

**FAPEMIG**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA**  
Departamento de Engenharia Agrícola

**SISTEMA PARA MANEJO DA ÁGUA EM ÁREAS  
IRRIGADAS E ESTIMATIVA DO RENDIMENTO DE  
CULTURAS AGRÍCOLAS**

**(CAG 2585/97)**

VIÇOSA  
FEVEREIRO DE 2001

**FAPEMIG**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA**  
Departamento de Engenharia Agrícola

**SISTEMA PARA MANEJO DA ÁGUA EM ÁREAS  
IRRIGADAS E ESTIMATIVA DO RENDIMENTO DE  
CULTURAS AGRÍCOLAS**

**(CAG 2585/97)**

Equipe:

Gilberto C. Sedyama (Líder)  
Brauliro G. Leal  
Everardo C. Mantovani  
Luis Cláudio Costa  
Leacir N. Bastos

VIÇOSA  
FEVEREIRO DE 2001

# CONTEÚDO

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVOS .....	4
3. REVISÃO DE LITERATURA .....	5
3.1. Modelo de Stewart .....	5
3.2. Modelo de Mantovani.....	6
3.3. Coeficiente de resposta da cultura (ky) .....	8
3.4. Produtividade máxima da cultura (Ymp) .....	9
3.4.1. Método de Wageningen.....	11
3.4.1.1. Correção para Tipo de Cultura (K).....	12
3.4.1.2. Índice de Colheita (cH) .....	12
3.4.1.3. Correção para Temperatura (cT) .....	12
3.4.1.4. Produção da matéria seca da cultura padrão (Yo).....	13
3.4.1.5. Correção para o Clima $\frac{ETm}{ea - ed}$ .....	14
3.4.2. Método da Zona Agroecológica .....	16
3.4.2.1. Correção em função do desenvolvimento da cultura e área foliar (cL).....	16
3.4.2.2. Correção para a produção de matéria seca (cN).....	17
3.4.2.3. Correção para Temperatura (cT) .....	17
3.4.2.4. Taxa de Produção de Matéria Seca de Folhas (ym) .....	18
3.5. Estimativa da evapotranspiração máxima da cultura (ETm).....	18
3.6. Estimativa da Evapotranspiração da Cultura (ETr).....	23
3.7. Balanço Hídrico .....	
3.8. Produtividade da Cultura .....	30
3.9. Cálculo de Cd .....	30

3.10. Cálculo de p .....	30
4. PROCEDIMENTO DE CÁLCULOS .....	31
4.1. Equações alternativas .....	31
4.2. Aplicativo computacional.....	32
4.3. Condições iniciais e cálculos dos valores diários.....	32
4.4. Produtividade potencial da cultura .....	32
4.5. Produtividade da cultura.....	33
4.6. Erro relativo percentual .....	33
5. MATERIAL E MÉTODOS .....	35
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	38
6.1. Duração do ciclo da cultura .....	38
6.2. Produtividade potencial da cultura .....	40
6.2.1. Método de Wageningen.....	40
6.2.2. Método da zona agroecológica .....	42
6.3. Produtividade real da cultura.....	44
6.3.1. Modelo de Stewart.....	44
6.3.1.1. Simulação do Plantio com Irrigação .....	44
6.3.1.2. Simulação do Plantio sem Irrigação.....	48
6.3.2. Modelo de Mantovani .....	51
6.3.2.1. Simulação do Plantio com Irrigação .....	51
6.4. Discussão dos Resultados .....	55
6.4.1. Melhores valores do ERP para plantios com irrigação .....	55
6.4.2. Melhores valores do ERP plantios sem irrigação.....	57
7. RESUMO E CONCLUSÕES .....	60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62
APÊNDICES.....	64

## EXTRATO

Foram avaliados os modelos de Stewart e Mantovani para estimativa da produtividade das culturas de milho, soja, sorgo e trigo; o primeiro modelo foi avaliado com e sem irrigação e o segundo foi apenas com irrigação. A simulação de plantio foi feita para as localidades mineiras de Capinópolis e Montes Claros, nas datas de 20/11/1995 e 20/04/1996. O uso destes modelos requer dados de produtividade potencial da cultura, a qual pode ser obtida por meio dos métodos da Zona Agroecológica e de Wageningen. O método de cálculo da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) foi o de Penman-Monteith. O total da evapotranspiração máxima da cultura durante seu ciclo (ET<sub>m</sub>) foi calculado a partir dos valores diários de ET<sub>o</sub> e do coeficiente de cultura (k<sub>c</sub>). A evapotranspiração da cultura (ET<sub>r</sub>) foi calculada pelo modelo de Rijtema e Aboukhaled, obtida a partir do balanço hídrico diário por camada de solo. A duração do ciclo das culturas de milho e soja tenderam a ser maiores em Montes Claros do que em Capinópolis. A estimativa da produtividade potencial das culturas de milho, sorgo e trigo, utilizando o método de Wageningen foi proporcional a produção de matéria seca total da cultura padrão que, por sua vez, foi diretamente proporcional a radiação de ondas curtas. A temperatura também influenciou nesses resultados, principalmente, na duração do ciclo da cultura. No método da Zona Agroecológica, também utilizado par o cálculo da produtividade potencial, a influência da temperatura também pode ser notada principalmente na duração do ciclo da cultura. O modelo de Stewart, usado para a estimativa da produtividade das culturas de milho, soja, sorgo e trigo com e sem irrigação, dependeu apenas da produtividade potencial da cultura uma vez que para o mesmo local e data de plantio os valores de k<sub>y</sub> e ET<sub>r</sub>/ET<sub>m</sub> foram iguais. O valor de k<sub>y</sub> variou em função da data e local de plantio devido à variação da duração do ciclo da cultura. Na simulação do plantio com irrigação, praticamente não houve variação da razão ET<sub>r</sub>/ET<sub>m</sub> para as datas e locais simulados. Já na simulação do

plântio com irrigação, a razão  $E_{Tr}/E_{Tm}$  variou em função da data e local de plântio devido à variação do total da precipitação efetiva durante o ciclo da cultura. O modelo de Mantovani, usado para a estimativa da produtividade das culturas de milho, soja, sorgo e trigo com irrigação, dependeu apenas da produtividade potencial da cultura uma vez que para o mesmo local e data de plântio os valores de  $k_y$  e  $C_d$  foram iguais. O valor de  $k_y$  variou em função da data e local de plântio devido à variação da duração do ciclo da cultura. O valor de  $p$  variou em função da data e do local de plântio devido à variação do total da precipitação efetiva durante o ciclo da cultura. O valor de  $C_d$  variou em função da data e do local de plântio devido a variação em razão das lâminas bruta aplicada e requerida durante o ciclo da cultura. Os modelos de Stewart e de Mantovani são igualmente indicados para estimar a produtividade das culturas de milho, soja, sorgo e trigo com irrigação. A combinação entres os modelos de Stewart ou de Mantovani com o método da Zona Agroecológica foi o que estimou melhor a produtividade das culturas do milho, soja, sorgo e trigo com irrigação. De um modo geral, o modelo de Stewart combinado com os métodos de Wageningen e da Zona agroecológica, tendeu a superestimar a produtividade das culturas nos plântios sem irrigação em Capinópolis e em Montes Claros.

## 1. INTRODUÇÃO

A nova ordem econômica, com a globalização da economia, dá lugar à competitividade de produtos e serviços em escala mundial. O setor agrícola está sujeito à essas influências e, como consequência, para garantir a competitividade dos seus produtos, requer uma adequada estimativa das suas receitas e custos de suas cadeias produtivas.

A produtividade das culturas agrícolas é uma etapa importante destas cadeias, uma vez que ela é a fonte primária da receita no campo.

Diversos modelos para a estimativa da produtividade de culturas agrícolas tem sido propostos, dentre eles, destacam-se o de Stewart e o de Mantovani (DOORENBOS e KASSAM, 1979; MANTOVANI, 1993), cuja principal vantagem é a aplicabilidade em nível mundial visto que se baseiam na relação linear entre a produtividade e a evapotranspiração das cultura.

A produtividade de uma cultura é função de complexos processos biológicos, fisiológicos, físicos e químicos. Esses processos são determinados pelas condições ambientais: clima, solo, água, e por fatores genéticos da própria cultura (DOORENBOS e KASSAM, 1979).

Um grande número de pesquisas tem sido feitas com o objetivo de relacionar o suprimento de água com a produtividade das culturas agrícolas englobando ampla faixa de condições climáticas. Os resultados dessas pesquisas têm sido usados para formular modelos empíricos que possam estimar a produtividade de culturas e que também possam subsidiar o planejamento, o projeto e o manejo da água em áreas irrigadas.

Stewart, citado por DOORENBOS e KASSAM (1979), formulou um modelo que relaciona a produtividade da cultura com a evapotranspiração. Esse modelo utiliza, como dados de entrada, a produtividade máxima ou potencial da cultura, o coeficiente de resposta da cultura e os totais das evapotranspirações máxima e da cultura durante seu ciclo.

MANTOVANI (1993) incorporou ao modelo de Stewart variáveis relacionadas ao manejo e critérios de decisão quanto à irrigação. O modelo de Mantovani relaciona a produtividade da cultura com a água de irrigação e com a uniformidade de aplicação. Ele foi desenvolvido a partir do modelo de Stewart e utiliza como dados de entrada a produtividade máxima da cultura, o coeficiente de resposta da cultura, o coeficiente de déficit e a fração da evapotranspiração máxima da cultura, durante seu ciclo fenológico, suprida por outras fontes de água diferentes da irrigação.

A produtividade máxima de uma cultura é um dado requerido para os modelos de Stewart e Mantovani. De Wit (1965) criou o conceito de cultura padrão, o qual tem sido utilizado por vários modelos de produtividade máxima ou potencial de culturas agrícolas desde então. Esse conceito fundamenta-se no crescimento e desenvolvimento de uma cultura num ambiente com propriedades padronizadas durante todo o seu ciclo.

Slabbers (1978), citado por DOORENBOS e KASSAM (1979), propôs um modelo o qual ele denominou de 'modelo linear'. Este modelo relaciona de maneira simplificada a água com a produtividade das culturas de alfafa, milho, sorgo e trigo. O 'modelo linear', juntamente com o conceito de cultura padrão de

De Wit, fundamenta o Método de Wageningen. O Método de Wageningen tem como hipótese básica a de que a produção máxima de matéria seca de uma cultura ocorre com a evapotranspiração máxima. A produtividade potencial de uma cultura, em dado clima, é calculado a partir da cultura padrão, utilizando dados de radiação solar e evapotranspiração. Sua aplicação às culturas se faz por meio de parâmetros que dependem da cultura, da temperatura, da eficiência de crescimento (respiração), da relação entre a parte colhida e a produtividade final; e do clima.

Kassam e Doorenbos (1977), citado por DOORENBOS e KASSAM (1979), apresentaram um modelo que, também, com o conceito de cultura padrão de De Wit, se tornou o precursor do método da Zona Agroecológica. O método da Zona Agroecológica utiliza o conceito de taxa de produção de matéria seca de folhas. A produtividade potencial para dado clima é obtida a partir da cultura padrão, utilizando dados de radiação solar e temperatura. Sua aplicação às culturas se faz por meio de parâmetros que dependem da cultura, da temperatura, do índice de área foliar, da relação entre a parte colhida e a produtividade final, da produção de matéria seca de folhas e do clima.

Várias instituições têm procurado desenvolver e, ou, avaliar modelos para aplicação em nível mundial. O Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI) de Wageningen, Holanda, avaliou o método de Wageningen. A “Food And Agriculture Organization” of the United Nations (FAO) promoveu o projeto Zona Agroecológica o qual deu origem ao método de mesmo nome.

Uma característica comum a todos esses modelos é a sua complexidade, uma vez que eles utilizam cálculos envolvendo variáveis, equações, tabelas e parâmetros que podem dificultar sua aplicação prática.

No Brasil e, particularmente, em Minas Gerais, os modelos anteriormente citados não foram avaliados para suas condições de clima e solo.

