\text{kg}$, o mais baixo no período de dez anos, entre 1989 até 1998. Na segunda análise, o preço do produto foi $\text{US } 0,72\text{kg}$, representando a média dos dez anos. Na terceira análise, o preço foi $\text{US } 1,04\text{kg}$, o mais alto da série de dez anos. Esses preços foram baseados nos preços históricos do produto e foram obtidos da FNP Consultorias & Comércio (1998) para o estado do Paraná.

3.3 Resultados e Discussão

Produtividade

Os resultados demonstraram significativos ganhos de rendimento de grãos de feijão com o aumento do nível crítico de umidade do solo, especialmente entre 40 e 60% da CAD. Os níveis críticos de umidade do solo foram importantes na determinação dos mais altos rendimentos como mostra a Figura 4. As necessidades de irrigação para manter a umidade do solo acima do nível crítico de umidade preconizado em cada estratégia aumentaram com o aumento do nível crítico de umidade do solo, independentemente do tempo de revolução do pivô central (Figura 4). Com o aumento do nível crítico de umidade do solo, as médias das produtividades tenderam a se manter constantes para os sistemas pivô central estudados. O efeito da velocidade de rotação dos sistemas de irrigação ocorreu somente sob baixos valores de umidade crítica do solo.

Na análise da produtividade, a melhor estratégia de irrigação foi definida como aquela que proporciona o mais alto rendimento de grãos de feijão. Para um nível crítico de umidade do solo de 40% da CAD, o melhor turno de rega foi irrigar toda a área em três dias, para os sistemas com capacidades de aplicação de 6 e 7mm dia⁻¹. Para 50% da CAD, o melhor turno de rega foi irrigar toda a área em dois dias, com um sistema cuja capacidade de aplicação foi de 7mm dia⁻¹. Para 60% da CAD, o melhor turno de rega foi irrigar toda a área em um dia, utilizando-se um sistema pivô central com capacidade de 6 e 7mm dia⁻¹, resultando em produtividades máximas de 2,94t ha⁻¹. A diferença entre os equipamentos foi somente o número de irrigações aplicadas durante o ciclo total da cultura, sendo 32 e 27 aplicações, respectivamente. Para um nível crítico de umidade do solo de 70% da CAD, o turno de rega que apresentou o melhor rendimento de grãos foi também irrigar toda a área em um dia, com os sistemas com capacidade de aplicação de 6 e 7mm dia⁻¹. A produtividade média para ambos foi de 3,05t ha⁻¹, sendo apenas 3% maior que a produtividade para o nível crítico de umidade do solo de 60% da CAD. Entretanto, o número de irrigações foi de 39 para uma lâmina de 234mm e 35 para uma lâmina de 242mm, para os equipamentos de 6 e 7mm dia⁻¹, respectivamente. Para 80%

da CAD, o melhor turno de rega foi irrigar toda a área em um dia, com os sistemas que aplicaram 6 e 7mm dia⁻¹. A máxima produtividade foi de 3,07t ha⁻¹, sendo apenas 0,6% maior que a produtividade para o nível crítico de umidade do solo de 70% da CAD. O número médio de irrigações foi de 47 para uma lâmina de 285mm e de 42 para uma lâmina de 294mm, respectivamente. Para 90% da CAD, o melhor turno de rega foi irrigar toda a área em um dia, sendo que a produtividade média foi a mesma para os três sistemas de irrigação analisados, isto é, 3,08t ha⁻¹. Para os sistemas de irrigação de 6 e 7mm dia⁻¹ a produtividade aumentou somente 0,3%. O número médio de irrigações foi de 64 para uma lâmina de 320mm, de 57 para uma lâmina de 341mm e de 52 para uma lâmina de 362mm, para os equipamentos com capacidade de aplicação de 5, 6 e 7mm dia⁻¹, respectivamente.

Para os três sistemas pivô central analisados neste estudo, o turno de rega de 3 dias apresentou a menor produtividade quando o nível crítico de umidade do solo foi maior que 40% da CAD. Nas condições climáticas da região de Londrina, clima subtropical úmido, a demanda de água pelas plantas aumenta em setembro e em outubro devido ao aumento da temperatura e da radiação solar (Figura 2). Um atraso de um ou dois dias na irrigação em uma determinada seção da área irrigada aumenta a deficiência de água no solo e pode ocasionar a redução na produtividade.

Renda Líquida

Na análise da renda líquida, a melhor estratégia para o agricultor é aquela que proporciona a máxima renda líquida. Pelo fato da renda líquida ser função do preço do produto, foi analisado o impacto da mesma em três diferentes preços. A Tabela 3 apresenta os resultados das rendas líquidas em função dos níveis críticos de umidade do solo de 70 e 80% da CAD, capacidade de aplicação dos equipamentos pivô central e turno de rega.

Figura 4. Produtividade média de grãos de feijão (ponto) e desvio padrão (barra) simulados para pivô central com capacidades de aplicação de 5mm dia⁻¹ (a), 6mm dia⁻¹ (b) e 7mm dia⁻¹ (c), operados em três tempos de revolução, em função do nível crítico de umidade do solo e lâmina aplicada

Tabela 3. Melhores resultados de estratégias de irrigação para Londrina, Paraná, Brasil

Turno de rega	Capacidade de aplicação, mm dia ⁻¹	Umidade crítica, %	Lâmina, mm	Nº de irrigações	Lâmina total aplicada, mm		Produtividade (t ha ⁻¹)		Menor Preço		Preço Médio		Maior Preço		Renda líquida, US ha ⁻¹
					$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD	
1 dia	5	70	5	44	221	64	3,01	0,78	892	376	1615	563	2580	813	
2 dias	5	70	10	26	256	68	2,96	0,75	848	365	1557	546	2503	788	
3 dias	5	70	15	19	279	67	2,88	0,74	803	355	1496	533	2419	770	
1 dia	5	80	5	55	274	68	3,06	0,79	892	381	1627	571	2607	824	
2 dias	5	80	10	31	310	72	3,00	0,77	849	374	1570	560	2532	808	
3 dias	5	80	15	23	349	79	2,96	0,75	803	355	1520	551	2467	794	
1 dia	6	70	6	39	234	67	3,05	0,78	900	377	1631	565	2606	816	
2 dias	6	70	12	23	271	70	2,97	0,76	849	368	1562	551	2513	795	
3 dias	6	70	18	18	320	76	2,93	0,74	807	360	1509	539	2446	778	
1 dia	6	80	6	48	286	70	3,07	0,79	891	382	1629	572	2612	826	
2 dias	6	80	12	29	343	78	3,01	0,78	839	376	1563	562	2528	811	
3 dias	6	80	18	23	416	94	2,98	0,76	792	374	1508	557	2462	802	
1 dia	7	70	7	35	242	69	3,05	0,79	900	379	1631	568	2607	820	
2 dias	7	70	14	20	279	71	2,97	0,76	845	364	1558	546	2508	790	
3 dias	7	70	21	17	352	100	2,90	0,77	782	377	1480	563	2409	802	
1 dia	7	80	7	42	294	70	3,07	0,79	889	382	1627	572	2611	826	
2 dias	7	80	14	27	379	87	3,01	0,78	824	376	1548	562	2513	811	
3 dias	7	80	21	23	480	108	2,99	0,77	769	377	1486	561	2443	807	

menor preço – US 0,48kg⁻¹, preço médio – US 0,72kg⁻¹ e maior preço – US 1,04kg⁻¹

$\bar{x}$ - média

SD – desvio padrão

a) menor preço do produto

Para o sistema de irrigação com capacidade de aplicação de 5mm dia^{-1} , o melhor turno de rega foi irrigar toda a área em um dia, com o nível de umidade crítica do solo de 70 e 80% da CAD (Tabela 3). Pela Figura 5a observa-se que não há diferença na renda líquida ($\text{US } 892\text{ha}^{-1}$) entre os níveis críticos de umidade do solo de 70 e 80% da CAD. Para 70% da CAD, a produtividade foi de $3,01\text{t ha}^{-1}$, com um número médio de 44 irrigações e a lâmina aplicada de 221mm. Para 80% da CAD, a produtividade foi de $3,0\text{t ha}^{-1}$, o número médio de irrigações de 55 e a lâmina média aplicada de 274mm. Para um aumento na produtividade de 1,6% foi necessário aplicar 19,3% a mais de água, e isto não ocasionou mudanças na renda líquida.

Os equipamentos com capacidade de 6 e 7mm dia^{-1} proporcionaram as mesmas produtividades e rendas líquidas. O melhor turno de rega para os dois sistemas foi irrigar toda a área em um dia, quando o nível crítico de umidade do solo foi de 70% da CAD (Figura 5a). O número médio de irrigações foi de 39 e de 35, e a lâmina aplicada de 234mm e de 242mm para os equipamentos de 6 e 7mm dia^{-1} , respectivamente.

b) preço médio do produto

Para o equipamento que aplicou 5mm dia^{-1} , o melhor turno de rega foi irrigar toda a área em um dia, para um nível crítico de umidade de solo de 80% da CAD (Figura 5b). Esse sistema proporcionou uma renda líquida média de $\text{US } 1.627\text{ha}^{-1}$. Para os sistemas de 6 e 7mm dia^{-1} , o melhor turno de rega também foi irrigar toda a área em um dia, quando o nível crítico de umidade do solo foi de 70% da CAD. Ambos os sistemas apresentaram uma renda líquida de $\text{US } 1.631\text{ha}^{-1}$.

c) maior preço do produto

Para o equipamento de 5mm dia^{-1} , o melhor turno de rega foi irrigar toda a área em um dia para um nível crítico de umidade de 80 e 90% da CAD. Para esses níveis críticos de umidade do solo, não houve diferença na renda líquida, sendo a mesma de

US 2.607ha⁻¹. Para o nível crítico de umidade do solo de 80 e 90% da CAD, a produtividade foi de 3,06 e de 3,08t ha⁻¹, com lâminas totais de 274 e de 320mm para 55 e 65 aplicações de irrigação, respectivamente. Para um aumento na produtividade de 0,65%, aplicou-se 14% a mais de água.