Para contornar as dificuldades decorrentes do uso de modelos foi desenvolvido um aplicativo computacional para a estimativa da produtividade de culturas agrícolas usando os modelos citados. Utilizando-se deste aplicativo

computacional esses modelos foram avaliadas para as condições Mineiras e os seus resultados foram contrastados com os dados do IBGE, safra 1995/1996, e também com as produtividade de culturas sugeridas pela FAO.

## 2. OBJETIVOS

Conforme as considerações anteriores, o presente trabalho teve como objetivos:

- 2.1. desenvolver física e logicamente um aplicativo computacional voltado à estimativa da produtividade de culturas usando os modelos de Stewart e de Mantovani;
- 2.2. utilizando-se de dados de produtividade das culturas de milho, soja, sorgo e trigo obtidos na safra agrícola 1995/1996 (dados do IBGE), avaliar os modelos citados regiões de Minas Gerais em condições não irrigadas; e
- 2.3. utilizando-se de dados de produtividade das culturas de milho, soja, sorgo e trigo sugeridos pela FAO, avaliar os modelos citados para Minas Gerais para condições irrigadas.

## 3. REVISÃO DE LITERATURA

### 3.1. Função de Produtividade

Em termos gerais, o conceito de função de produtividade refere-se à relação existente entre a resposta de uma cultura a um determinado fator (fertilizante, água, salinidade, dentre outros). Assim, uma função de produtividade em relação à água, relaciona a produtividade total de matéria seca, ou de matéria colhida da cultura, com a transpiração, evapotranspiração ou quantidade de água aplicada por meio da irrigação.

O conhecimento de tais relações é de fundamental importância para a) relacionar a produção vegetal, de frutos ou de semente com transpiração, evapotranspiração e aplicação da água de irrigação; b) promover informações para projetos de sistemas de irrigação; c) promover informações para o manejo de água; d) considerar a influência de práticas culturais como a fertilização sobre a produção e ETr; e e) realizar análises econômicas de alternativas de manejo de água (BURMAN e POCHOP, 1994; MANTOVANI, 1993).

Segundo MANTOVANI (1993) a base fisiológica das funções de produção se fundamenta no princípio de que a fotossíntese e a transpiração são processos de intercâmbio de gases entre a cultura e a atmosfera, os quais ocorrem pelas mesmas vias, mas em sentidos opostos. Qualquer alteração num destes processos deve afetar o outro.

VAUX et al. (1981) classificam os efeitos do déficit de água no crescimento e desenvolvimento das culturas em duas categorias: morfológica e fisiológica. Entre os efeitos morfológicos, a divisão celular e a expansão do crescimento celular são os mais importantes, sendo a divisão celular menos sensível ao déficit de água que a expansão celular. Uma importante consequência da sensibilidade da expansão das células ao déficit de água é a acentuada redução

da área foliar nas plantas. Os autores também enfatizam o efeito do déficit de água nos processos fisiológicos associados com a produtividade das plantas, tais como: comportamento estomatal, fotossíntese, respiração, translocação e metabolismo.

Hisiao (1973), citado por VAUX et al. (1981), considerou dois níveis de severidade ao déficit de água: a) o déficit de água é muito fraco para fechar o estômato e inibir a fotossíntese, embora suficientemente grande para afetar os outros parâmetros (nesse caso a área foliar poderá ser reduzida como consequência da baixa expansão celular e afetar temporariamente a assimilação total do  $\text{CO}_2$ ); e b) o déficit de água é bastante severo, resultando na queda do potencial de água na planta, abaixo do nível limite permitido, provocando o fechamento dos estômatos e reduzindo, de forma permanente, a assimilação do  $\text{CO}_2$ . Tais respostas são dependentes da densidade, do espaçamento de plantio e do tempo de ocorrência das condições de déficit de água.

Segundo BURMAN e POCHOP (1994) as equações que, fundamentadas em bases teóricas, relacionem a produção biológica com a evapotranspiração são desconhecidas. Contudo, são conhecidas fórmulas empíricas que relacionam produção vegetativa com evapotranspiração ou água de irrigação aplicada e podem ser definidas como Água como Função de Produção de Culturas (Crop Water Production Function - CWPF).

### **3.2. Modelos de Função de Produtividade**

Diferentes pesquisadores têm desenvolvido trabalhos em busca de determinar a relação água-produtividade das culturas. Os primeiros trabalhos consideraram apenas a quantidade de água transpirada pelas plantas. Esses trabalhos levaram à conclusão de que a transpiração e, conseqüentemente, a necessidade de água das culturas, é proporcional a evaporação de uma superfície água-livre ( $E_0$ ). Analisando tais trabalhos, De Wit (1958), citado por HEXEM e HEADY (1978), chegou à conclusão de que essa relação depende das diferentes

culturas e independe, de forma relativa, da fertilidade do solo, das condições de clima e do tamanho da planta. Tais observações levaram a estabelecer uma expressão relacionando a produtividade com o uso da água em regiões semi-áridas (Equação 1).

$$Yr = m \frac{T}{Eo} \quad \text{Eq.1}$$

em que,

Yr = produção de matéria seca;

m = fator da cultura (depende da cultura e variedade);

T = transpiração da cultura; e

Eo = evaporação da água numa superfície de água-livre (potencial).

Para regiões semi-úmidas, onde a radiação solar é um fator limitante, De Wit sugeriu a Equação 2, em que n é um fator da cultura, sendo 610, 340 e 260 para beterraba, ervilha e aveia, respectivamente.

$$Yr = nT \quad \text{Eq. 2}$$

A determinação do valor de n durante vários anos consecutivos mostrou que ele varia de ano para ano. Assim, para anos quentes, o valor do fator era baixo, enquanto que, em anos mais frios, o coeficiente era maior.

Em termos gerais, os modelos que descrevem a relação que caracteriza a resposta da cultura a um determinado fator podem ser classificados como: fisiológicos, empíricos e de otimização econômica.

### **3.2.1. Modelos fisiológicos**

A produtividade da cultura pode resultar de uma interação complexa de muitos processos fisiológicos, cada qual sendo afetado, de modo diferente, pelo déficit de água na planta. Com base em estudos fisiológicos, De Wit (1965), citado por PENNING de VRIES et al. (1989), propôs uma equação para determinar a taxa de produtividade potencial diária de matéria seca em cada estágio de crescimento da cultura (Equação 3).

$$Y_m = F y_o + (1 - F) y_c \quad \text{Eq. 3}$$

em que,

- $Y_m$  = produtividade potencial;
- $y_o$  = produtividade nos dias nublados;
- $y_c$  = produtividade nos dias claros; e
- $F$  = fração de duração do dia em que o céu está encoberto.

Machado (1981), citado por LEME (1993), ao desenvolver um modelo matemático fisiológico para a cana de açúcar em Araras - SP, observou que o comportamento teórico das taxas de fotossíntese bruta, líquida e de respiração em função do índice de área foliar, determinado por simulação, apresentou resultados consistentes com os obtidos experimentalmente. Observou, ainda, que a taxa de fotossíntese líquida inicialmente aumenta com índice de área foliar atingindo um máximo para depois diminuir suavemente, podendo ser representado pela equação válida a partir de 86 dias de idade da cultura (Equação 4). A partir desse trabalho, o autor desenvolveu um modelo para simular o acúmulo de matéria seca na cultura da cana de açúcar com base em informações meteorológicas, fotossíntese e respiração total. O modelo é representado pela Equação 5.

$$IAF = \frac{370,8}{t} e^{3,9615 - 0,02494 t} \quad \text{Eq. 4}$$

em que,

IAF = índice de área foliar; e

$t_l$  = o período de tempo em dias.

$$P = \frac{5389,5}{t} e^{5,6609 - 0,08174 t} \quad \text{Eq. 5}$$

em que,

P = matéria seca total.

### 3.2.2. Modelos empíricos

Os modelos fisiológicos em geral envolvem muitos fatores como, por exemplo, os genético e ambiental. Dessa forma, dificultam suas utilizações para fins práticos. Por essa razão, as funções de produção empíricas ou semi-empíricas tem sido geradas para estabelecer critérios de planejamento e manejo da irrigação das culturas.

Os modelos empíricos ou semi-empíricos normalmente relacionam a produtividade da cultura e o teor de umidade do solo (ou tensão de umidade do solo), à evapotranspiração (ou transpiração) e à quantidade de água aplicada pela irrigação.

Tem sido evidenciado, por muitos pesquisadores, que sempre que a evapotranspiração real da cultura (ET<sub>r</sub>) for menor que a evaporação máxima (ET<sub>m</sub>), ocorre o déficit de evapotranspiração, que resulta na redução da produtividade (DOORENBOS e KASSAM, 1979).

Muitos trabalhos têm mostrado que a relação entre a produtividade e a transpiração ou evapotranspiração é linear. HANKS (1974), baseando-se no modelo De Wit (Equação 1), desenvolveu um modelo relacionando a produtividade e a transpiração (Equação 6).

$$\frac{Y_r}{Y_p} = \frac{T}{T_p} \quad \text{Eq. 6}$$

em que,

- Y<sub>p</sub> = produção potencial de matéria seca (máxima);
- Y<sub>r</sub> = produção real de matéria seca;
- T = transpiração real; e
- T<sub>p</sub> = transpiração potencial (máxima).

A validade do modelo tem sido questionada porque a matéria seca e a transpiração podem ter uma alta correlação, mas tem situações onde esta correlação não é válida. O mesmo Hanks propõe outra função de produção para a matéria seca total e para o rendimento, utilizando dados de frequência, lâmina de irrigação, chuvas, e umidade inicial do solo avaliado para milho e sorgo com sucesso. Porém, o modelo apresenta problemas relacionados com a sensibilidade em relação ao conteúdo da água no solo e não considera a uniformidade na aplicação da água (MANTOVANI, 1993). A expressão que relaciona a produção de grão ou matéria seca pode ser representada pela Equação 7.

$$\frac{Y_r}{Y_p} = \prod_{i=1}^n \left( \frac{T_i}{T_{p_i}} \right)^{\lambda_i} \quad \text{Eq. 7}$$

em que,

- Y<sub>p</sub> = produção potencial de matéria seca (máxima);
- Y<sub>r</sub> = produção real de matéria seca;
- T<sub>i</sub> = transpiração real no estágio;

$T_{p_i}$  = **transpiração potencial na estádio i; e**  
 $\lambda_i$  = fator de sensibilidade da cultura no estádio i.

O modelo de Hanks tem como dados de entrada a água disponível, os valores de  $\lambda_i$  obtidos graficamente, dados diários de chuva, números de dias do ciclo da cultura e dos estádios de crescimento, frequência e quantidade da irrigação, evaporação no tanque e a evaporação potencial direta do solo (HANKS, 1974).

Stewart et al. (1977), citados por MANTOVANI (1993), formularam um modelo simples em que a produtividade e a evapotranspiração são consideradas em termos relativos com respeito a seus valores máximos, num intento de generalizar as funções de produtividade (Equação 8). Sendo  $\beta$  uma constante de proporcionalidade ou a declividade da linha reta forçada para passar na origem da equação especificada acima, conhecida como razão de redução de produção.

$$1 - \frac{Y_r}{Y_m} = \beta \left( 1 - \frac{ET}{ET_m} \right) \quad \text{Eq. 8}$$

em que,

$Y_r$  = produtividade real;  
 $Y_m$  = produtividade máxima;  
 $ET$  = evapotranspiração sazonal da cultura;  
 $ET_m$  = evapotranspiração sazonal máxima; e  
 $\beta$  = fator de sensibilidade da cultura ao déficit hídrico ou taxa de redução da produtividade, representada pelo declividade da reta.

Howell et al. (1990), citados por BURMAN e POCHOP (1994), definem  $\beta$  como um fator de proporcionalidade que indica a sensibilidade das culturas ao déficit de água.

DOORENBOS e KASSAM (1979) apresentam valores de  $\beta$  para um estágio de desenvolvimento completo, mas ao mesmo tempo, os autores apresentam valores de  $\beta$  para algumas culturas comerciais em diferentes períodos dentro do estágio de desenvolvimento da cultura.