Para os equipamentos de 6 e 7mm dia⁻¹, o melhor turno de rega foi irrigar toda área em um dia, quando o nível crítico de umidade do solo foi de 80% da CAD. Nesse caso, a renda líquida média, a produtividade, o número de irrigações e a lâmina aplicada foram de US 2.612ha⁻¹, 3,07t ha⁻¹, 48 e 286mm para o equipamento de 6mm dia⁻¹ e US 2.611ha⁻¹, 3,07t ha⁻¹, 42 e 294mm para o equipamento de 7mm dia⁻¹.

Variações nas lâminas totais aplicadas

Neste estudo, as lâminas aplicadas variaram entre 221 e 320mm para as melhores estratégias. Esses resultados são próximos às lâminas de irrigação obtidas por Faria et al. (1997a), isto é, 230 a 330mm, em experimentos de campo conduzidos em Londrina. Saad (1996) e Queiroz et al. (1996) encontraram as mesmas variações nas lâminas totais de irrigação para o feijão em outras regiões do Brasil.

As variações nas lâminas totais de irrigação resultam das diferentes necessidades hídricas da cultura nos diferentes anos analisados (1976 – 1997), devido à variabilidade na distribuição e intensidade das precipitações, assim como na evapotranspiração potencial. Os fatores climáticos, precipitação, temperaturas máxima e mínima, e radiação solar, também são os responsáveis pelos altos valores do desvio padrão encontrado para o rendimento de grãos e, conseqüentemente, na renda líquida.

O número de irrigações para as estratégias consideradas economicamente ótimas não correspondeu aos números observados em condições de campo. Uma das razões para essa discrepância é que o modelo de simulação não considera os danos causados por insetos e doenças, embora o feijão seja suscetível a vários patógenos. Além disso, os valores econômicos para os sistemas de irrigação pivô central utilizados neste estudo, correspondem à média dos custos operacionais para esses sistemas. O número de irrigações entre 34 e 64 por ciclo da cultura, como sugerido pelas simulações, irá elevar os custos de manutenção e operacional do sistema de irrigação.

A maior renda líquida determinada neste estudo sugere a irrigação de toda a área em um dia, quando o nível crítico de umidade do solo foi de 70 e 80% da CAD (Tabela 3). A importância do preço do produto na determinação da renda líquida do agricultor, comparada à produtividade e aos custos de produção do feijão é mostrada na Tabela 3. Para o menor preço e o preço médio do produto, o sistema de irrigação que proporcionou as maiores rendas líquidas foram aqueles com capacidade de aplicação de 6 e 7mm dia⁻¹, irrigando quando o nível crítico de umidade do solo foi de 70% da CAD. Entretanto, o equipamento com a capacidade de aplicação de 7mm dia⁻¹ utilizou 17% a mais de água. Para o maior preço do produto, a maior renda líquida foi obtida com o equipamento com capacidade de 6mm dia⁻¹, quando o nível crítico de umidade do solo foi de 80% da CAD.

Este estudo demonstrou que o sistema de irrigação ótimo para o feijão é aquele que apresenta uma capacidade de aplicação de água de 6mm dia⁻¹, baseando-se nas condições ambientais e de manejo utilizados. Esse sistema possui uma vazão de 150m³ h⁻¹, isto é, 25m³ h⁻¹ a menos que o equipamento que aplica 7mm dia⁻¹. Apesar dos baixos custos de irrigação, o agricultor que adquirir um equipamento que aplique 6mm dia⁻¹, poderá economizar, comprando diâmetros menores de tubulações para a adutora e um sistema de bombeamento menor. Esse sistema permitirá ao agricultor obter, pelo menos, a mesma renda líquida obtida com o equipamento com capacidade de 7mm dia⁻¹.

Figura 5. Renda líquida média (ponto) e desvio padrão (barra) simulados para sistemas pivô central com capacidade de aplicação de 5, 6 e 7mm dia⁻¹ e turno de rega de um dia para o menor (a), médio (b) e maior (c) preço do produto, em função do nível crítico de umidade do solo e lâmina aplicada

3.4 Conclusões

As modificações realizadas no modelo de simulação CROPGRO permitiram considerar o número de dias necessários ao pivô central para completar uma revolução. O modelo modificado foi usado para determinar a estratégia ótima de irrigação para a cultura do feijão, na região de Londrina, Paraná. O sistema pivô central com capacidade de aplicação de 6mm dia^{-1} foi considerado o que fornece as melhores condições para se obter a renda líquida ótima. Para este estudo, a melhor estratégia foi irrigar quando o nível crítico de umidade do solo atingiu 70 % da CAD para o menor preço e preço médio do produto, e 80% da CAD para o maior preço do produto. O turno de rega que apresentou as maiores produtividades foi irrigar toda a área em um dia, minimizando o estresse hídrico durante o ciclo da cultura.

Futuras pesquisas são necessárias para avaliar diferentes condições climáticas e tipos de solo para tornar o modelo de simulação CROPGRO modificado aplicável a diferentes regiões. Há, também, a necessidade de se incluir modificações no modelo CROPGRO para permitir que o mesmo execute análises de estratégias de irrigação em tempo real, considerando-se o tempo de revolução do sistema de irrigação pivô central.

4 DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS NECESSIDADES HÍDRICAS DAS CULTURAS DO FEIJÃO, DO MILHO E DA SOJA UTILIZANDO-SE MODELOS DE CRESCIMENTO DE CULTURAS E SIG: UM EXEMPLO PARA O ESTADO DO PARANÁ

Resumo

A competição pelo uso dos recursos hídricos disponíveis requer a definição das estratégias apropriadas para o planejamento e o manejo das áreas irrigadas. Para se atingir um planejamento efetivo, é indispensável obter informações sobre as necessidades hídricas, quantidade anual de água utilizada para irrigação, escoamento superficial e nitrogênio lixiviado em função da cultura, tipo de solo e condições climáticas ao nível regional. Combinando-se modelos de crescimento com sistemas de informação geográfica (SIG), pode-se ampliar a habilidade de aplicação dos modelos de crescimento ao nível regional. Neste estudo, foram determinadas as necessidades hídricas de culturas, quantidade anual de água utilizada para irrigação, escoamento superficial e nitrogênio lixiviado para as culturas mais importantes da bacia do Rio Tibagi, no estado do Paraná, utilizando-se o sistema de suporte à decisão DSSAT (versão 3.5, 98.0) e o SIG AEGIS/WIN. Assumiu-se que os agricultores de um mesmo município utilizam práticas de manejo semelhantes. Para se obter as estimativas das necessidades hídricas nas condições locais, foram utilizados dados de clima de estações climáticas localizadas nos municípios e/ou estações climáticas mais próximas aos mesmos. Um fator de ponderação, baseado na proporção do tipo de solo e área cultivada, foi usado para determinar a quantidade total de água utilizada na irrigação, escoamento superficial e nitrogênio lixiviado para cada município da bacia do Rio Tibagi. Os resultados estimados pelos modelos, incluindo necessidades hídricas, escoamento superficial e nitrogênio lixiviado foram analisados utilizando-se métodos de análise

espacial. Isto permitiu mostrar mapas temáticos considerando essas variáveis para serem relacionadas com o manejo de irrigação e planejamento. As quantidades máximas anuais de água utilizada para irrigação, escoamento superficial e nitrogênio lixiviado foram, respectivamente, $22.969\text{m}^3 \text{ ano}^{-1}$, $31.152\text{m}^3 \text{ ano}^{-1}$ e 1.488t ano^{-1} , para o município de Reserva.

Palavras Chaves: Modelos de Crescimento, DSSAT, SIG, Feijão, Soja e Milho.

Summary

Due to the competitive use of available water resources, it is crucial to define appropriate strategies for planning and management of irrigated farmland. To achieve such a goal, information is required on crop water requirements, irrigation withdrawals, runoff and nitrogen leaching as a function of crop, soil type and weather conditions at a regional level. Interfacing crop models with a Geographic Information System (GIS) extends the capabilities of the crop models to a regional level. In this study DSSAT (version 3.5, 98.0) crop modeling system and the GIS system AEGIS/WIN were used to assess irrigation requirements, runoff and nitrogen leaching for the most important crops in the Tibagi River basin, located in the State of Paraná, Brazil. It was assumed that farmers within the same county use similar management practices. To achieve representative estimates weather data were obtained from stations located within each county or from the nearest weather station. A weighting factor based on the proportion of soil type and crop acreage was used to determine the mean total annual irrigation withdrawal, annual runoff and nitrogen leaching for each county in the river basin. Model predicted outputs, including irrigation requirements, runoff and nitrogen leached for different soil types in each county, were analyzed using spatial analysis methods. This allowed displaying thematic maps of those variables to be related with irrigation management and planning. The maximum annual irrigation withdrawal, nitrogen leaching and runoff were, respectively, $22.969\text{m}^3 \text{ year}^{-1}$, $1.488\text{ton year}^{-1}$ and $31.152\text{m}^3 \text{ year}^{-1}$.

Keywords: Simulation Model, DSSAT, GIS, Dry Bean, Soybean and Maize.