DOORENBOS e KASSAM (1979), utilizando o modelo de Stewart, determinaram o fator de sensibilidade  $\beta$  para diferentes estágios de várias culturas, ao qual chamaram de  $k_y$ . Eles evidenciaram, de maneira geral, que em termos de ciclo total da cultura, a redução de produtividade é proporcionalmente menor com o acréscimo do déficit de água ( $k_y < 1$ ) para culturas como alfafa, beterraba açucareira, amendoim e girassol; e pode ser muito maior ( $k_y > 1$ ) para culturas como banana, milho e cana de açúcar.

Os valores de  $k_y$ , para diferentes culturas estão baseados na avaliação de inúmeros resultados de pesquisa encontrados na literatura, abrangendo ampla faixa de condições de crescimento. Considerou também o rendimento das culturas conhecidas com respeito à salinidade do solo, profundidade do lençol frático e práticas de manejo de culturas. Com base nos resultados experimentais, é dada a relação para o período total de crescimento e para as diferentes fases de desenvolvimento das culturas.

MANTOVANI (1993) apresentou um modelo combinado que é obtido a partir do modelo de Stewart (Equação 8). O modelo de Mantovani considera o efeito da uniformidade de aplicação da água e utiliza como dados de entrada o coeficiente de uniformidade de Cristhiansen (CU) e o parâmetro de sensibilidade da cultura ao déficit hídrico,  $\beta$ . Ele foi utilizado para definir estratégias ótimas da irrigação por aspersão na cultura de milho num período de 10 anos para Córdoba, Espanha. Sua expressão matemática é a Equação 9.

$$1 - \frac{Y_r}{Y_m} = \beta Cd(1 - p) \quad \text{Eq. 9}$$

em que,

- $Cd$  = coeficiente de déficit, adimensional; e
- $p$  = fração da evapotranspiração máxima da cultura, durante seu ciclo fenológico, suprida por outras fontes de água diferentes da irrigação, adimensional.

O coeficiente de déficit ( $Cd$ ) é um índice relacionado ao manejo de água e ao atendimento da demanda hídrica da cultura pela irrigação. Verifica-se que  $Cd$  apresenta dois componentes, um tecnológico associado à eficiência do manejo e outro estratégico associado à magnitude da lâmina de irrigação a ser aplicada. Seu cálculo é feito utilizando a metodologia de MANTOVANI (1993), descrita pelas Equações 10 e 11.

$$Cd = \begin{cases} \frac{1-a}{2} \left[ 1 - \frac{Hb}{Hr} (2CU - 1) \right], & Hb \geq Hr \\ \frac{Hr - Hb}{Hr}, & Hb < Hr \end{cases} \quad \text{Eq. 10}$$

$$a = \frac{1}{4 - 4CU} \left( 3 - 2CU - \frac{Hr}{Hb} \right) \quad \text{Eq. 11}$$

em que,

- $CU$  = coeficiente de uniformidade de Christiansen, %;
- $Hb$  = lâmina bruta aplicada na cultura durante seu ciclo fenológico, mm; e
- $Hr$  = lâmina requerida pela cultura durante seu ciclo fenológico, mm.

A estimativa das fontes de água para a cultura, exceto a irrigação ( $p$ ), é uma variável relacionada aos fatores edáficos, climáticos e da própria cultura, sendo determinada pela Equação 12 (MANTOVANI, 1993).

$$p = \frac{W + P_{ef} + CF}{ETm} \quad \text{Eq. 12}$$

em que,

- p = contribuições diferentes da irrigação;
- W = água armazenada no solo; e
- PE = precipitação efetiva
- CF = contribuição capilar do lençol freático;
- ETm = evapotranspiração máxima

O valor de p deve ser maior ou igual a zero e menor ou igual a 1.

Segundo LEME (1993) existem muitos outros modelos empíricos ou semiempíricos, que relacionam a produtividade com a evapotranspiração nos diferentes estádios de desenvolvimento das culturas, como por exemplo, o de Howell e Hiler (1975) e o de Blank (1975), Equações 13 e 14, respectivamente.

$$\frac{Y_r}{Y_m} = 1 - \frac{A}{Y_m} \sum_{i=1}^n \alpha \left( 1 - \frac{ET}{ETm} \right)_i^2 \quad \text{Eq. 13}$$

em que,

- A,  $\alpha$  = coeficiente de sensibilidade; e
- i = representa os estádios de crescimento da cultura.

$$\frac{Y_r}{Y_m} = \sum_{i=1}^n A_i \left( \frac{ET}{ETm} \right)_i \quad \text{Eq. 14}$$

em que,

- $A_i$  = coeficiente de sensibilidade para os diferentes estádios,  $\sum A_i = 1$ .

Os modelos citados anteriormente apresentam problemas porque não consideram a uniformidade de aplicação da água de irrigação. Segundo MANTOVANI (1993), tem sido proposto outros modelos como os de Childs e Hanks (1975); de Stern e Bresler (1983); e de Seginer (1978).

O modelo de Childs e Hanks é complexo e considera as propriedades da cultura em condições de salinidade e a uniformidade de aplicação da água de irrigação. O modelo considera o balanço da água no solo, apresentando o inconveniente que exigir muitos dados de entrada.

O modelo de Stern e Bresler permite avaliar a influência da uniformidade de aplicação da água na produção de milho. Seu desenvolvimento foi feito a partir de observações de duas parcelas experimentais homogêneas, que diferiam na textura e nas características hidráulicas do solo. Eles utilizaram funções de autocorrelação para avaliar o efeito conjunto entre lâminas aplicadas e sua redistribuição no solo. Esse trabalho apresenta uma relação entre rendimento relativo ( $Y_r/Y_m$ ) e as lâminas de água sazonais (aplicada e a que proporciona produção nula). A uniformidade da irrigação é um fator empírico derivado da diferença de características hidráulicas dos solos avaliados.

O modelo de Seginer é aplicado aos sistemas de irrigação por aspersão. Ele utiliza um diagrama que relaciona a produção com a uniformidade de aplicação da água e o preço da água. O modelo permite determinar o retorno econômico a partir da lâmina de água aplicada. O inconveniente do modelo é que a sua aplicação requer a produção específica para cada cultura e ambiente.

LEME (1993) cita o trabalho de Aginsky et al. (1988), que formularam a Equação 15 a partir de um modelo multiplicativo, que relaciona a produtividade do milho e a precipitação pluvial para a região de Turquari - RS.

$$Y_r = 20,7 X_1^{0,2} X_2^{0,17} X_3^{0,63} X_4^{0,14} \quad \text{Eq. 15}$$

em que,

$X_i$  = precipitações acumuladas nos períodos 1, 2, 3 e 4; totalizando 120 dias de ciclo.

### 3.2.3. Modelos de otimização econômica

De forma geral, os aspectos econômicos da irrigação relacionados com a função de produção das culturas têm focalizado especificamente a questão da aplicação ótima da água durante o ciclo da cultura. Entretanto, é reconhecido o fato de que o planejamento da irrigação envolve as respostas da planta ao déficit de água em diferentes estádios de crescimento. Os aspectos econômicos envolvidos no planejamento da irrigação requerem, em geral, o uso de técnicas de otimização.

Assim, os estudos econômicos podem incorporar as técnicas de programação dinâmica ou linear para estimar a aplicação ótima de água entre um número discreto de estádios de crescimento. A aplicação dessas técnicas só é possível se tem disponível uma adequada função de produção.

No contexto econômico, a função de produção é formulada pela estimativa de custos e taxas associadas, com cada nível de depleção de umidade do solo durante o ciclo de irrigação. A otimização através da técnica de programação dinâmica dos modelos de função de produção pode ser estabelecida matematicamente conforme propõe Jone (1983), citado por LEME (1993), transformando os modelos numa função objetiva representada pela Equação 16. Esta equação pode ser modificada visando a maximização do retorno líquido (Equação 17).

$$\max \left( \frac{Y_r}{Y_m} \right) = \prod_{i=1}^n \left( \frac{ET}{ETm} \right)_i^{\lambda_i} \quad \text{Eq. 16}$$

$$\max Pe = V Ym \prod_{i=1}^n \left( \frac{ET}{ETm} \right)^{\lambda_i} - \sum_{i=1}^n C_i I_i \quad \text{Eq. 17}$$

em que,

Pe = retorno líquido por hectare;

V = valor unitário da produção da cultura;

C<sub>i</sub> = custo da unidade de água aplicada durante o estágio de crescimento i;

I<sub>i</sub> = quantidade de água aplicada durante o estágio de crescimento i.

CHEN e WALLENDER (1984) apresentam um modelo para simular a produtividade média  $\bar{Y}$  (kg/ha) utilizando como variáveis de entrada a uniformidade e a lâmina de irrigação por aspersão, o valor econômico da produção e os custos da água e equipamento utilizados. Outros custos como mão de obra, bombeamento da água e fertilizantes são assumidos como constantes e não são considerados no modelo. Os custos da uniformidade são ponderados pelos benefícios na produtividade. A produtividade média  $\bar{Y}$  é a soma da lâmina de água aplicada  $X_i$  (cm) em N eventos de irrigação uniforme (Equação 18). Os primeiros três termos desta equação representam a produtividade quando o CU é 100%, e os últimos termos correspondem ao ajuste da produtividade (correção) pela uniformidade.

$$\bar{Y} = a_0 + a_1 \bar{X} - a_2 \bar{X}^2 - a_2 \bar{X}^2 \left( 1 - \frac{CU}{100} \right)^2 \frac{\pi}{2} \quad \text{Eq. 18}$$

Finalmente, é importante salientar que existem trabalhos que, além de relacionar a produtividade com a água consumida pela cultura, consideram o fator nutricional. Os modelos mostrados até aqui assumem que o nível nutricional da cultura é, ao menos, suficiente para não limitar a sua produtividade.

### **3.3. Aplicação de Funções de Produtividade em Diferentes Áreas Geográficas**

O maior resultado, de significância prática, é o problema de aplicar funções de produtividade em diferentes áreas geográficas. Howell et al. (1990), citados por BURMAN e POCHOP (1994), indicaram que métodos de irrigação e práticas de manejo podem influenciar diretamente a distribuição de E (evaporação) e T (transpiração). Portanto, espera-se que o estado da constante de proporcionalidade,  $\beta$ , possa variar. Variações geográficas e culturais em  $\beta$  são considerações importantes.

A ordem de cálculos assume como meta inicial é começar com uma estimativa ou medição da umidade do solo dentro da zona radicular das plantas. A meta final é estimar a ETr do período, proveniente da produção vegetal que pode ser devido à planta, semente ou outra indicação de material vegetativo.

A seguinte ordem de cálculos assume que práticas culturais são baseadas nas práticas recomendadas pela região. As variáveis associadas com as práticas culturais são as seguintes: a) variedade da cultura; b) espaçamento e população de plantas; c) aplicação de fertilizantes; d) controle de ervas daninhas; e e) manejo de inseticidas.

### **3.4. Seleção das Funções de Produtividade**

A firma de consultoria CH2M HILL (1986), citada por BURMAN e POCHOP (1994), sugere quatro possibilidades para ser seguidas na seleção das CWPF. O seguinte procedimento tem sido adotado por CH2M HILL como alternativa para a utilização das CWPF.

- 3.4.1. Selecionar CWPF desenvolvida em pesquisa local;
- 3.4.2. Selecionar CWPF regional;
- 3.4.3. Selecionar CWPF generalizada;

3.4.4. Ajuste de CWPF generalizadas para as condições locais; e

3.4.5. Desenvolvimento de CWPF por meio de entrevista local.

A CH2M HILL recomenda o trabalho de Doorenbos e Kassam (1979) como principal fonte para informações de CWPF generalizadas.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Uma grande quantidade de informações de pesquisa que relacionam o suprimento de água e a produtividade das culturas se encontram disponíveis em forma de modelos. Dentre esses modelos destacam-se o de Stewart e o de Mantovani (DOORENBOS e KASSAM, 1979; MANTOVANI, 1993), os quais têm sido usados no planejamento, no projeto e no manejo da água em áreas irrigadas. O modelo de Stewart relaciona a produtividade da cultura com a evapotranspiração; já o de Mantovani relaciona a produtividade da cultura com a água de irrigação. Ambos são empíricos e fundamentam-se na relação linear entre a produtividade, a evapotranspiração e a irrigação.