4.1 Introdução

Os agricultores do estado do Paraná têm vivenciado freqüentes frustrações na produtividade de culturas devido ao déficit hídrico causado pelas incertezas climáticas durante o ciclo das culturas. O uso de irrigação suplementar apresenta diversas vantagens, como aumentar a produtividade e decrescer sua variabilidade interanual em relação às culturas não irrigadas. O aumento e estabilização da produção regional podem contribuir para a melhoria da qualidade de vida da população por proporcionarem alimentos mais baratos, incremento na produção industrial e geração de empregos. Entretanto, o aumento da área irrigada e o conseqüente aumento no uso dos recursos hídricos, compete com outros setores usuários dos recursos, podendo resultar em seca de rios e/ou reservatórios e lençóis freáticos. Há a necessidade de se encontrar o equilíbrio entre o avanço do desenvolvimento econômico e a conservação dos recursos naturais. Para isso é importante definir as estratégias apropriadas ao planejamento e ao manejo dos recursos hídricos para o setor agrícola. O uso eficiente da água nos sistemas de produção irrigados é uma das principais necessidades (Smith, 2000). Nesses sistemas, é necessário priorizar a redução das perdas de água e tornar o manejo de irrigação mais eficiente. Estima-se que somente 45% da água destinada à irrigação são utilizados pelas culturas e que 25% são perdidos em aplicações ineficientes no campo (FAO, 1994). O escoamento superficial, contendo pesticidas provenientes das áreas agrícolas, é um dos maiores responsáveis pelo deterioramento da saúde das populações rurais em países em desenvolvimento (Lal, 2000).

O planejamento racional da irrigação em uma determinada região requer informações sobre as necessidades hídricas, quantidade de água anual utilizada na irrigação, escoamento superficial e nitrogênio lixiviado em função da cultura, do tipo de solo e das condições climáticas. Existem diversas técnicas para se estimar as necessidades hídricas das culturas, como as citadas por Burman et al. (1983), Pereira et al. (1996) e Souza e Pereira (1999). Neste estudo, foram utilizados modelos de crescimento de culturas do sistema de suporte à decisão “Decision Support System for Agrotechnology Transfer” (DSSAT) (Tsuji et al., 1994). Esses modelos de crescimento têm sido avaliados em diversas regiões do mundo e utilizados com sucesso em diferentes

aplicações, tais como: na determinação de necessidades hídricas das culturas baseando-se em dados climáticos históricos (Hook et al., 1998; Alexandrov e Hoogenboom, 1999); no planejamento de irrigação (Macrobert e Savage, 1998); na otimização da capacidade de aplicação de sistemas de irrigação (Heinemann e Hoogenboom, 2000) e, no estudo da eficiência do uso e lixiviação de nitrogênio (Garrison et al., 1999; Jagtap et al., 1999). Esses modelos são utilizados, principalmente, para a aplicação em um determinado local devido às limitações na disponibilidade de dados. Combinando-se os modelos de simulação com o SIG aumenta-se o espectro de aplicabilidade dos modelos para o planejamento regional. O SIG é um sistema utilizado para a aquisição, o armazenamento e a exibição de dados geográficos. Devido ao aumento na necessidade de conservação dos recursos naturais, como solo e água, é essencial o manejo desses recursos através do uso de SIG, que é uma poderosa ferramenta à disposição dos tomadores de decisões (Maracchi et al., 2000). Diversos pesquisadores têm combinado os modelos de crescimento do sistema DSSAT com o SIG para analisar a produtividade regional e os efeitos das mudanças climáticas em escala regional (Beinroth et al., 1998; Georgiev et al., 1998; Lal et al., 1993). Para combinar os modelos do DSSAT com o sistema de mapeamento geográfico ArcView (ESRI, 1998) foi utilizado a interface AEGIS/WIN (Agricultural and Environmental Geographic Information System for Windows). O AEGIS/WIN é escrito em AVENUE, uma linguagem orientada por objeto (Engel et al., 1997; Engel et al., 1999) e que processa os dados obtidos através de modelos no SIG, ilustrando os resultados dos mesmos (Hartkamp et al., 1999a).

Este estudo teve como objetivos: a) determinar as necessidades hídricas para as principais culturas da bacia hidrográfica do Rio Tibagi, incluindo o milho, o feijão e a soja; b) estimar a quantidade anual de água utilizada para a irrigação, o escoamento superficial e o nitrogênio lixiviado para cada município da bacia do Rio Tibagi; e c) avaliar a performance dos modelos de crescimento e o SIG na identificação de áreas potenciais para o uso de irrigação e na determinação de regiões suscetíveis ao escoamento superficial e à lixiviação de nitrogênio.

4.2 Material e Métodos

Descrição da área de estudo

A bacia do Rio Tibagi está localizada no estado do Paraná (Figura 1), entre as latitudes 22° 31' S e 26° 43' S e longitudes 50° 20' O e 51° 00' O, e é composta por 43 municípios. As principais culturas são o milho, a soja e o feijão.

No Paraná o milho é semeado entre o fim de agosto e início de novembro, sendo outubro a época de semeadura recomendada para a bacia do Rio Tibagi (Zoneamento Agrícola, 2000). Para cultivares de soja de ciclo curto, os maiores rendimentos são obtidos em semeaduras em outubro e novembro (Queiroz et al., 1998). Na parte sul da bacia do Rio Tibagi, vários agricultores preferem semear a soja entre três de novembro e cinco de dezembro. Entretanto, geralmente a semeadura é iniciada em meados de outubro (Fee, 1998). Na bacia do Rio Tibagi, o feijão é cultivado em dois diferentes períodos, no verão e no inverno/primavera. Na parte norte da bacia, o feijão cultivado no inverno/primavera, denominado neste estudo de feijão norte, é semeado em meados de agosto. Na parte sul, o feijão cultivado no inverno/primavera, denominado neste estudo de feijão sul, é semeado no final de setembro e começo de outubro (Oliveira e Villa Nova, 1996; Faria et al., 1997; Zoneamento Agrícola, 2000). O feijão cultivado no verão, denominado feijão de inverno, é comumente semeado em janeiro.

Para realizar este estudo, assumiu-se os dados do ano agrícola de 1998/1999 que foram levantados pelo DERAL (DERAL, 2000) para os municípios da bacia do Rio Tibagi, correspondentes à área plantada e ao rendimento médio por hectare dos anos agrícolas de 1995/1996, 1996/1997 e 1997/1998 para as culturas de milho, soja, feijão de inverno, feijão norte e feijão sul de cada município da bacia (Tabela 1). Esses dados foram também utilizados para a calibração dos coeficientes genéticos. Como as informações sobre as áreas irrigadas por município não são disponíveis, assumiu-se que toda a área cultivada é irrigada. Esse fato não afeta a determinação das necessidades hídricas das culturas e possibilita fornecer aos tomadores de decisão informações onde se deve implantar técnicas de conservação do solo e da água, caso haja implantação de projetos de irrigação na bacia.

Figura 1. Estado do Paraná e a Bacia do Rio Tibagi

Tabela 1. Área cultivada na Bacia do Rio Tibagi no ano agrícola de 1998/1999

Município	*ID	Estação Meteorológica	Milho (ha)	Soja (ha)	Feijão Inverno (ha)	Feijão Norte (ha)	Feijão Sul (ha)
Primeiro de Maio	01	Ibiporã	400	16500	20	-----	-----
Sertaneja	02	Ibiporã	1200	23500	-----	-----	-----
Leópolis	03	Ibiporã	1800	17000	-----	-----	-----
Sertanópolis	04	Ibiporã	1200	25000	25	-----	-----
Rancho Alegre	05	Ibiporã	300	11000	170	-----	-----
Cambé	06	Londrina	7000	24000	-----	36	-----
Cornélio Procópio	07	Ibiporã	3700	18800	-----	30	-----
Ibiporã	08	Ibiporã	500	12000	-----	-----	-----
Uraí	09	Ibiporã	1000	9000	-----	-----	-----
Jataizinho	10	Ibiporã	500	5500	-----	1800	-----
Londrina	11	Londrina	13000	23500	320	200	-----
Rolândia	12	Londrina	6000	19000	-----	20	-----
Nova A. da Colina	13	Ibiporã	300	4500	-----	100	-----
Assaí	14	Ibiporã	1500	23000	-----	120	-----
Nova Fátima	15	Ibiporã	1500	7500	-----	100	-----
São S. Amoreira	16	Ibiporã	1000	9000	-----	70	-----
Arapongas	17	Apucarana	5800	15300	-----	200	-----
Apucarana	18	Apucarana	10400	8600	-----	870	-----
Congonhinhas	19	Ibiporã	800	6000	20	100	-----
S. A. do Paraíso	20	Ibiporã	500	6500	-----	30	-----
S. C. do Pavão	21	Ibiporã	1500	-----	-----	150	-----
S. J. Da Serra	22	Ibiporã	3000	6500	25	-----	-----
Nova S. Bárbara	23	Ibiporã	500	4700	-----	40	-----
Marilândia do Sul	24	Apucarana	8000	11000	-----	280	-----
Califórnia	25	Apucarana	5200	210	-----	450	-----
Sapopema	26	Telêmaco	4500	-----	75	1140	-----
Ortigueira	27	Telêmaco	10800	3200	400	-----	3500
Mauá da Serra	28	Apucarana	1800	2300	-----	-----	80
Curiúva	29	Telêmaco	4000	650	330	-----	1800
Ventania	30	Telêmaco	6000	20000	500	-----	900
Telêmaco Borba	31	Telêmaco	280	-----	-----	-----	20
Piraí do Sul	32	Telêmaco	8800	6500	2200	-----	2300
Reserva	33	Telêmaco	24000	2500	1200	-----	21000
Tibagi	34	Telêmaco	20100	45140	2500	-----	1575
Castro	35	P. Grossa	21000	42000	6800	-----	4000
Ipiranga	36	Teixeira	12000	9500	330	-----	700
Ponta Grossa	37	P. Grossa	17000	42000	1000	-----	3500
Ivaí	38	Teixeira	7000	2000	1200	-----	6300
Imbituva	39	Teixeira	8800	10700	1350	-----	3000
Teixeira Soares	40	Teixeira	6500	14000	400	-----	2800
Palmeira	41	P. Grossa	13000	32000	600	-----	2030
Irati	42	Teixeira	23000	3000	1800	-----	14000
Porto Amazonas	43	P. Grossa	1500	2000	100	-----	90