### 4.1. Modelo de Stewart

O modelo de Stewart relaciona a produtividade da cultura com a evapotranspiração. Para a estimativa da produtividade da cultura, o modelo utiliza como dados de entrada, a produtividade máxima da cultura, o coeficiente de resposta da cultura, o total da evapotranspiração da cultura durante seu ciclo e o total da evapotranspiração máxima da cultura durante seu ciclo. Sua expressão matemática é a Equação 19, (DOORENBOS e KASSAM, 1979).

$$1 - \frac{Y_r}{Y_{mp}} = k_y \left( 1 - \frac{ET_r}{ET_m} \right) \quad \text{Eq. 19}$$

em que,

$Y_r$  = produtividade real da cultura,  $\text{kg ha}^{-1}$ ;

$Y_{mp}$  = produtividade máxima da cultura,  $\text{kg ha}^{-1}$ ;

$k_y$  = coeficiente de resposta da cultura ao déficit hídrico, adimensional;

$ET_r$  = total da evapotranspiração da cultura durante seu ciclo, mm; e

$ET_m$  = total da evapotranspiração máxima da cultura durante seu ciclo, mm.

Isolando o termo  $Y_r$  da Equação 19, pode-se verificar que a declividade da curva  $Y_r=f(ET_r)$  é  $k_y(Y_{mp}/ET_m)$ . O menor valor de  $Y_r$  é dado pelo coeficiente linear,  $Y_{mp}(1-k_y)$ . Verifica-se de imediato que a produtividade mínima de uma cultura pode não ser nula. Para valores de  $k_y$  menores do que a unidade, paradoxalmente, a planta poderá produzir sem o adequado suprimento de água.

Quanto à declividade de  $Y_r$  no plano  $Y_r \times ET_r$ , verifica-se que a variação da produtividade real é proporcional tanto à parâmetros da cultura ( $k_y$  e  $Y_{mp}$ ) quanto aos fatores climáticos ( $ET_m$  e  $Y_{mp}$ ). Dessa forma, pode-se concluir que o cálculo de  $Y_r$  pode variar de local para local mesmo sob condições ótimas de cultivo.

## 4.2. Modelo de Mantovani

O modelo de Mantovani (MANTOVANI, 1993) relaciona a produtividade da cultura com a água de irrigação e a uniformidade de aplicação. Ele foi desenvolvido a partir do modelo de Stewart. Para a estimativa da produtividade da

cultura o modelo utiliza, como dados de entrada, a produtividade máxima da cultura, o coeficiente de resposta da cultura, o coeficiente de déficit e a fração da evapotranspiração máxima da cultura, durante seu ciclo fenológico, suprida por outras fontes de água diferentes da irrigação. Sua expressão matemática é a Equação 20.

$$1 - \frac{Y_r}{Y_{mp}} = k_y C_d (1 - p) \quad \text{Eq. 20}$$

em que,

- $C_d$  = Coeficiente de déficit, adimensional; e
- $p$  = Fração da evapotranspiração máxima da cultura, durante seu ciclo fenológico, suprida por outras fontes de água diferentes da irrigação, adimensional.

O coeficiente de déficit ( $C_d$ ) é um índice relacionado ao manejo de água e ao atendimento da demanda hídrica da cultura pela irrigação. Verifica-se que  $C_d$  apresenta dois componentes, um tecnológico associado à eficiência do manejo e outro estratégico associado à magnitude da lâmina de irrigação a ser aplicada. Seu cálculo é feito utilizando a metodologia de MANTOVANI (1993), descrita pelas Equações 21 e 22.

$$C_d = \begin{cases} \frac{1-a}{2} \left[ 1 - \frac{H_b}{H_r} (2CU - 1) \right], H_b \geq H_r \\ \frac{H_r - H_b}{H_r}, H_b < H_r \end{cases} \quad \text{Eq. 21}$$

$$a = \frac{1}{4 - 4CU} \left( 3 - 2CU - \frac{H_r}{H_b} \right) \quad \text{Eq. 22}$$

em que,

CU = Coeficiente de uniformidade de Christiansen, %;

Hb = Lâmina bruta aplicada na cultura durante seu ciclo fenológico, mm; e

Hr = Lâmina requerida pela cultura durante seu ciclo fenológico, mm.

A estimativa das fontes de água para a cultura, exceto a irrigação (p), é uma variável relacionada aos fatores edáficos, climáticos e da própria cultura, sendo determinada pela Equação 23 (MANTOVANI, 1993).

$$p = \frac{W + P_{ef} + CF}{ETm} \quad \text{Eq. 23}$$

em que,

W = água armazenada no solo, mm;

P<sub>ef</sub> = total da precipitação efetiva ocorrida durante o ciclo fenológico da cultura, mm; e

CF = contribuição capilar do lençol freático, mm.

O valor de p deve ser maior ou igual a zero e menor ou igual a 1.

### 4.3. Coeficiente de resposta da cultura (ky)

O coeficiente de resposta da cultura (ky) indica a sensibilidade da cultura ao déficit hídrico. DOORENBOS e KASSAM (1979), utilizando o modelo de Stewart, determinaram os valores de ky para o período total de crescimento e para os diferentes estádios de desenvolvimento de várias culturas a partir da avaliação de inúmeros resultados de pesquisa encontrados na literatura, abrangendo ampla

faixa de condições de crescimento. Para as culturas de milho, soja, sorgo e trigo esses valores estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Coeficiente de resposta da cultura ( $k_y$ ) para o período total de crescimento e para os diferentes estádios de desenvolvimento das culturas de milho, soja, sorgo e trigo

Cultura	Estádio de desenvolvimento					Ciclo
	I	II	III	IV	V	
milho	0,40	0,90	1,50	0,50	0,20	0,70
soja	0,20	0,50	0,80	1,00	0,80	0,80
sorgo	0,20	0,20	0,90	0,90	0,20	0,90
trigo	0,20	0,60	0,75	0,50	0,20	1,05

Fonte: DOORENBOS e KASSAM (1979).

#### 4.4. Produtividade máxima da cultura ( $Y_{mp}$ )

O nível de produtividade máxima de uma cultura ( $Y_{mp}$ ) é determinado, principalmente, por suas características genéticas e grau de adaptação ao ambiente predominante. Dessa forma as exigências ambientais de clima, solo e água para o crescimento e produtividade ótimas diferem com a cultura e variedade. Com isso, para garantir a obtenção de uma produtividade elevada e satisfatória, inicialmente

é requerida uma seleção cuidadosa da cultura e respectiva variedade melhor adaptada à determinado ambiente (DOORENBOS e KASSAM, 1979).

A produtividade máxima de uma cultura ( $Y_{mp}$ ) é definida como sendo aquela obtida por uma variedade altamente produtiva e bem adaptada ao ambiente de crescimento em condições tais que ela não esteja sujeita a nenhum tipo de restrição durante o seu ciclo de crescimento e desenvolvimento. A indicação sobre produtividade máxima, em nível mundial, corresponde aos valores máximos obtidos nas condições agrícolas do momento, com alto nível de manejo da cultura e de água. As produtividades consideradas satisfatórias para variedades de milho, soja, sorgo e trigo altamente produtivas e adaptadas às condições climáticas, com suprimento de água adequado e alto nível de utilização de insumos agrícolas, sob condições de agricultura irrigada, variam de 7000 a 10000 kg ha<sup>-1</sup>; de 2500 a 3500 kg ha<sup>-1</sup>; de 3500 a 5000 kg ha<sup>-1</sup>; e de 4000 a 6000 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente (DOORENBOS e KASSAM, 1979).

Os fatores climáticos que determinam  $Y_{mp}$  são temperatura, radiação solar e duração do período total de crescimento; além de algumas necessidades específicas para o desenvolvimento da cultura tais como temperatura e fotoperíodo. Geralmente, a temperatura determina a taxa de desenvolvimento da cultura e a duração do período total de crescimento necessário para formação de colheita (DOORENBOS e KASSAM, 1979).

O crescimento e a produtividade de uma cultura são influenciados pela radiação total recebida durante todo o seu ciclo. Para determinada radiação e temperatura, as culturas diferem quanto as suas respostas com relação à parcela de radiação total recebida, que pode ser convertida em crescimento e produtividade. Essa diferença tem efeito importante sobre o nível de eficiência de como a cultura pode utilizar a água para a produção.

A maioria das culturas apresenta variedades que diferem tanto em relação às suas necessidades climáticas, gerais e específicas, quanto em relação à duração do ciclo fenológico. Essa variação permite que a cultura se adapte a uma ampla

faixa de condições climáticas e ao período de tempo necessário e disponível para a produção.

Além das necessidades climáticas, o período de crescimento disponível é determinado pela duração de um suprimento garantido de água de boa qualidade.

Portanto, na seleção da cultura, além da temperatura e fotoperíodo, deve-se considerar a necessidade de radiação e a resposta da cultura e, também, o suprimento de água disponível juntamente com as necessidades hídricas das culturas.

A produtividade máxima pode ser calculada para diferentes condições climáticas. Os métodos de estimativa de Ymp permitem a quantificação do potencial produtivo de diferentes áreas, identificando, desse modo, as mais apropriadas para a produção de determinada cultura.

Nesse trabalho foram utilizados os métodos de Wageningen e da Zona Agroecológica, para a estimativa da produtividade máxima da cultura.

#### **4.4.1. Método de Wageningen**

O método de Wageningen originou-se do método avaliado pelo Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI) de Wageningen, o qual é baseado nos trabalhos anteriores de De Wit, Bierhuizen, Feddes & Kowalik. Ele utiliza o conceito de cultura padrão e o modelo linear encontrado por Slabbers (1978), o qual relaciona de maneira simplificada a água e produtividade das culturas de alfafa, milho, sorgo e trigo (DOORENBOS e KASSAM,1979). O principal pressuposto desse método é que a produtividade máxima de matéria seca ocorre com a evapotranspiração máxima. A produtividade potencial para determinado clima é calculado para a cultura padrão, por meio do conceito de De Wit (1965), citado por DOORENBOS e KASSAM (1979), utilizando dados de radiação solar e evapotranspiração. Os valores obtidos por meio desse modelo foram verificadas

para inúmeros dados experimentais, englobando ampla faixa de condições climáticas (DOORENBOS e KASSAM,1979).

O valor de  $Y_{mp}$  representa o nível de referência de produtividade atingível, com alto padrão de manejo de cultura e água, em que não há limitações de água e nutrientes, e sem ataque de pragas e doenças.

Sua aplicação às culturas se faz por meio de parâmetros que dependem da cultura, da temperatura, da eficiência de crescimento (respiração), da relação entre a parte colhida e a produtividade final, e do clima (Equação 24).

$$Y_{mp} = K cH cT G Y_o \frac{ET_m}{ea - ed} \quad \text{Eq. 24}$$

em que,

- $Y_{mp}$  = produtividade potencial,  $\text{kg ha}^{-1}$ ;
- $K$  = correção para tipo de cultura, adimensional;
- $cH$  = correção para a parte colhida, adimensional;
- $cT$  = correção para a temperatura, adimensional;
- $G$  = período total de crescimento, dia;
- $Y_o$  = produtividade de matéria seca total da cultura padrão,  $\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$ ;
- $ea$  = pressão de saturação de vapor d'água, mbar; e
- $ed$  = pressão de vapor, mbar.

#### 4.4.1.1. Correção para Tipo de Cultura (K)

O valor de  $K$  é um parâmetro obtido empiricamente e relaciona a produção de matéria seca da cultura padrão com as de alfafa, milho, sorgo e trigo. O valor de  $K$  para as cultura de milho, sorgo e trigo são iguais a 1,90, 1,60 e 1,17, respectivamente (DOORENBOS e KASSAM, 1979).

#### 4.4.1.2. Índice de Colheita (cH)

Geralmente apenas uma parte em matéria seca total é colhida. O índice de colheita (cH) é a razão entre a produtividade obtida e a matéria seca total, sendo seu valor para as culturas de milho, sorgo e trigo iguais a 0,45, 0,40 e 0,35, respectivamente (DOORENBOS e KASSAM, 1979).

#### 4.4.1.3. Correção para Temperatura (cT)

A produção de matéria seca da cultura padrão é calculada inicialmente para condições padrão de temperatura. Para a temperatura média diária, durante todo período de crescimento, aplica-se a correção da temperatura específica para a cultura (cT) a fim de se obter a produção de matéria seca, levando-se em conta que, para os processos de crescimento e manutenção (respiração), a planta utiliza 40% da energia total requerida. A Tabela 2 apresenta os valores de cT em função da temperatura média do período total de crescimento das culturas de milho, sorgo e trigo.

Tabela 2 – Correção para a temperatura (cT), para o método de Wageningen, para a cultura de milho, sorgo e trigo

Cultura	Temperatura média para o período total de crescimento (°C)						
	5	10	15	20	25	30	35
milho	0	0,1	0,35	0,50	0,60	0,6	0,6
sorgo	0	0,1	0,3	0,45	0,55	0,6	0,6
trigo	0,05	0,3	0,55	0,6	0,35	0,1	0

Fonte: DOORENBOS e KASSAM (1979).

#### 4.4.1.4. Produção da matéria seca da cultura padrão ( $Y_o$ )

O cálculo da taxa de produção de matéria seca da cultura padrão ( $Y_o$ ) é feito por meio do método de De Wit (1965), o qual se baseia no nível de radiação ativa de ondas curtas recebidas em condições padrão (Equação 25), citado por DOORENBOS e KASSAM (1979).

$$Y_o = F y_{on} + (1 - F) y_c \quad \text{Eq. 25}$$

em que,

$Y_o$  = taxa de produção de matéria seca da cultura padrão,  $\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$ ;

$F$  = fração do dia em que o sol fica encoberto por nuvens, adimensional;

$y_{on}$  = taxa de produção bruta de matéria seca da cultura padrão em dia completamente nublado,  $\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$ ; e

$y_c$  = taxa de produção bruta de matéria seca da cultura padrão em dia sem nuvens,  $\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$ .

O valor de  $F$  representa a fração do período diurno em que o sol fica encoberto por nuvens e é calculado pela Equação 26.

$$F = \frac{R_{se} - 0,5R_s}{0,8R_{se}} \quad \text{Eq. 26}$$

em que,

$R_{se}$  = radiação ativa de ondas curtas nos dias claros,  $\text{cal cm}^{-2} \text{d}^{-1}$ ; e

$R_s$  = radiação de ondas curtas,  $\text{cal cm}^{-2} \text{d}^{-1}$ .

Os valores da recepção máxima de radiação ativa de ondas curtas nos dias claros (Rse), da taxa de produção bruta de matéria seca da cultura padrão em dia completamente nublado (yon) e da taxa de produção bruta de matéria seca da cultura padrão em dia sem nuvens (yc) estão apresentados na Tabela 3. O valor da recepção real de radiação de ondas curtas observada (Rs) é dado pela Equação 36.

#### 4.4.1.5. Correção para o Clima $\frac{ETm}{ea - ed}$

Além da radiação solar, a taxa de crescimento da cultura para determinado clima está relacionada com a taxa média da evapotranspiração máxima (ETm) e com a média do déficit de pressão de vapor d'água (ea-ed), durante todo período de crescimento, Bierhuizen e Slatyer (1965), citados por DOORENBOS e KASSAM (1979).

O valor da evapotranspiração máxima da cultura foi estimada por meio do coeficiente de cultura (kc) e da evapotranspiração potencial (ETo).

Tabela 3 – Valores da recepção máxima de radiação ativa de ondas curtas nos dias claros (Rse), em cal cm<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, da taxa de produção bruta de matéria seca da cultura padrão em dia completamente nublado (yon), em kg ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>, e da taxa de produção bruta de matéria seca da cultura padrão em dia sem nuvens (yc), em kg ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>, da cultura padrão

Norte	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
Sul	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	
0°	Rse	343	360	369	364	349	337	343	357	368	365	349	337
	yc	413	424	429	426	417	410	413	422	429	427	418	410

	yon	219	226	230	228	221	216	218	225	230	228	222	216
10°	Rse	299	332	359	375	377	374	375	377	369	345	311	291
	yc	376	401	422	437	440	440	440	439	431	411	385	370
	yon	197	212	225	234	236	235	236	235	230	218	203	193
20°	Rse	249	293	337	375	394	400	399	386	357	313	264	238
	yc	334	317	407	439	460	468	465	451	425	387	348	325
	yon	170	193	215	235	246	250	249	242	226	203	178	164
30°	Rse	191	245	303	363	400	417	411	384	333	270	210	179
	yc	281	333	385	437	471	489	483	456	412	356	299	269
	yon	137	168	200	232	251	261	258	243	216	182	148	130
40°	Rse	131	190	260	339	396	422	413	369	298	220	151	118
	yc	219	283	353	427	480	506	497	455	390	314	241	204
	yon	99	137	178	223	253	268	263	239	200	155	112	91

---

Fonte: DOORENBOS e KASSAM (1979).

#### 4.4.2. Método da Zona Agroecológica

Esse método foi baseado no método desenvolvido por Kassam (1977) para o Projeto Zona Agroecológica (DOORENBOS e KASSAM, 1979). Ele utiliza os conceitos de cultura padrão de De Wit e da taxa de produção de matéria seca de folhas ( $y_m$ ).

O valor de  $Y_{mp}$  representa o nível de referência de produtividade atingível com alto padrão de manejo da cultura e água, em que não há limitações de clima, água e nutrientes e sem ataque de pragas e doenças (Equação 27) (DOORENBOS e KASSAM, 1979).

$$Y_{mp} = cLcNcHG[F(a + b y_m)y_{on} + (1 - F)(c + d y_m)y_c] \quad \text{Eq. 27}$$

em que,

$Y_{mp}$  = produtividade potencial,  $\text{kg ha}^{-1}$ ;

$cL$  = correção em função do desenvolvimento da cultura e área foliar, adimensional;

$cN$  = correção para a produção de matéria seca, adimensional; e

$y_m$  = taxa de produção de matéria seca de folhas,  $\text{kg ha}^{-1} \text{h}^{-1}$ .

Os valores de  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  são iguais 0,8, 0,01, 0,5 e 0,025, respectivamente, para  $y_m \geq 20 \text{ kg ha}^{-1} \text{h}^{-1}$ ; e iguais a 0,5, 0,025, 0 e 0,05, respectivamente, para  $y_m < 20 \text{ kg ha}^{-1} \text{h}^{-1}$ .

O método da Zona Agroecológica foi desenvolvido para estimar a produtividade da cultura em base continental. Entretanto, ele também pode ser aplicado até um nível de detalhe para se ajustar a localidades específicas.

#### 4.2.2.1. Correção em função do desenvolvimento da cultura e área foliar (cL)

A correção em função do desenvolvimento da cultura e área foliar (cL) se fundamenta na suposição de que a cultura padrão possui área foliar ativa equivalente a 5 vezes área do terreno, isto é,  $IAF = 5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$  (DOORENBOS e KASSAM, 1979). O valor de cL é apresentado na Tabela 4 em função da área foliar da cultura.

Tabela 4 – Valores da correção em função do desenvolvimento da cultura e área foliar (cL) em função da área foliar da cultura (IAF)

IAF ( $\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$ )	1	2	3	4	5
cL	0,2	0,3	0,4	0,48	0,5

Fonte: DOORENBOS e KASSAM (1979).

#### 4.4.2.2. Correção para a produção de matéria seca (cN)

A correção para a produção de matéria seca (cN) é um índice que representa a energia disponível para produzir novo crescimento pois a planta necessita de energia para os processos internos de desenvolvimento (respiração) e para manter a produção de matéria seca. A Equação 28 apresenta os valores estimados para cN em função da temperatura média do ar, DOORENBOS e KASSAM (1979).

$$cN = \begin{cases} 0,60; & T < 20 \text{ }^\circ\text{C} \\ 0,50; & T \geq 20 \text{ }^\circ\text{C} \end{cases} \quad \text{Eq. 28}$$

#### 4.4.2.3. Índice de Colheita (cH)

Geralmente apenas uma parte em matéria seca total é colhida. O índice de colheita (cH) é a razão entre a produtividade obtida e a matéria seca total. O seu valor para as culturas de milho, soja, sorgo e trigo são iguais a 0,4, 0,35, 0,35 e 0,4, respectivamente (DOORENBOS e KASSAM, 1979).

#### 4.4.2.4. Taxa de Produção de Matéria Seca de Folhas (ym)

A taxa de produção de matéria seca de folhas (ym) da cultura padrão é considerada como tendo o valor de 20 kg ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>. Porém, a produção da matéria seca depende da cultura e da temperatura. O valor de ym em função da temperatura está apresentado na Tabela 5 para as culturas de milho, soja, sorgo e trigo.

Tabela 5 – Valores de ym (kg ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>) para as culturas de milho, soja, sorgo e trigo em função das temperatura média durante o ciclo da cultura

Cultura	Temperatura média, °C								
	5	10	15	20	25	30	35	40	45
soja	0	0	15	32,5	35	35	32,5	5	0
milho	0	0	5	45	65	65	65	45	5
sorgo	0	0	5	45	65	65	65	45	5
trigo	0	0	15	32,5	35	35	32,5	5	0

Fonte: DOORENBOS e KASSAM (1979).

#### 4.5. Estimativa da evapotranspiração máxima da cultura (ET<sub>m</sub>)

Para estimar a evapotranspiração máxima da cultura (ET<sub>m</sub>) foram utilizados os conceitos de coeficiente de cultura (k<sub>c</sub>) e de evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>), conforme a Equação 29. Os valores de k<sub>c</sub> estão tabelados para as fases de desenvolvimento da cultura: inicial, desenvolvimento, intermediário e final do ciclo; e também colheita (Tabela 6). O método utilizado para calcular ET<sub>o</sub> foi o de Penman-Monteith, conforme descrito pela FAO (1990) (Equação 30). O valor de ET<sub>o</sub> foi estimado a partir dos dados climáticos diários de temperatura mínima (T<sub>n</sub>), temperatura média (T), temperatura máxima (T<sub>x</sub>), umidade relativa (UR), brilho solar (I<sub>ns</sub>) e velocidade do vento medida a 10 m de altura (U); e das coordenadas geográficas latitude e altitude local.

$$ET_m = k_c ET_o \quad \text{Eq. 29}$$

Tabela 6 – Valores médios de coeficiente de cultura (k<sub>c</sub>) em função do estágio de desenvolvimento das culturas de milho, soja, sorgo e trigo

Cultura	Estádio de desenvolvimento da cultura				
	I	II	III	IV	V
milho	0,40	0,78	1,13	0,88	0,58
soja	0,35	0,75	1,08	0,75	0,45
sorgo	0,35	0,73	1,08	0,78	0,53
trigo	0,35	0,75	1,13	0,70	0,23

Fonte: DOORENBOS e KASSAM (1979).

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 275} U_2 (ea - ed)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34U_2)} \quad \text{Eq. 30}$$

em que,

- ET<sub>o</sub> = evapotranspiração de referência, mm d<sup>-1</sup>;
- Rn = saldo de radiação na superfície da cultura, MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>;
- G = fluxo de calor no solo, MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>;
- T = temperatura média diária, °C;
- U<sub>2</sub> = velocidade do vento à 2m de altura, m s<sup>-1</sup>;
- ea = pressão de saturação de vapor, kPa;
- ed = pressão de vapor, kPa;
- ea - ed = déficit de pressão e vapor, kPa;
- Δ = declividade da curva de pressão e vapor, kPa °C<sup>-1</sup>; e
- γ = constante psicrométrica, kPa °C<sup>-1</sup>.