Fonte: DERAL (2000)

* Correspondem à Figura 1

Modelos de crescimento de culturas

Os modelos CROPGRO e CERES são processos orientados e foram desenvolvidos para simularem o desenvolvimento e o crescimento de leguminosas e cereais, respectivamente. Simulam também os balanços de água e nitrogênio no sistema solo-planta-atmosfera. O modelo CROPGRO simula o rendimento para a soja, o feijão, o amendoim e o grão-de-bico (Boote et al., 1997; Hoogenboom et al., 1999). O modelo de crescimento CERES inclui simulações para o trigo, o milho, o arroz, o milheto, a cevada e o sorgo (Ritchie et al., 1998). O processo de desenvolvimento dos modelos utiliza informações diárias de dados climáticos históricos. Os modelos produzem resultados diários para o crescimento, o desenvolvimento e os balanços de água e nitrogênio nas culturas.

O módulo de balanço hídrico dos modelos do DSSAT descreve simplificadaamente os principais processos que afetam o conteúdo de água no perfil do solo, em passo de cálculo diário, e utiliza um conjunto mínimo de dados de entrada necessários à sua execução (Ritchie, 1998). O balanço hídrico é um modelo unidirecional e utiliza quatro equações para calcular as variações de armazenamento de água no solo (Jones e Ritchie, 1990; Hoogenboom et al., 1992; Ritchie, 1998), conforme a seguinte equação (1):

$$\Delta S = P + I - EP - ES - R - D \quad (1)$$

em que, ΔS representa a variação de armazenamento de água no solo, P e I correspondem à precipitação e à irrigação obtidos da estação meteorológica, EP e ES são os valores simulados correspondentes à evaporação da planta e do solo, respectivamente, R é o escoamento superficial estimado e D é a drenagem, ambos também simulados pelo módulo. A água no solo é distribuída em várias camadas, no máximo 20, com as espessuras determinadas pelo usuário (Ritchie, 1985; Porter et al., 1998).

A infiltração da água no solo é calculada pela diferença entre a precipitação ou a irrigação e o escoamento superficial. O escoamento superficial é calculado pelo

procedimento modificado do USDA-Soil Conservation Service (SCS, 1985), denominado “técnica do número da curva” (Williams et al., 1991).

A drenagem é calculada assumindo-se um valor fixo para a quantidade de água de um solo saturado e a capacidade de campo para uma determinada camada de solo. A água disponível no solo varia entre o ponto de murcha permanente e a capacidade de campo. Se a quantidade de água disponível em uma determinada camada do solo for maior que o valor máximo da capacidade de campo, o excesso de água é drenado para a próxima camada utilizando-se o processo denominado “tipping bucket”, baseado no coeficiente de drenagem especificado no arquivo de dados de entrada do perfil do solo (Ritchie, 1985; Ritchie, 1998; Jones e Ritchie, 1990; Porter et al., 1998).

A evapotranspiração é baseada no processo descrito por Ritchie (1972). Esse processo separa a evaporação do solo da transpiração da planta. A evapotranspiração potencial é calculada usando a equação de Priestley-Taylor ou FAO24-Penman. A grande vantagem do método de Priestley-Taylor (1972) para se calcular a evapotranspiração potencial é que os dados de entrada são somente os valores diários de radiação solar, temperaturas máxima e mínima e o valor do albedo do solo. Esse método foi classificado por Jensen et al. (1990) como um dos cinco melhores métodos para a determinação da evapotranspiração potencial em regiões úmidas. A evaporação do solo é dada em função da quantidade de água disponível na camada superficial do solo e energia que alcança a sua superfície, que é proporcional ao índice de área foliar e ao albedo do solo.

A taxa de extração de água pela raiz é calculada usando-se a aproximação “law of the limiting”. Nessa aproximação, a resistência das raízes determina a taxa de fluxo de água para as mesmas. Se as raízes são incapazes de extrair a quantidade de água perdida por transpiração em razão da alta resistência ao fluxo no solo e/ou baixa quantidade de água disponível no solo em uma ou mais camadas, a transpiração é reduzida proporcionalmente. Quando ocorre o estresse hídrico na planta, são introduzidos fatores que reduzem a fotossíntese, a expansão do crescimento e o aumento da partição da biomassa para as raízes (Hoogenboom et al., 1992). A profundidade do perfil de solo, o ponto de murcha permanente, a densidade de raízes no perfil do solo, a quantidade de

água no solo saturado e as variações na quantidade de água armazenada no solo (ΔS) são utilizadas como dados de entrada no modelo.

Nos modelos do DSSAT, para culturas em condições de solos não saturados, somente os movimentos de nitrato e de uréia são simulados através das camadas de solo. O movimento da amônia não é considerado. A fração de nitrato e de uréia em cada camada de solo move-se em função dos eventos de drenagem ocorridos no perfil do solo. Para a movimentação de nitrato e de uréia, entre as camadas do solo, é considerado o método denominado “tipping bucket”, onde o nitrogênio perdido em uma determinada camada de solo é adicionado à camada seguinte. Processo semelhante é utilizado para simular o movimento de nitrato e de uréia, das camadas inferiores do perfil do solo, através da evaporação da água na camada superficial (Godwin e Singh, 1998).

Condições locais

Clima

As informações climáticas necessárias aos modelos CROPGRO e CERES foram obtidas de seis estações meteorológicas do Instituto Agronômico do Paraná (IAPAR), localizadas na bacia do Rio Tibagi. Essa região tem um clima subtropical úmido. Os parâmetros climáticos que foram avaliados incluem 20 anos de dados climáticos (1978 – 1997) para as temperaturas máxima e mínima diárias, radiação solar e precipitação. A Tabela 2 mostra a respectiva latitude, longitude e altitude de cada estação meteorológica e a Figura 2 ilustra a disposição das estações meteorológicas na bacia do Rio Tibagi.

Tabela 2. Descrições das estações meteorológicas

Estações Meteorológicas	Localização	Latitude	Longitude	Altitude (m)
Apucarana	Apucarana	-23,50	-51,53	746
Ibiporã	Ibiporã	-23,27	-51,02	484
Londrina	Londrina	-23,30	-51,15	603
P. Grossa	Ponta Grossa	-25,22	-50,02	880
Telêmaco	Telêmaco Borba	-24,33	-50,62	768
Teixeira	Teixeira Soares	-25,45	-50,58	810

Figura 2. Estações climáticas e suas regiões na Bacia do Rio Tibagi

Cada estação meteorológica na bacia do Rio Tibagi abrange uma área que foi determinada utilizando-se o método denominado polígono de Thiessen (ou Dirichlet). O polígono de Thiessen é um dos métodos mais simples de interpolação, onde polígonos são desenhados de acordo com a distribuição dos pontos utilizados como amostragem. Essa técnica determina os atributos dos pontos que não fazem parte da amostragem, baseando-se nos pontos mais próximos da amostra. Esse método é o mais recomendado para dados qualitativos, para os quais outros métodos de interpolação não são aceitáveis (Hartkamp et al., 1999b).

Solo

O mapa do solo e as características dos perfis do solo para a bacia do Rio Tibagi foram obtidos da EMBRAPA (1984, 1986), FAO (1997) e Lantmann et al. (1997). O mapa foi digitalizado e os solos foram agrupados em sete principais tipos, cuja distribuição é ilustrada na Figura 3. Os parâmetros físico-hídricos para as duas camadas iniciais são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3. Área e parâmetros das duas primeiras camadas de perfil do solo na bacia do Rio Tibagi

Nome do Solo	Área (%)	Profundidade (cm)	Parâmetros				
			SLL ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	SDUL ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	SSAT ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	SBDM (g cm^{-3})	SRGF
Cambissolo	17,81	0-20	0,294	0,389	0,519	1,34	1,00
		20-40	0,386	0,443	0,497	1,37	0,53
Latossolo Roxo	24,07	0-10	0,200	0,351	0,430	1,10	1,00
		10-25	0,271	0,381	0,430	1,00	0,25
Latossolo Vermelho Escuro	26,78	0-18	0,327	0,529	0,538	1,00	1,00
		18-49	0,350	0,574	0,594	1,00	0,50
Latossolo Vermelho Álico	3,24	0-19	0,240	0,354	0,369	1,00	1,00
		19-31	0,271	0,385	0,400	1,00	0,50
Latossolo Distrófico	19,21	0-20	0,369	0,464	0,540	1,27	1,00
		20-40	0,395	0,511	0,601	1,11	0,53
Latossolo Eutrófico	0,09	0-24	0,365	0,485	0,500	1,00	1,00
		24-50	0,391	0,507	0,522	1,00	0,50
Podzólico	8,80	0-20	0,166	0,319	0,420	1,48	1,00
		20-40	0,154	0,287	0,377	1,61	0,53

SLL – Ponto de Murcha Permanente

SDUL – Capacidade de Campo

SSAT – Quantidade de água no solo saturado

SBDM – Densidade do solo

SSKS – Condutividade hidráulica em solo saturado

SRGF – Fator de crescimento de raiz

Figura 3. Distribuição dos solos na bacia do Rio Tibagi

Práticas culturais

Na Tabela 4 apresentam-se as práticas culturais assumidas nas simulações, correspondentes à parte dos dados de entrada para a execução dos modelos. Consideraram-se aplicações de fertilizantes somente para as culturas do milho e do feijão, seguindo-se as recomendações do IAPAR. Para o milho, foram assumidas aplicações de 30kg ha^{-1} de nitrogênio na semeadura e 60kg ha^{-1} aos trinta dias após a semeadura (IAPAR, 1991). Para o feijão, consideraram-se aplicações de 10kg ha^{-1} de nitrogênio na semeadura e 50kg ha^{-1} de nitrogênio aos trinta dias após a semeadura (IAPAR, 1989).

Tabela 4. Dados de práticas culturais utilizadas como dados de entrada nos modelos

Cultura	Data de semeadura	População (plantas m^{-2})	Espaçamento (m)
Milho	15 de Outubro	5,5	0,90
Soja	10 de Novembro	40	0,40
Feijão Inverno	10 de Janeiro	24	0,50
Feijão Norte	26 de Agosto	24	0,50
Feijão Sul	30 de Setembro	24	0,50

Coeficientes genéticos

Neste estudo, os coeficientes genéticos utilizados para o feijão representam uma cultivar comumente utilizada na região (IAPAR 57). Esses coeficientes genéticos foram calibrados para a região de Londrina, estado do Paraná, por Faria et al. (1997). Para a soja, as cultivares mais semeadas no Paraná são de ciclo precoce (Queiroz et al., 1998), que representa quase 90% da soja cultivada, com maturidade variando entre 110 e 115 dias após a semeadura (Alliprandini et al., 1998). Os coeficientes genéticos do banco de dados do modelo CROPGRO que melhor descrevem os cultivares de ciclo precoce são os pertencentes ao Grupo Maturidade VI. Para o milho, as cultivares mais comumente cultivadas na região são as de ciclo médio, sendo que o florescimento ocorre geralmente aos 65 dias após a semeadura (Tommaselli e Villa Nova, 1995). Os coeficientes genéticos de ciclo médio fornecidos no banco de dados do modelo CERES-

Maize foram utilizados como referência. As datas de florescimento e de maturação simuladas mostraram uma boa comparação com os dados observados em campo (DERAL, 2000). Entretanto, os dados simulados de produtividade superestimaram os dados observados de produtividade por município para todas as regiões da bacia do Rio Tibagi. Portanto, realizou-se uma calibração mudando somente os coeficientes genéticos G2 (número de grãos por espiga) e G3 (taxa de crescimento da espiga) utilizados pelo modelo de crescimento. O arquivo “Gcrules.fle” do programa GENCALC (Hunt et al., 1993) foi modificado e o objetivo para os coeficientes G2 e G3 foi fixado na produtividade, ao invés do número de grãos por m² e peso do grão. Três anos de dados climáticos históricos (1995, 1996 e 1997) foram utilizados para executar o programa GENCALC. Com isso, seis diferentes cultivares de milho foram obtidas, uma para cada região, utilizando a média dos coeficientes genéticos (G2 e G3). Essas cultivares foram utilizadas para executarem as simulações do modelo de crescimento CERES-Maize. A Figura 4 ilustra os rendimentos simulados e observados para cada região.

Estratégia de irrigação

Para o feijão e a soja o controle do manejo de irrigação foi assumido como sendo para os primeiros 30 cm do perfil do solo, sendo aplicadas irrigações sempre que a fração da capacidade de água disponível, CAD, existente no solo atingiu 50%. Para cada período simulado, quando a água disponível no solo reduziu de 50% da CAD nos primeiros 30cm do perfil do solo, a irrigação foi aplicada até a reposição de 90% da CAD. O modelo assume que a fração de 90% da CAD é alcançada no mesmo dia em que se realiza a irrigação. Para o milho, o controle da irrigação foi ajustado para os primeiros 60cm do perfil do solo e também se adotou 50% da CAD como umidade crítica para se realizar irrigações.

No início de cada simulação, a umidade inicial do solo foi ajustada para a capacidade de campo. As simulações iniciaram-se na data de semeadura.

Figura 4. Rendimentos de milho simulados e observados nos municípios da bacia do Rio Tibagi para os anos agrícolas de 1995, 1996 e 1997

Necessidades hídricas

Para cada cultura estudada (milho, soja, feijão norte, feijão sul e feijão de inverno) foi criado um mapa, sobrepondo-se os mapas do solo e dos municípios. Somente foram considerados os municípios da bacia do Rio Tibagi nos quais as culturas foram plantadas durante o ano agrícola de 1998/1999. Os polígonos com o mesmo tipo de solo e sob influência da mesma estação meteorológica foram unidos em uma mesma estratégia. Cada ciclo das culturas foi simulado para 20 anos de dados climáticos e a média das necessidades hídricas para cada cultura foi analisada. Determinou-se o centro de cada polígono e fez-se uma interpolação para se obter os mapas de contorno para as necessidades hídricas das culturas. Esses mapas consideraram a variação espacial de solo e de clima. A interpolação foi realizada utilizando-se o método determinístico IDWA (Inverse Distance Weighted Average) pelo qual os valores estimados foram determinados através da combinação linear de valores conhecidos (em pontos de amostra) e o fator peso dos pontos mais próximos foram definidos estritamente em função da distância (Hartkamp et al., 1999b). O expoente da distância foi ajustado em 2. Quanto mais próximo de zero o expoente, mais o fator peso torna-se similar para todos os pontos (Isaaks et al., 1989). Muitos pesquisadores têm utilizado esse método para interpolar dados climáticos (Legates e Willmont, 1990; Stallings et al., 1992).

Água anual utilizada para a irrigação, escoamento superficial e nitrogênio lixiviado

Usou-se um fator de ponderação baseado na área de ocorrência de cada tipo de solo e na área cultivada para determinar a quantidade anual de água utilizada para a irrigação, escoamento superficial e nitrogênio lixiviado em cada município estudado. A equação (2) representa o fator de ponderação usado para determinar a quantidade anual de água utilizada para a irrigação em cada município:

$$IR_{(i, a)} = \left(\frac{X_{(t, i)}}{Y_{(i)}} * C_{(a, i)} * I_{(t, a, i)} \right) \quad (2)$$

em que, t representa o tipo de solo, i representa o município e a representa a cultura; IR é a quantidade de água utilizada para a irrigação em um determinado município i e cultura a , em m^3 ; X é a área de um determinado tipo de solo t em um determinado município i , em ha ; Y é a área total do município i , em ha ; C é a área cultivada com cultura a em um município i , em ha ; I é a irrigação aplicada em um determinado tipo de solo t e município i para uma específica cultura a , em $m^3 ha^{-1}$, obtida através dos modelos de crescimento.

A quantidade total de água utilizada anualmente na irrigação em cada município foi determinada pela soma das irrigações aplicadas em cada cultura (IR). O mesmo processo foi utilizado para determinar o escoamento superficial e o nitrogênio lixiviado para cada um dos municípios estudados. Determinou-se o centro de cada município e fez-se uma interpolação (IDWA) para determinar a distribuição espacial da quantidade de água usada para fins de irrigação, escoamento superficial anual e nitrogênio lixiviado ao nível regional.

4.3 Resultados e Discussão

Necessidades Hídricas

Feijão Norte

A lâmina de água máxima aplicada, determinada pelo modelo CROPGRO – Feijão, foi de 368mm para a região de Ibiporã, para o solo Latossolo Distrófico em 1985. Para esse mesmo ano, a evapotranspiração do feijão foi de 412mm, para um rendimento de $2.432kg ha^{-1}$. A lâmina mínima aplicada foi zero para a região de Telêmaco Borba nos anos de 1980, 1981, 1982, 1987 e 1997. Para os anos de 1980, 1981, 1982 e 1987, a lâmina foi zero devido aos danos ocasionados pela baixa temperatura. Em 1997, não houve necessidade de se irrigar a cultura devido à alta precipitação (766mm) durante o ciclo da cultura.

As necessidades hídricas para a cultura do feijão norte para a região são ilustradas na Figura 5a. As necessidades hídricas mínima, média e máxima para os 20 anos de simulação foram de 74, 165 e 228mm, respectivamente, com um desvio padrão de 50 mm. Esses valores são próximos aos dados obtidos por Oliveira e Villa Nova (1996) para a região de Londrina, de 150mm para o ciclo total da cultura, utilizando-se evapotranspiração potencial e coeficiente de cultivo (K_c). Os rendimentos mínimo, médio e máximo foram de 2.501, 3.288 e 4.053kg ha⁻¹, respectivamente, com um desvio padrão de 495kg ha⁻¹.

Feijão Sul

A lâmina máxima aplicada foi de 322mm para a região de Telêmaco Borba, para o Latossolo Vermelho Álico, em 1985. A evapotranspiração e o rendimento da cultura foram de 440mm e 4.527kg ha⁻¹, respectivamente. A lâmina mínima aplicada foi zero, em 1982, para a região de Telêmaco Borba e Ponta Grossa devido aos danos ocasionados à cultura pela baixa temperatura. As necessidades hídricas para o feijão sul são ilustradas na Figura 5b. As necessidades hídricas mínima, média e máxima para a região foram de 73, 137 e 204mm, respectivamente, com um desvio padrão de 39mm. Oliveira e Villa Nova (1996) obtiveram uma lâmina de 125mm para o ciclo da cultura, para 75% dos anos analisados em Ponta Grossa. Os rendimentos mínimo, médio e máximo foram de 1.325, 3.432 e 4.250kg ha⁻¹, respectivamente, com um desvio padrão de 1.084kg ha⁻¹.