Os valores de Δ, ea, ed, Rn, Rns, Rs, N, ω<sub>s</sub>, δ e Ra, dr, Rnl, G foram calculados pelas Equações 31 a 43, respectivamente.

$$\Delta = 4098 \frac{ea}{(T + 237,3)^2} \quad \text{Eq.31}$$

$$ea = 0,611 e^{\frac{17,27T}{T+237,3}} \quad \text{Eq.32}$$

em que,

$e$  = base do logaritmo natural, adimensional.

$$ed = \frac{UR}{\frac{50}{ea(Tn)} + \frac{50}{ea(Tx)}} \quad \text{Eq.33}$$

em que,

UR = umidade relativa média do dia, %;

ea(Tn) = pressão de saturação de vapor à temperatura mínima Tn, kPa; e

ea(Tx) = pressão de saturação de vapor à temperatura máxima Tx, kPa.

$$Rn = Rns - Rnl \quad \text{Eq.34}$$

em que,

Rns = saldo de radiação de ondas curtas, MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>; e

Rnl = saldo de radiação de ondas longas, MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>.

$$Rns = (1 - albedo)Rs \quad \text{Eq. 35}$$

em que,

albedo = albedo, adimensional, albedo=0,23; e

Rs = radiação de ondas curtas, MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>.

$$Rs = \left( 0,25 + 0,50 \frac{n}{N} \right) Ra \quad \text{Eq. 36}$$

em que,

n/N = fração relativa de luz solar, adimensional;

- $n$  = horas de brilho solar diário, h;  
 $N$  = duração total do dia, h; e  
 $Ra$  = radiação solar extraterrestre, MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>.

$$N = 7,64\omega_s \quad \text{Eq.37}$$

$$\omega_s = \arccos(-\tan \varphi \tan \delta) \quad \text{Eq.38}$$

$$\delta = 0,409 \text{sen}(0,0172J - 1,39) \quad \text{Eq.39}$$

$$Ra = 37,6dr(\omega_s \text{sen} \varphi \text{sen} \delta + \cos \varphi \cos \delta \text{sen} \omega_s) \quad \text{Eq.40}$$

em que,

- $dr$  = distância relativa Terra-Sol, adimensional;  
 $\varphi$  = latitude, rad;  
 $\delta$  = declinação solar, rad; e  
 $\omega_s$  = ângulo horário do pôr do sol, rad.

$$dr = 1 + 0,033 \cos(0,0172J) \quad \text{Eq.41}$$

em que,

- $J$  = número do dia do ano, adimensional.

$$Rnl = 2,45 \times 10^{-9} \left( 0,9 \frac{n}{N} + 0,1 \right) (0,34 - 0,14\sqrt{ed}) \left[ (Tx + 273,15)^4 + (Tn + 273,15)^4 \right] \quad \text{Eq.42}$$

em que,

$T_x$  = temperatura máxima do dia, °C; e

$T_n$  = temperatura mínima do dia, °C.

$$G = 0,38(T_i - T_{i-1}) \quad \text{Eq.43}$$

em que,

$T_i$  = temperatura média do dia i, °C;

$T_{i-1}$  = temperatura média do dia i-1, °C;

A correção para a velocidade do vento em função da altura do anemômetro foi feita por meio da Equação 44.

$$\frac{U_2}{U_z} = \frac{4,87}{\ln(67,8 z - 5,42)} \quad \text{Eq.44}$$

em que,

$U_z$  = velocidade do evento medida à altura z, m s<sup>-1</sup>; e

$z$  = altura de medição da velocidade do vento, m,  $z = 10\text{m}$ .

Os valores de  $\gamma$ ,  $P$  e  $\lambda$  foram obtidos por meio das Equações 45 a 47, respectivamente.

$$\gamma = 0,00163 \frac{P}{\lambda} \quad \text{Eq.45}$$

em que,

$P$  = pressão atmosférica, kPa; e

$\lambda$  = calor latente, MJ kg<sup>-1</sup>.

$$\lambda = 2,501 - 2,361 \times 10^{-3} T \quad \text{Eq.46}$$

$$P = 101,3 \left( \frac{293 - 0,0065Z}{293} \right)^{5,26} \quad \text{Eq.47}$$

em que,

$Z$  = altitude, m.

#### 4.6. Estimativa da Evapotranspiração da Cultura (ETr)

Segundo DOORENBOS e KASSAM (1979), quando a evapotranspiração da cultura (ETr) for menor que a evaporação máxima (ETm) ocorre um déficit de evapotranspiração que resulta numa redução da produtividade. O cálculo de ETr foi feito utilizando o modelo de Rijtema e Aboukhaled (1975), citado por DOORENBOS e KASSAM (1979) (Equação 55), considerando o balanço hídrico diário (Equação 50).

Para quantificar os elementos do balanço hídrico durante o crescimento e desenvolvimento de uma cultura agrícola, o seu ciclo foi dividido em cinco estádios de desenvolvimento, conforme DOORENBOS e KASSAM (1979). A Tabela 7 apresenta os estádios de desenvolvimentos de culturas agrícolas e sua descrição.

Tabela 7 – Estádios de desenvolvimentos de culturas agrícolas e sua descrição

Estádio	Descrição
I	da germinação até 10% de cobertura do solo;
II	de 10 a 80% de cobertura do solo;
III	de 80% de cobertura do solo até início de amadurecimento;
IV	do início de amadurecimento até colheita; e

Fonte: DOORENBOS e KASSAM (1979).

A duração de cada estágio foi determinado em graus dias. A Tabela 8 apresenta os valores médios da duração em dias (DI) e em graus dias (GD) dos estádios de desenvolvimento e do ciclo das culturas de milho, soja, sorgo e trigo.

Os graus dias acumulados (GD) foram calculados em função da temperatura média diária (T), da temperatura basal da cultura (Tb) e da temperatura máxima da cultura (Tmax), com base nas Equações 48 e 49. O valor de Tb para as culturas de milho, soja, sorgo e trigo foi tomado como sendo igual

Tabela 8 – Valores médios da duração em dias (DI) e em graus dias (GD) dos estádios de desenvolvimento e do ciclo das culturas de milho, soja, sorgo e trigo

Cultura	Estádio de desenvolvimento da cultura										Ciclo	
	I		II		III		IV		V			
	DI	GD	DI	GD	DI	GD	DI	GD	DI	GD	DI	GD
milho	20	260	33	429	17	221	40	520	10	130	110	1560
soja	10	130	35	455	30	390	35	455	13	169	123	1569
sorgo	18	270	25	375	18	270	38	570	13	175	112	1680
trigo	13	169	40	520	18	234	33	429	13	169	117	1521

Fonte: DOORENBOS e KASSAM (1979).

a 10°C; e o valor de Tmax para as culturas de milho, soja, sorgo e trigo é igual a 45, 35, 35 e 35°C, respectivamente (DOORENBOS e KASSAM, 1979).

$$GD = \sum_{i=1}^n GD_i \quad \text{Eq. 48}$$

$$GD_i = \begin{cases} 0, & T_i \leq T_b \quad \text{ou} \quad T_i > T_{\max} \\ T_i - T_b, & T_i \geq T_b \end{cases} \quad \text{Eq. 49}$$

em que,

$GD_i$  = graus dia do i-ésimo dia após o plantio, °C;

$T_i$  = temperatura média do ar do dia i, °C;

$T_b$  = temperatura basal da cultura, °C; e

$T_{\max}$  = temperatura máxima da cultura, °C.

## 4.7. Balanço Hídrico

Considerando uma cultura com o seu sistema radicular a profundidade  $D$ , plantada em um solo dividido em  $n$  horizontes, cada horizonte à profundidade  $Z_j$  e com as propriedades físicas capacidade de campo ( $CC_j$ ), ponto de murchamento ( $PM_j$ ) e massa específica do solo ( $Dg_j$ ), para  $1 \leq j \leq n$ . A equação do balanço hídrico do dia  $i$  desse solo é dada pela Equação 50.

$$Lam_i = Lam_{i-1} + Prec_i + Irr_i - ETc_i - Esc_i - Exc_i \quad \text{Eq. 50}$$

em que,

$Lam_i$  = lâmina de água disponível no solo no dia  $i$ , mm;

$Lam_{i-1}$  = lâmina de água disponível no solo no dia  $i-1$ , mm;

$Prec_i$  = precipitação total do dia  $i$ , mm;

$Irr_i$  = irrigação do dia  $i$ , mm;

$ETc_i$  = evapotranspiração da cultura no dia  $i$ , mm;

$Esc_i$  = escoamento superficial do dia i, mm; e

$Exc_i$  = excesso hídrico do dia i, mm.

O valor da lâmina de água no solo no dia i foi obtido por meio da somatória da lâminas de água em cada camada j do solo, Equações 51 e 52.

$$Lam_i = \sum_{j=1}^n Lam_{i,j} \quad \text{Eq. 51}$$

$$Lam_{i,j} = 10(Umid_{i,j} - PM_j)Dg_jEsp_j \quad \text{Eq. 52}$$

em que,

$Umid_{i,j}$  = umidade da camada j no dia i, %;

$Lam_{i,j}$  = lâmina de água da camada j no dia i, mm;

$PM_j$  = ponto de murchamento da camada j, %;

$Dg_j$  = massa específica da camada j,  $g\ cm^{-3}$ ; e

$Esp_j$  = espessura da camada j, m.

O valor da espessura da última camada do solo explorada pela cultura no dia i foi ajustado de forma que  $D_i = \sum Esp_j$ , em que  $D_i$  é a profundidade radicular da cultura no dia i.

O modelo de Rijtema e Aboukhaled, citado (DOORENBOS e KASSAM, 1979), supõe que ela seja igual à ETm até que se tenha esgotado a fração (f) da água total disponível no solo ( $S_a$ ) na profundidade radicular (D); para um nível além do esgotamento da fração da água total disponível no solo ( $S_a$  D), a ETr diminui em relação a ETm, Equação 53.

$$ETr = \begin{cases} ETm, & t < \frac{f Sa D}{ETm} \\ \frac{Sa D}{t} \left[ 1 - (1-f) e^{-\frac{ETm t}{(1-f)Sa D} + \frac{f}{1-f}} \right], & t \geq \frac{f Sa D}{ETm} \end{cases} \quad \text{Eq.53}$$

em que,

- T = número de dias após a última irrigação ou precipitação, d;  
 Sa = água total disponível no solo por unidade de comprimento, mm m<sup>-1</sup>; e  
 D = profundidade radicular, m.

Os valores da fração de esgotamento de água no solo para as culturas de milho, soja, sorgo e trigo em função da evapotranspiração máxima estão apresentados na Tabela 9, e os valores médios da profundidade radicular (D) em função do estágio de desenvolvimento e para todo ciclo fenológico das culturas de milho, soja, sorgo e trigo estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 9 – Fração de esgotamento de água no solo (f) para as cultura de milho, soja, sorgo e trigo em função da evapotranspiração máxima

ETm (mm d <sup>-1</sup> )								
2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,875	0,800	0,700	0,600	0,550	0,500	0,450	0,425	0,400

Fonte: DOORENBOS e KASSAM (1979).

Tabela 10 – Valores médios da profundidade radicular (D), em metros, em função do estágio de desenvolvimento e para todo ciclo fenológico das culturas de milho, soja, sorgo e trigo

Cultura	Estádio de desenvolvimento da cultura					Ciclo
	I	II	III	IV	V	

milho	0,15	0,40	0,50	0,50	0,50	0,50
soja	0,15	0,30	0,40	0,40	0,40	0,40
sorgo	0,15	0,40	0,50	0,50	0,50	0,50
trigo	0,15	0,40	0,50	0,50	0,50	0,50

Fonte: DOORENBOS e KASSAM (1979).

O valor de  $S_a$  foi obtido por meio da Equação 54.

$$S_a = 10(CC - PM)Dg \quad \text{Eq. 54}$$

em que,

CC = capacidade de campo do solo, %;

PM = ponto de murchamento do solo, %; e

Dg = massa específica do solo,  $\text{g cm}^{-3}$ .