Feijão Inverno

A lâmina máxima aplicada foi de 266mm para o solo Podzólico, na região de Londrina, em 1978. A evapotranspiração e o rendimento foram de 374mm e 3.871kg ha⁻¹, respectivamente. A lâmina mínima aplicada foi zero em alguns anos para quase todas as regiões devido à alta precipitação ocorrida durante os ciclos da cultura. As necessidades hídricas do feijão para a região são ilustradas na Figura 5c. As

necessidades hídricas mínima, média e máxima para a região foram de 49, 108 e 170mm, respectivamente, com um desvio padrão de 34mm. Os rendimentos mínimo, médio e máximo foram de 1.038, 2.918 e 3.751kg ha⁻¹, respectivamente, com um desvio padrão de 920kg ha⁻¹.

Soja

A lâmina máxima aplicada foi de 355mm para a região de Telêmaco Borba, para o Cambissolo, em 1978. A evapotranspiração e o rendimento foram de 596mm e 2.958kg ha⁻¹, respectivamente. A lâmina mínima foi zero em alguns anos para toda a região devido à alta precipitação ocorrida durante os ciclos da cultura. As necessidades hídricas para a região são ilustradas na Figura 5d. As necessidades hídricas mínima, média e máxima foram de 47, 137 e 218mm, respectivamente, com um desvio padrão de 48mm. Os rendimentos mínimo, médio e máximo foram de 1.006, 3.861 e 4.809kg ha⁻¹, respectivamente, com um desvio padrão de 1.146kg ha⁻¹.

Milho

A lâmina máxima aplicada foi de 351mm para a região de Londrina, para o Podzólico, no ano de 1985. A evapotranspiração da cultura e o rendimento foram de 494mm e 7.728kg ha⁻¹, respectivamente. A lâmina mínima de irrigação foi zero para alguns anos para toda a região devido à alta taxa de precipitação ocorrida durante o ciclo da cultura. As necessidades hídricas para a cultura do milho são ilustradas na Figura 5e. As necessidades hídricas mínima, média e máxima foram 71, 148 e 202mm, respectivamente, com um desvio padrão de 35mm. Os rendimentos mínimo, médio e máximo foram de 2.097, 5.138 e 7.022kg ha⁻¹, respectivamente, com um desvio padrão de 1.660kg ha⁻¹.

5a)

5b)

5c)

5d)

5e)

Figura 5. Necessidades hídricas, em mm, para as culturas de: a) feijão norte, b) feijão sul, c) feijão de inverno, d) soja e e) milho, nos municípios da Bacia do Rio Tibagi

Regionalização dos resultados

Utilização da água para a irrigação

O município que mais utilizou água para fins de irrigação foi o de Reserva, representando o uso de $22.969\text{m}^3 \text{ ano}^{-1}$. Nesse município foram cultivados 24.000ha de milho, 2.500ha de soja, 21.000ha de feijão sul e 1.200ha de feijão de inverno. O milho foi o responsável pelo consumo de 98% da água utilizada para a irrigação. O município que menos utilizou água para a irrigação ($236\text{m}^3 \text{ ano}^{-1}$) foi Telêmaco Borba. Nesse município foi cultivada somente a cultura do milho, responsável pelo consumo de toda a água. A quantidade média de água utilizada, para os 20 anos de dados climáticos analisados, foi $7.773\text{m}^3 \text{ ano}^{-1}$, com um desvio padrão de $4.351\text{m}^3 \text{ ano}^{-1}$. A distribuição espacial da utilização de água anual é ilustrada na Figura 6a.

Escoamento superficial

A quantidade máxima de escoamento superficial foi $31.152\text{m}^3 \text{ ano}^{-1}$, no município de Reserva. As áreas cobertas com as culturas do milho e do feijão sul foram responsáveis por 91 e 8% do escoamento superficial anual, respectivamente. O escoamento superficial anual mínimo foi $321\text{m}^3 \text{ ano}^{-1}$ em Telêmaco Borba, sendo que a área coberta pela cultura do milho foi a responsável por 100% do escoamento. O escoamento superficial anual médio foi de $6.455\text{m}^3 \text{ ano}^{-1}$, com um desvio padrão de $6.531\text{m}^3 \text{ ano}^{-1}$. A distribuição espacial do escoamento superficial anual é ilustrada na Figura 6b e difere da distribuição espacial da retirada anual de água para a irrigação. Isso ocorre devido à alta precipitação em alguns anos e maior intensidade do uso da terra no sul da bacia do Rio Tibagi.

Nitrogênio lixiviado

A quantidade máxima anual de nitrogênio lixiviado foi 1.488t ano^{-1} , no município de Reserva. As áreas cobertas com as culturas do milho e do feijão sul foram responsáveis por 91 e 7,5% do nitrogênio lixiviado, respectivamente. A quantidade mínima foi 14t ano^{-1} em Telêmaco Borba e a área coberta pela cultura do milho foi a responsável por 100% da lixiviação. A média anual de nitrogênio lixiviado foi 344t ano^{-1} , com um desvio padrão de 313t ano^{-1} . A distribuição espacial para o nitrogênio lixiviado é ilustrada na Figura 6c, seguindo o mesmo padrão da distribuição espacial do escoamento superficial.

6a)

6b)

6c)

Figura 6. Distribuição espacial: a) Água requerida para irrigação ($\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$), b) Escoamento Superficial ($\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$) e c) Nitrogênio Lixiviado (t ano^{-1})

4.4 Conclusões

Os resultados deste estudo foram bastante promissores, possibilitando concluir que:

- a região sul da bacia do Rio Tibagi tem risco potencial mais elevado de erosão e contaminação de águas superficiais e subterrâneas devido ao maior escoamento superficial e lixiviação de nitrogênio;
- a recomendação de aplicação de nitrogênio para o milho deve ser reavaliada para a região sul da bacia do Rio Tibagi devido à alta precipitação em alguns anos, favorecendo a lixiviação de nitrogênio;
- os modelos de simulação de crescimento de culturas combinados com o SIG podem ser uma importante ferramenta para os tomadores de decisões.

Os resultados obtidos neste estudo encorajam o uso dessa técnica para elaborar mapas com informações detalhadas, como, por exemplo, as necessidades hídricas mensais para as culturas. Essas informações podem ser usadas por tomadores de decisões para definirem a máxima retirada de água permitida para fins de irrigação. Futuras pesquisas são necessárias para analisar especificamente os anos classificados como secos, normais e úmidos.

5 CONCLUSÕES

Além das conclusões específicas descritas nos capítulos 3 e 4, concluí-se também que os modelos de simulação de crescimento de culturas:

- são importantes ferramentas para a educação, a pesquisa e transferência de tecnologia, auxiliando na compreensão dos princípios do manejo da cultura e solo e proporcionando visualizar a irrigação como parte de um amplo sistema;
- estimulam o trabalho multidisciplinar de equipes;
- permitem a análise dos impactos das intervenções nos recursos naturais a longo (dados históricos) e curto termo;
- têm uma grande importância no desenvolvimento de suportes à tomada de decisões;
- quando combinados com sistemas de informação geográfica tornam-se poderosas ferramentas ao nível regional, podendo fornecer informações que auxiliem na definição de estratégias para sistemas irrigados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEXANDROV, V.; HOOGENBOOM, G. Crop water use as a function of climate variability in Georgia. In.: HATCHER, K.J. (Ed.) PROCEEDINGS OF THE 1999 GEORGIA WATER RESOURCES CONFERENCE. Athens, 1999. **Proceedings** Athens: Institute of Ecology, Univ. of Georgia, 1999, p. 425-428.
- ALLIPRANDINI, L.F.; TOLEDO, J.F.F.; JUNIOR, N.S.F.; ALMEIDA, L.A de; KIIHL, R.A.S. de. Stability and adaptability analysis of soybean grown in Paraná State. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.33, n.9, p.1321-1328, 1998.
- BEINROTH, F.H.; JONES, J.W.; KNAPP, E.B.; PAPAJORGJI, P.; LUIJTEN, J. Evaluation of land resources using crop models and a GIS. In.: TSUJI, G.Y.; HOOGENBOOM, G. e THORNTON, P.K. (Eds.) **Understanding options for agricultural production**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998. p. 293-311.
- BOGGESE, W.G.; LYNNE, G.G.; JONES, J.W.; SWANEY, D.P. Risk-return assessment of irrigation decisions in humid regions. **Southern Journal of Agricultural Economics**, v.15, n.1, p. 135-143, 1983.
- BOGGESE, W.G.; RITCHIE, J.T. Economic and risk analysis of irrigation decisions in humid regions. **Journal of Production Agricultural**, v.1, n.2, p. 116-122, 1988.
- BOOTE, K.J.; JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G. Evaluation of the CROPGRO-Soybean model over a wide range of experiments. In: KROPFF, M.J.; TENG, P.S.; AGGARWAL, P.K.; BOUMA, J.; BOUMAN, B.A.M.; JONES, J.W.; VAN LAAR, H.H. (Eds.) **Applications of systems Approaches at the field level, v.2**, Dordrecht: Kluwer Academic Press Publishers, 1998b. p. 113-133.

- BOOTE, K.J.; JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G. Simulation of crop growth-CROPGRO Model. In.: PEART, R.M. e CURRY, R.B. (Eds.) **Agricultural systems modeling**. New York: Marcel Dekker, 1997. p. 651-692.
- 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. (Eds.). **Understanding options for agricultural production**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998a. p. 99-127.
- BOUMAN, B.A.M.; van KEULEN, H.; RABBINGE, R. The 'School of de Wit' crop growth simulation models: a pedigree and historical overview. **Agricultural Systems**, v.52, n.2/3, p. 171-198, 1996.
- BURMAN, R.D.; CUENCA, R.H.; WEISS, A. Techniques for estimating irrigation water requirements. In.: HILLEL, D. (Eds.) **Advances in irrigation**, v.2, p. 335-394, 1983.
- CARAMORI, P.H.; OLIVEIRA, D. de; FARIA, R.T.de. Frequência de períodos de 10 dias consecutivos com deficiência hídrica (veranicos) para Londrina e Ponta Grossa. **IAPAR, Boletim técnico**, n.20, 1987. 24 p.
- de WIT, C.T. **Photosynthesis of leaf canopies**. In.: SETLIK, I. (Ed.), Prediction and Measurement of Photosynthetic Activity. Wageningen, The Netherlands: Pudoc, 1970, p.17-23.
- DERAL. **Levantamento da produção agrícola municipal: 1995 a 1998**. Curitiba: Departamento de Economia Rural. Secretaria do Abastecimento do Estado do Paraná, 2000.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Guia para identificação dos principais solos do Estado do Paraná**. Rio de Janeiro: Serviço nacional de levantamento e conservação de solos. 1986. 36 p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Serviço nacional de levantamento e conservação de solos (Rio de Janeiro, R.J.)**. Levantamento do reconhecimento dos solos do Estado do Paraná. Curitiba: Embrapa-SNLCS/SUDESUL/IAPAR, vol.1, 1984. 414 p.

ENGEL, T.; HOOGENBOOM, G.; JONES, J.W.; WIKENS, P.W. AEGIS/WIN: A computer program for the application of crop simulation models across geographic areas. **Agronomy Journal**, v.89, p. 919-928, 1997.

ENGEL, T.; JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G.; WIKENS, P.W. Agricultural and environmental geographic information system for windows. In.: HOOGENBOOM, G.; WILKENS, P.W.; TSUJI, G.Y. (Eds.) **DSSAT version 3, v.4**, Honolulu: University of Hawaii, 1999, p. 111-158.

Environmental System Research Institute (ESRI). **Introduction to ArcView GIS**. ESRI, Redlands: ESRI, 1998. 420 p.

FAO. **Land and water digital media series**. Rome: FAO, 1997.

FAO. **Water for life**. World Food Day 1994, Rome: FAO, 1994.

FARIA, R.T. de; MADRAMOOTOO, C.A.; BOISVERT, J.; PRASHER, S. Comparison of SWACROP and Versatile Soil Moisture Budget models in Brazil. **Canadian Agriculture Engineering**, v.36, n.2, p. 1-12, 1994.

FARIA, R.T. de; OLIVEIRA, D. de; FOLEGATTI, M.V. Determination of a long-term optimal irrigation strategy for dry beans in Paraná, Brazil. **Scientia Agricola**, v.54, p.155-164. 1997a.

FARIA, R.T. de; OLIVEIRA, D. de; FOLEGATTI, M.V. Simulação da fenologia e produção do feijoeiro pelo modelo BEANGRO. In.: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 10, Piracicaba, 1997. **Anais** Piracicaba: ESALQ, 1997, p. 140-142.

FEE, R. Brazilian farmers converting pasture to soybeans. **Successful Farming**, v. 96, n.10, 1998, p. 44B-44C.

FNP Consultoria & Comércio. **Agrianual: 98 Anuário da Agricultura Brasileira**. São Paulo, 1998. 525 p.

- FRIZZONE, J.A.; BOTREL, T.A.; FREITAS, H.A.C. Análise comparativa dos custos de irrigação por pivô central em cultura do feijão, utilizando energia elétrica e óleo diesel. **Engenharia Rural**, v.5, n.1, p. 24-53, 1994.
- GARRISON, M.V.; BATCHELOR, W.D.; KANWAR, R.S.; RITCHIE, J.T. Evaluation of the CERES-Maize water and nitrogen balances under tile-drained conditions. **Agricultural Systems**, v.62, p. 189-200, 1999.
- GEORGIEV, G.A.; HOOGENBOOM, G.; RAGUPATHY, K. Regional yield estimation using a linked geographic information system, crop growth models and a weather network. In.: PROCEEDINGS OF THE INSTITUTE OF BIOLOGICAL ENGINEERING, 1, Athens, 1998. **Proceedings** Athens: IBE Publication, 1998. p. 135-145.
- GODWIN, D.C.; SINGH, U. Nitrogen balance and crop response to nitrogen in upland and lowland cropping systems. In.: TSUJI, G.Y.; HOOGENBOOM, G.; THORNTON, P.K. (Eds.) **Understanding options for agricultural production**, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998. p. 41-54.
- HARTKAMP, A.D.; WHITE, J.W.; HOOGENBOOM, G. Interfacing Geographic information systems with Agronomic Modeling: A Review. **Agronomy Journal**, v.91, 1999a. p. 761-772.
- HARTKAMP, A.D; BEURS, K. de; STEIN, A.; WHITE, J.W. **Interpolation techniques for climate variables**. Mexico: CIMMYT, 1999b. 26p. (NRG-GIS Series 99-01).
- HEINEMANN, A. B.; HOOGENBOOM, G. Optimization of the capacity of center pivot irrigation systems based on dry bean model CROPGRO. **Bean Improvement Cooperative**, v.43, 2000, p.132-133.
- HOOGENBOOM, G. Future of CANEGRO in the DSSAT suite of models. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CANEGRO WORKSHOP, DURBAN, 4-7 OF AUGUST 2000. **Proceedings** Durban: SASEX, 2000, p. 1-5.

HOOGENBOOM, G.; JONES, J. W.; WILKENS, P. W.; BATCHELOR, W. D.; BOWEN, W. T.; HUNT, L. A.; PICKERING, N. B.; SINGH, U.; GODWIN, D. C.; BAER, B.; BOOTE, K. J.; RITCHIE, J. T.; WHITE, J. W. Crop models. In: TSUJI, G. Y.; UEHARA, G.; BALAS, S. (Eds.) **DSSAT version 3, v.2**. Honolulu: University of Hawaii, 1994. p. 95-244.

HOOGENBOOM, G.; WILKENS P.W.; THORNTON P.K.; JONES J.W.; HUNT L.A.; IMAMURA D.T. Decision Support System for Agrotechnology Transfer v.3.5. In: HOOGENBOOM G.; WILKENS P.W.; TSUJI G. Y. (Eds.) **DSSAT, v3, v.4**. Honolulu: University of Hawaii, vol. 4.1, 1999, p. 2 - 36.

HOOGENBOOM, G.; JONES, J.W.; BOOTE, K.J. Modeling growth, development, and yield of grain legumes using SOYGRO, PNUTGRO, and BEANGRO: a review. **Transaction of the ASAE**, v.35, n.6, 1992. p. 2043-2056.

HOOK, J.E.; HARRISON, K.A.; THOMAS, D.L. **Analysis of water use by growers in Southwest Georgia. Report to SW Ga. Agribusiness Assoc. and Ga. Dept. of Nat. Resources**. NESPAL Rep. 98-01, Univ. of Georgia NESPAL, Tifton: University of Georgia, 1998.

HUNT, L.A.; PARARAJASINGHAM, S.; JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G.; IMAMURA, D.T.; OGOSHI, R.M. Gencalc: Software to facilitate the use of crop models for analyzing field experiments. **Agronomy Journal**, v.85, 1993. p. 1090-1094.

IAPAR. **A cultura do milho no Paraná**. Londrina: IAPAR, 1991. 271 p. (Circular 68)

IAPAR. **O feijão no Paraná**. Londrina: IAPAR, 1989. 303 p. (Circular 63)

ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press. 1989, 561 p.

JAGTAP, S.S.; ABAMU, F.J.; KLING, J.G. Long-term assessment of nitrogen and variety technologies on attainable maize yields in Nigeria using CERES-maize. **Agricultural Systems**, v.60, p. 77-86, 1999.

JENSEN, M.E.; BURMAN, R.D.; ALLEN, R.G. **Evapotranspiration and irrigation water requirements**. New York: ASCE, 1990, 332 p. (ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70).

JONES, J.W.; TSUJI, G.Y.; HOOGENBOOM, G.; HUNT, L.A.; THORNTON, P.K.; WILKENS, P.W.; IMAMURA, D.T.; BOWEN, W.T. Decision support system for agrotechnology transfer: DSSAT v3. In: TSUJI, G.Y.; HOOGENBOOM, G.; THORNTON, P.K. (Eds.) **Understanding options for agricultural production**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998. p. 157-177.

JONES, J.W.; HUNT, L.A.; HOOGENBOOM, G.; THORNTON, P.K.; WILKENS, P.W., IMAMURA, D.T., BOWEN, W.T.; BOOTE, K.J.; RITCHIE, J.T. Input and output files. In: TSUJI, G. Y., UEHARA, G., BALAS, S. (Eds.) **DSSAT version 3, v.2**. Honolulu: University of Hawaii, 1994. p. 1-93.

JONES, J.W.; RITCHIE, J.T. Crop growth models. In: HOFFMAN, G.J.; HOWELL, T.A.; SOLOMON, K.H. (Eds.) **Management of farm irrigation systems**. St. Joseph: ASAE, 1990. p. 63-89.