O valor diário do escoamento superficial ( $Esc_i$ ) foi calculado pela Equação 55.

$$Esc_i = Pr ec_i - Pef_i \quad \text{Eq. 55}$$

O valor diário da precipitação efetiva foi calculado pela Equação 56 (MOTA e OLIVEIRA, 1978).

$$Pef_i = 19,9784 \ln(Pr ec_i) + [34,6123 - 10,7001 \ln(Pr ec_i)] \frac{Lam_{i-1,1}}{CTA_{i,1}} - 41,3155 \quad \text{Eq. 56}$$

em que,

$Pef_i$  = precipitação efetiva do dia  $i$ , mm; e

$CTA_{i,1}$  = Capacidade total de água da camada 1 do solo no dia  $i$ , mm.

O valor diário da capacidade total de água no solo da camada  $j$  ( $CTA_{i,j}$ ) foi calculado pela Equação 57.

$$CTA_{i,j} = 10(CC_j - PM_j)Dg_jEsp_j \quad \text{Eq. 57}$$

em que,

$CC_j$  = capacidade de campo da camada  $j$ , %.

O valor diário do excesso hídrico ( $Exc_i$ ) foi calculado pelas Equações 58 e 59.

$$Exc_i = \sum_{j=1}^n Exc_{i,j} \quad \text{Eq. 58}$$

$$Exc_{i,j} = \begin{cases} Lam_{i,j} - CTA_{i,j}, & Lam_{i,j} > CTA_{i,j} \\ 0, & Lam_{i,j} \leq CTA_{i,j} \end{cases} \quad \text{Eq. 59}$$

Os valores diários da irrigação ( $Irr_i$ ) foi igual a irrigação total necessária ( $ITN_i$ ) a qual foi calculada usando as Equações 60 a 62.

$$IRN_i = (1 - f)CTA_i \quad \text{Eq. 60}$$

$$CTA_i = \sum_{j=1}^n CTA_{i,j} \quad \text{Eq. 61}$$

em que,

$f$  = fator de disponibilidade hídrica, adimensional.

O momento da irrigação foi obtida quando  $Lam_i \leq IRN_i$ .

$$ITN_i = \frac{IRN_i}{Epa} \quad \text{Eq. 62}$$

em que,

$Epa$  = eficiência de aplicação baseada na percentagem da área adequadamente irrigada,  $pa$ , adimensional.

#### 4.8. Produtividade da Cultura

O cálculo da produtividade da cultura ( $Y_r$ ) utilizando os métodos de Stewart e de Mantovani requerem a solução das Equações 19 e 20, respectivamente. A solução destas equações requerem os valores de  $ETr$  e  $Cd$  os quais foram obtidos por meio do balanço hídrico diário.

#### 4.9. Cálculo de $Cd$

O cálculo do valor de  $Cd$  foi feito utilizando as Equações 21 e 22 tomando  $H_b$  como sendo o valor de  $Irr$ , e  $H_r$  como sendo o valor de  $IRN$ , esses valores foram obtidos por meio do balanço hídrico diário.

#### 4.10. Cálculo de p

A estimativa das fontes de água para a cultura exceto a de irrigação (p) foi feita a partir da Equação 23 considerando apenas os valores da precipitação efetiva, a qual foi obtida por meio do balanço hídrico diário.

## 5. PROCEDIMENTO DE CÁLCULOS

### 5.1. Equações alternativas

A partir dos dados de  $R_{se}$ ,  $y_{on}$  e  $y_c$ , obtidos da Tabela 3, ajustou-se as Equações 63 e 64, cujos valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) são 0,9957 e 0,9779, respectivamente. Dessa forma, a taxa de produção de matéria seca da cultura padrão ( $Y_o$ ) pode ser calculada pela Equação 65, a qual foi obtida pela substituição das Equações 63, 64 e 26 na Equação 25.

$$y_{on} = 31,653 + 0,5477 R_{se} \quad \text{Eq. 63}$$

$$y_c = 104,66 + 0,9061 R_{se} \quad \text{Eq. 64}$$

$$Y_o = 45,629 \frac{R_s}{R_{se}} + 0,224R_s + 0,4581R_{se} + 13,401 \quad \text{Eq. 65}$$

### 5.2. Aplicativo computacional

Foi desenvolvido um aplicativo computacional para a estimativa da produtividade de culturas agrícolas usando os modelos citados, cuja descrição geral está no Apêndice B.

### 5.3. Condições iniciais e cálculos dos valores diários

A umidade inicial de cada camada do solo para fins de simulação foi considerada como igual à da capacidade de campo.

A partir da data de plantio até a colheita foram simulados o valores diários dos graus dias acumulados (GD), coeficiente da cultura (kc), profundidade radicular (ProfRad, D), coeficiente de resposta da cultura (ky), recepção real de radiação de ondas curtas (Rs), recepção máxima de radiação ativa de ondas curtas nos dias claros (Rse), lâminas bruta aplicada (Hb) e requerida (Hr) pela cultura durante seu ciclo fenológico. O balanço hídrico diário por camada de solo foi feito para todo ciclo da cultura, tendo como dados de entrada os dados do clima, do solo e da cultura, além da data de plantio. Dentre os seus resultados pode-se destacar as lâminas de irrigação total necessária (ITN) e real necessária (IRN), precipitação efetiva (Pef) e a evapotranspiração da cultura (ETr).

### 5.4. Produtividade potencial da cultura

Para o cálculo da produtividade potencial da cultura ( $Y_{mp}$ ) pelo método de Wageningen, foi utilizada a Equação 24, obtido a partir dos valores da correção para tipo de cultura (K), correção para a parte colhida (cH), correção para a temperatura (cT), período total de crescimento (G), produção de matéria seca total da cultura padrão ( $Y_o$ ), evapotranspiração máxima da cultura (ETm), pressão de saturação de vapor d'água (ea) e pressão de vapor (ed). Sempre que foi necessário interpolar valores, o método utilizado foi a interpolação linear.

Para o cálculo da produtividade potencial da cultura ( $Y_{mp}$ ) pelo método da zona agroecológica foi utilizada a Equação 27, obtido a partir dos valores de correção em função do desenvolvimento da cultura e área foliar ( $c_L$ ), correção para a produção de matéria seca ( $c_N$ ), correção para a parte colhida ( $c_H$ ), período total de crescimento ( $G$ ), fração do dia em que o sol fica encoberto por nuvens ( $F$ ), taxa de produção de matéria seca de folhas ( $y_m$ ), taxa de produção bruta de matéria seca da cultura padrão em dia completamente nublado ( $y_{on}$ ) e taxa de produção bruta de matéria seca da cultura padrão em dia sem nuvens ( $y_c$ ). Sempre que foi necessário interpolar valores, o método utilizado foi a interpolação linear.

## 5.5. Produtividade da cultura

Para o cálculo da produtividade da cultura ( $Y_r$ ), pelo método de Stewart, foi utilizada a Equação 19, obtido a partir dos valores da produtividade potencial da cultura ( $Y_{mp}$ ), do valor médio do coeficiente de resposta da cultura ( $k_y$ ) e dos totais da evapotranspiração da cultura ( $ET_r$ ) da evapotranspiração máxima ( $ET_m$ ) durante o ciclo da cultura.

Para o cálculo da produtividade da cultura ( $Y_r$ ), pelo método de Mantovani, foi utilizada a Equação 20, obtido a partir dos valores de  $Y_{mp}$ , da média de  $k_y$  e dos valores do coeficiente de déficit ( $C_d$ ) e da fração da evapotranspiração máxima da cultura, durante seu ciclo fenológico, suprida por outras fontes de água diferentes da irrigação ( $p$ ).

## 5.6. Erro relativo percentual

A comparação entre os valores estimados e observados foi feito por meio do erro relativo percentual (ERP), definido pela Equação 66.

$$ERP = 100 \frac{Y_r - Y_{ro}}{Y_{ro}} \quad \text{Eq. 66}$$

em que,

ERP = erro relativo percentual, %; e

Yro = produtividade da cultura, kg ha<sup>-1</sup>.

Os valores de Yro são as produtividades obtidas por pelos agricultores em nível de campo reportados pelo IBGE (IBGE, 1998) e pela FAO (DOORENBOS e KASSAM, 1979). Estes valores estão apresentados na Tabela 11. Estes valores se referem à grãos para serem comercializados e apresentam, em geral, 14% de umidade. Dessa forma, a produtividade das culturas calculadas por meio das Equações 19 e 20 foram corrigidas para este valor de umidade.

O cálculo do valor de ERP, utilizando os dados da FAO, foi feito considerando a irrigação suplementar ( método de irrigação por aspersão) e o Coeficiente de Cristhiansen tomado igual a 80%. Já o cálculo do valor de ERP, utilizando os dados do IBGE, foi feito sem irrigação.

Tabela 11 – Produtividade média das culturas de milho, soja, sorgo e trigo em nível mundial reportada pela FAO (DOORENBOS e KASSAM, 1979) e do estado de Minas Gerais na safra 95/96 reportada pelo IBGE (IBGE, 1998)

Cultura	FAO (kg ha <sup>-1</sup> )	IBGE (kg ha <sup>-1</sup> )
Milho	8000	2542
Soja	3000	1953
trigo	5000	1000
sorgo	4300	1000

## 6. MATERIAL E MÉTODOS

Foi simulado o plantio das culturas de milho (*Zea mays* L.), soja [*Glycine max* L. (MERRIL)], sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) MOENCH] e trigo (*Triticum aestivum* L.) nas épocas 1 (20/11/1995) e 2 (20/04/1996), nas cidades mineiras de Capinópolis e Montes Claros. Os dados geográficos, a classe do solo e o código do Instituto Nacional de Meteorologia da estação climatológica de cada local estão apresentados no Quadro 1. Os dados geográficos utilizados foram latitude e altitude. Os dados climáticos diários foram obtidos junto ao 5º Distrito de Meteorologia do Instituto Nacional de Meteorologia (5º DISME/INMET). Esses dados climáticos, correspondentes a temperatura mínima ( $T_n$ ), temperatura média ( $T$ ), temperatura máxima ( $T_x$ ), umidade relativa (UR), brilho solar (Ins), velocidade do vento medida a 10 m de altura (U) e precipitação (Prec), estão apresentados nos Apêndices A1 e A2.

Os solos utilizados apresentaram-se com perfil dividido em 3 camadas ( $j = 1, 2, 3$ ), cujas características físico-hídricas estão apresentadas na Tabela 12, são elas: profundidade ( $H_j$ ), capacidade de campo ( $CC_j$ ), ponto de murchamento ( $PM_j$ ) e massa específica do solo ( $Dg_j$ ).

Os valores adotados para IAF máximos foi  $5,3 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$  para o milho (LEAL, 1993),  $5,5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$  para a soja (CONFALONE, 1998),  $1,92 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$  para o sorgo (CASTRO et. al., 1986) e  $6,0 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$  para o trigo (WEIR et. al., 1984).

Quadro 1 – Relação das localidades mineiras consideradas no trabalho, seus dados geográficos, o código da sua estação climatológica (INMET) e a classe do solo

Localidade	Latitud e	Longitud e	Altitud e (m)	Código INME T	Classe do Solo
Capinópolis	18°40' S	49°34'W	564	83514	latossolo vermelho-amarelo distrófico
Montes Claros	16°44' S	43°51'W	648	83437	podzólico vermelho-amarelo eutrófico

Tabela 12 – Perfil dos latossolo vermelho-amarelo distrófico e podzólico vermelho-amarelo eutrófico e sua características físico-hídricas por camada

Classe do Solo	Horizonte			CC (%)	PM (%)	Dg ( $\text{g cm}^{-3}$ )
	Profundidade (m)					
Latossolo vermelho-amarelo distrófico	0,00	-	0,15	16,0	9,4	1,45
	0,15	-	0,30	15,1	9,4	1,45
	0,30	-	0,50	16,0	9,7	1,52
Podzólico vermelho-amarelo eutrófico	0,00	-	0,15	13,5	6,5	1,47
	0,15	-	0,30	15,4	8,0	1,54
	0,30	-	1,20	17,1	10,1	1,49

Fonte: FONTES e OLIVEIRA (1982).