KEATING, B.; GRACE, P. Using biophysical simulation models to assess the performance of agricultural systems in risky environments. In: PROCEEDINGS OF RISK MANAGEMENT FOR MAIZE FARMERS IN DROUGHT-PRONE AREAS OF SOUTHERN AFRICA, KADOMA RANCH, Zimbabwe, 1-3, October 1997. **Proceedings** Mexico: CIMMYT, 1997. p. 67-81.

LAING, D.R.; JONES, P.G.; DAVIS, J.H.C. Common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). In: GOLDWORTHY, P.R.; FISHER, N.M. (Ed.) **The physiology of tropical field crops**. New York: John Wiley and Sons, 1984. p. 305-351.

LAL, H.; HOOGENBOOM, G.; CALIXTE, J.P.; JONES, J.W.; BEINROTH, F.H. Using crop simulation models and GIS for regional productivity analyses. **Transactions of the ASAE**, v.36, n.1, p. 175-184, 1993.

LAL, R. Soil management in development countries. **Soil Science**, v.161, n.1, p. 57-72, 2000.

- LANTMANN, A.F.; OLIVEIRA, M.C.N. de; ROESSING, A.T.; SFREDO, G.J. Productivity of wheat following now-fertilized soybean in a dystrophic dusky red latosol. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.32, n.3, p. 257-265, 1997.
- LEGATES, D.R.; WILLMONT, C.J. Mean seasonal and spatial variability in global surface air temperature. **Theoretical Application in Climatology**, v.41, p. 11-21, 1990.
- MACROBERT J.F.; SAVAGE, M.J. The use of crop simulation model for planning wheat irrigation in Zimbabwe. In: TSUJI, G.Y.; HOOGENBOOM, G.; THORNTON, P.K. (Eds.) **Understanding options for agricultural production**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998. p. 41-54.
- MARACCHI, G.; PERARNAUD, V.; KLESCHENKO, A.D. Applications of geographic information systems and remote sensing in agrometeorology. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.103, p. 119-136, 2000.
- MARTIN, E.C.; RITCHIE, J.T.; LOUDON, T.L. Use of the CERES-maize model to evaluate irrigation strategies for humid regions. In: **Advances in evapotranspiration: PROCEEDINGS OF THE NATIONAL CONFERENCE ON EVAPOTRANSPIRATION**. Chicago, 1985. **Proceedings** St. Joseph: ASAE, 1985. p. 342-350.
- MATTHEWS, R.; STEPHENS, W.; HESS, T.; MASON, T.; GRAVES, A. **Applications of crop/soil simulation models in developing countries**. Final Report. Institute of Water and Environment, Silsoe, Bedfordshire: Cranfield University, 2000. 173 p.
- OLIVEIRA, de D.; VILLA NOVA, N. A. Maximum evapotranspiration and irrigation requeriments for beans (*Phaseolus vulgaris*, L) in Paraná State, Brasil. **Revista Brasileira de Agricultura**, Santa Maria, v.4, n.1, p. 29-36, 1996.
- PASSIOURA, J.B. Simulation models: science, snake oil, education or engineering? **Agronomy Journal**, v.88, n.5, p. 690 – 694, 1996.

- PENNING de VRIES, F.W.T. Can crop models contain economic factors? In: RABBINGE, R.; GOUDRIAAN, J.; van KEULEN H.; PENNING de VRIES, F.W.T. (Eds.). **Theoretical Production Ecology: reflection and prospects**. Wageningen: Pudoc, 1989. p. 89-103. (Simulation Monographs)
- PEREIRA, L.S.; PERRIER, A.; ALLEN, R.G.; ALVES, I. Evapotranspiration: review of concepts and future trends. In: CAMP, C.R.; SADLER, E.J.; YODER, R.E. (Eds.) **Evapotranspiration and irrigation scheduling PROCEEDINGS OF INTERNATIONAL CONFERENCE, NOVEMBER 3-6, SAN ANTONIO, 1996 Proceedings** St. Joseph: ASAE, 1996, p. 109 – 117.
- PORTER, C.H.; JONES, J.W.; HOOGEMBOOM, G.; WILKENS, P.W.; RITCHIE, J.T.; PICKERING, N.B.; BOOTE, K.; BAER, B. **Modularization of Soil Water Balance (WATBAL)**, Draft. Gainesville: University of Florida, 1998, 130p.
- PRIESTLEY, C.H.B.; TAYLOR, R.J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. **Monthly Weather Review**, v.100, p. 81-92, 1972.
- QUEIROZ, E. F.de; GAUDENCIO, C. de A.; GARCIA, A.; TORRES, E.; OLIVEIRA, M. C. N. de. Effect of planting date on soybean yield in north of Paraná region, Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.33, n.9, p. 1461-1474, 1998.
- QUEIROZ, J.E.; CALHEIROS, C.B.M.; PESSOA, P.C.S.; FRIZZONE, J.A. Estratégias ótimas de irrigação do feijoeiro: terra como fator limitante de produção. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.31, n.1, p. 56-61, 1996.
- RITCHIE, J. T. A user-orientated model of the soil water balance in wheat. In: DAY, W.; ATKIN, R.K. (Eds.) **Wheat Growth and Modeling**. New York: Plenum Publishing. 1985. p. 293-305.
- RITCHIE, J. T. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. **Water Resources Research**, v.8, p. 1204-1213, 1972.
- RITCHIE, J.T. Soil water balance and plant water stress. In: TSUJI, G.Y., HOOGENBOOM, G.; THORNTON, P.K. (Eds.) **Understanding options for agricultural production**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998. p. 41-54.

- RITCHIE, J.T.; SINGH, U.; GODWIN, D.C.; BOWEN, W.T. Cereal growth, development and yield. In.: TSUJI, G.Y.; HOOGENBOOM, G.; THORNTON, P.K. (eds.) **Understanding options for agricultural production**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998. p. 41-54.
- SAAD, A.M. O déficit de irrigação como estratégia de manejo da água em feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.). Piracicaba, 1996. 147p., Tese (Doutorado), Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- SINCLAIR, T. R.; SELIGMAN, N.a.G. Crop modeling: from infancy to maturity. **Agronomy Journal**, v.88, n.5, p. 698-703, 1996.
- SINGH, S.P.; GEPTS, P.; DEBOUCK, D.G. Races of common bean (*Phaseolus vulgaris* F.). **Economy Botanic**, v.45, n.3, p. 379-396, 1991.
- SMITH, M. The application of climatic data for planning and management of sustainable rainfed and irrigated crop production. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.103, p. 99-108, 2000.
- SMITH, R.C.G.; STEINER, J.L.; MEYER, W.S.; ERSKINE, D. Influence of season to season variability in weather on irrigation scheduling of wheat: a simulation study. **Irrigation Sciency**, v.6, p. 241-251. 1985.
- SOIL CONSERVATION SERVICE. **National Engineering handbook Section 4: Hidrology**, Washington: Soil Conservation Service, USDA. 1985.
- SOUZA, V.; PEREIRA, L.S. Regional analysis of irrigation water requirements using kriging. Application to potato crop (*Solanum tuberosum* L.) at Tras-os-Montes. **Agricultural Water Management**, v.40, p. 221-233, 1999.
- STALLINGS, HUFFMAN, C. R. L.; KHORRAM, S.; GUO, Z. Linking Gleams and GIS. **ASAE Paper 92-3613**. St. Joseph: ASAE, 1992.
- THORNTON, P.K.; BOOLTINK, H.W.G.; STOORVOGEL, J.J. A computer program for geostatistical and spatial analysis of crop model output. **Agronomy Journal**, v.89, p.620-627, 1997.

- THORNTON, P.K.; HOOGENBOOM, G. A computer program to analyze single-season crop model outputs. **Agronomy Journal**, v.89, n.1, p. 131-136, 1994.
- THORNTON, P.K.; HOOGENBOOM, G.; WILKENS, P.W.; BOEWN, W.T. A computer program to analyze multiple-season crop models outputs. **Agronomy Journal**, v.87, n.1, p. 131-139, 1995.
- TOMMASELLI, J.T.G.; VILLA NOVA, N.A. Corn sowing dates as a function of soil water deficits at Cambara, PR., Brasil. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, Brasília, v.30, n.4, p. 505-514, 1995.
- TSUJI, G.Y.; HOOGENBOOM, G., THORNTON, P.K. **Understanding options for agricultural production**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998. 400 p.
- TSUJI, G.Y.; UEHARA, G.; BALAS, S. (Eds.). **DSSAT version 3**. Honolulu: University of Hawaii, 1994. 243p.
- UEHARA, G.; TSUJI, G.Y. Overview of IBSNAT. P.1-7. In.: TSUJI, G.Y., HOOGENBOOM, G., THORNTON, P.K. (Eds.) **Understanding options for agricultural production**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998. p. 1-7.
- VILLALOBOS, F.J.; FERERES, E. A simulation model for irrigation scheduling under variable rainfall. **Transection of the ASAE**, v.32, n.1, p. 181-18, 1989.
- WHITE, J.W.; HOOGENBOOM, G.; JONES, J.W.; BOOTE, K.J. Evaluation of the dry bean model BEANGRO v1.01 for crop production research in a tropical environment. **Exploration Agriculture**, v.31, p. 241-254, 1995.
- WILLIAMS, J.R. Runoff and water erosion. In.: HANKS, R.J.; RITCHIE, J.T. (Eds.) **Modeling plant and soil systems**. Madison: American Society of Agronomy 1991. p. 439-455. (Agronomy monograph #31)
- Zoneamento Agrícola. **Zoneamento Agrícola do estado do Paraná, safra 98/99**. Brasília: Cordenação Nacional do Zoneamento Agrícola, Esplanada dos Ministérios, 2000. 20p.