O método de irrigação utilizado na simulação foi a aspersão convencional, considerando irrigação no período diurno. Segundo KELLER e BLIESNER (1990), a eficiência do sistema de irrigação é dada pela Equação 67.

$$E_{pa} = DE_{pa} Re Oe \quad \text{Eq. 67}$$

em que,

- $E_{pa}$  = eficiência do sistema de irrigação, adimensional;
- $DE_{pa}$  = eficiência de distribuição para a percentagem da área adequadamente irrigada,  $pa$ , adimensional;
- $Re$  = perdas devido a evaporação e arraste do vento, adimensional;
- $e$
- $Oe$  = perdas na condução, adimensional.

As culturas consideradas na simulação são consideradas de médio valor econômico e, portanto, foi adotado o valor de  $CU$  igual a 80% e o valor de  $pa$  (percentagem de área adequadamente irrigada) como sendo igual a 80%. Nestas condições o valor de  $DE_{pa}$  é 0,79 (KELLER e BLIESNER, 1990). Para efeitos de simulação, as perdas na condução serão desprezadas, ou seja,  $Oe=1$ . O valor de  $Re$  será calculado pela Equação 68 (MANTOVANI e RAMOS, 1994). Esta equação foi obtida por Mantovani para o sul da Espanha, para as condições de irrigação por aspersão no período diurno, utilizando 17 aspersores, com 1 e 2 bocais, operando com vários valores de pressão.

$$Re = 101,63 - 5,66 X \quad R^2 = 0,79 \quad \text{Eq. 68}$$

em que,

- $Y$  = perdas devido a evaporação e arraste do vento, adimensional;
- $X$  = velocidade do vento do período diurno,  $X=1,33U_2$  para

condições médias,  $m s^{-1}$ .

Foram feitas simulações envolvendo as alternativas: a) métodos de Wageningen, da Zona Agroecológica para a estimativa da produtividade potencial da cultura; e b) modelos de Mantovani e de Stewart para a estimativa da produtividade da cultura. A duração do ciclo da cultura foi calculada em graus dias e o balanço hídrico diário foi calculado pelo modelo de Rijtema e Aboukhaled.

## 7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 7.1. Duração do ciclo da cultura

O Quadro 2 apresenta a temperatura média e duração do ciclo das culturas de milho, soja, sorgo e trigo para a simulação de plantio em Capinópolis e Montes Claros nas épocas 1 (20/11/1995) e 2 (20/04/1996).

A duração do ciclo da cultura do milho em Capinópolis nas épocas 1 e 2 foram iguais a 92 e 114 dias, respectivamente; em Montes Claros, esses valores foram 105 e 137 dias, respectivamente.

A duração do ciclo da cultura da soja em Capinópolis nas épocas 1 e 2 foram iguais a 94 e 116 dias, respectivamente; em Montes Claros, esses valores foram 107 e 139 dias, respectivamente.

A duração do ciclo da cultura do sorgo em Capinópolis nas épocas 1 e 2 foram iguais a 99 e 122 dias, respectivamente; em Montes Claros esses valores foram 112 e 145 dias, respectivamente.

A duração do ciclo da cultura do trigo em Capinópolis nas épocas 1 e 2 foram iguais a 90 e 112 dias, respectivamente; em Montes Claros esses valores foram 102 e 134 dias, respectivamente.

Quadro 2 – Temperatura média (T) e duração do ciclo (G) das culturas de milho, soja, sorgo e trigo para a simulação de plantio em Capinópolis e Montes Claros nas épocas 1 e 2

Cultura	Época de Plantio	Local	G (d)	T (°C)
trigo	1	Capinópolis	90	27,0
milho	1	Capinópolis	92	27,1
soja	1	Capinópolis	94	27,0
sorgo	1	Capinópolis	99	27,0
trigo	1	Montes Claros	102	24,9
milho	1	Montes Claros	105	25,0
soja	1	Montes Claros	107	25,0
sorgo	1	Montes Claros	112	25,0
trigo	2	Capinópolis	112	23,7
milho	2	Capinópolis	114	23,7
soja	2	Capinópolis	116	23,8
sorgo	2	Capinópolis	122	23,9

---

trigo	2	Montes Claros	134	21,4
milho	2	Montes Claros	137	21,5
soja	2	Montes Claros	139	21,6
sorgo	2	Montes Claros	145	21,7

---

G – duração do ciclo da cultura e T – temperatura média.

As variações da duração do ciclo das culturas de milho, soja, sorgo e trigo acima apresentadas são explicadas pela diferença nos valores das temperaturas no ciclo da cultura, cujas médias em Capinópolis, nas épocas 1 e 2, foram iguais a 27 e 23 °C, respectivamente; já em Montes Claros essas médias foram 25 e 21 °C, respectivamente.

Nas épocas analisadas, verifica-se que a duração do ciclo das culturas de milho e soja tendem a ser maiores em Montes Claros do que em Capinópolis. Tais resultados se devem a temperatura, como era esperado, visto que as temperaturas em Capinópolis tenderam a ser maiores do que as de Montes Claros (Quadro 2 e Apêndices A.1 e A.2).

A duração do ciclo das culturas com plantio simulado em Montes Claros na época 2 foi maior do que os valores de Doorenbos e Kassam (Tabela 8). Semelhante resultado foi observado para o plantio do sorgo em Capinópolis também na época 2. Os demais casos analisados apresentaram duração do ciclo da cultura menores do que os valores de Doorenbos e Kassam.

## 7.2. Produtividade potencial da cultura

### 7.2.1. Método de Wageningen

O Quadro 3 apresenta os resultados obtidos por meio da simulação do plantio das culturas de milho, sorgo e trigo nas épocas 1 (20/11/1995) e 2 (20/04/1996), nas localidades de Capinópolis e Montes Claros, utilizando o método de Wageningen para o cálculo da produtividade potencial.

A produção potencial da cultura do milho em Capinópolis nas épocas 1 e 2 foram iguais a 5637 e 2628 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente; já em Montes Claros esses valores foram 6183 e 3172 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

### Quadro 3

A produção potencial da cultura do sorgo em Capinópolis nas épocas 1 e 2 foram iguais a 4077 e 1812 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente; já em Montes Claros esses valores foram 4229 e 2153 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

A produção potencial da cultura do trigo em Capinópolis nas épocas 1 e 2 foram iguais a 964 e 795 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente; já em Montes Claros esses valores foram 1529 e 1310 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

Essas variações são explicadas pela diferença nos valores da produção de matéria seca total da cultura padrão (Y<sub>o</sub>) que, por sua vez, é diretamente proporcional a radiação de ondas curtas (R<sub>s</sub>). A influência da temperatura também pode ser notada principalmente na duração do ciclo da cultura (G) e também nos valores da correção para a temperatura (cT).

### **7.2.2. Método da zona agroecológica**

O Quadro 4 apresenta os resultados obtidos simulação do plantio das culturas de milho, soja, sorgo e trigo, épocas 1 (20/11/1995) e 2 (20/04/1996), nas localidades de Capinópolis e Montes Claros, utilizando o método da Zona Agroecológica para o cálculo da produtividade potencial.

A produção potencial da cultura do milho em Capinópolis nas épocas 1 e 2 foram iguais a 6512 e 6547 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente; já em Montes Claros esses valores foram 7553 e 7151 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. A produção potencial da cultura da soja em Capinópolis nas épocas 1 e 2 foram iguais a 3972 e

Quadro 4



4065 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente; já em Montes Claros esses valores foram 4558 e 4872 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. A produção potencial da cultura do sorgo em Capinópolis nas épocas 1 e 2 foram iguais a 3477 e 3497 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente; já em Montes Claros esses valores foram 3993 e 3809 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. A produção potencial da cultura do trigo em Capinópolis nas épocas 1 e 2 foram iguais a 4331 e 4501 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente; já em Montes Claros esses valores foram 4968 e 5364 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

A influência da temperatura também pode ser notada principalmente na duração do ciclo da cultura (G).

### **7.3. Produtividade real da cultura**

#### **7.3.1. Modelo de Stewart**

##### **7.3.1.1. Simulação do Plantio com Irrigação**

O Quadro 5 apresenta os resultados obtidos por simulação dos plantios das culturas de milho, soja, sorgo e trigo com irrigação, nas épocas 1 (20/11/1995) e 2 (20/04/1996), nas duas localidades, utilizando os métodos de Wageningen e Zona Agroecológica para o cálculo da produtividade potencial; para o cálculo da produtividade da cultura foi utilizado o modelo de Stewart e para o cálculo do valor do erro relativo percentual foi utilizado os dados de produtividade da FAO.

Os valores de  $k_y$ , para a simulação de plantio com irrigação, variaram em função da data e local de plantio devido à variação da duração do ciclo da cultura. Por outro lado, praticamente não houve variação na razão  $E_{Tr}/E_{Tm}$  para as datas e locais simulados, cujos valores foram aproximadamente iguais a 1.

Os valores de  $k_y$  para a cultura do milho em Capinópolis nas épocas 1 e 2 foram iguais a 0,782 e 0,802, respectivamente; já em Montes Claros esses valores foram 0,766 e 0,794  $\text{kg ha}^{-1}$ , respectivamente.

#### Quadro 5

Os valores de  $k_y$  para a cultura da soja em Capinópolis nas épocas 1 e 2 foram iguais a 0,512 e 0,530, respectivamente; já em Montes Claros esses valores foram 0,499 e 0,524  $\text{kg ha}^{-1}$ , respectivamente.

Os valores de  $k_y$  para a cultura do sorgo em Capinópolis nas épocas 1 e 2 foram iguais a 0,532 e 0,545, respectivamente; já em Montes Claros esses valores foram 0,519 e 0,542  $\text{kg ha}^{-1}$ , respectivamente.

Os valores de  $k_y$  para a cultura do trigo em Capinópolis nas épocas 1 e 2 foram iguais a 0,480 e 0,490, respectivamente; já em Montes Claros esses valores foram 0,472 e 0,487  $\text{kg ha}^{-1}$ , respectivamente.

Nas épocas analisadas, verifica-se que os valores dos coeficientes da cultura ( $k_y$ ) das culturas, obtidos por simulação, foram menores do que os valores médio para o período total de crescimento de Doorenbos e Kassam (Tabela 1).

As produtividades da cultura ( $Y_r$ ) do milho em Capinópolis na época 1 utilizando os métodos da Zona Agroecológica e de Wageningen para o cálculo da produtividade potencial foram iguais a 7413 e 6418  $\text{kg ha}^{-1}$ , respectivamente; os correspondentes valores do ERP foram  $-7,3$  e  $-19,8\%$ ; estes valores para a época 2 foram iguais a 7463 e 2995  $\text{kg ha}^{-1}$ , respectivamente; os correspondentes valores do ERP foram  $-6,7$  e  $-62,6\%$ . Em Montes Claros, na época 1, os valores de  $Y_r$  para o milho utilizando os métodos da Zona Agroecológica e de Wageningen para o cálculo da produtividade potencial foram iguais a 8609 e 7048  $\text{kg ha}^{-1}$ , respectivamente; os correspondentes valores do ERP foram  $-7,6$  e  $-11,9\%$ ; estes valores para a época 2 foram iguais a 8138 e 3610  $\text{kg ha}^{-1}$ , respectivamente; os correspondentes valores do ERP foram  $-1,7$  e  $-54,9\%$ .

As produtividades da cultura ( $Y_r$ ) da soja em Capinópolis na época 1 utilizando o método da Zona Agroecológica para o cálculo da produtividade potencial foi igual a 4513  $\text{kg ha}^{-1}$ , com ERP igual a 50,4; este valor para a época 2 foi igual a 4616  $\text{kg ha}^{-1}$ , com ERP igual a 53,9%. Em Montes Claros, na época 1, os valores de  $Y_r$  para a soja utilizando o método da Zona Agroecológica para o cálculo da produtividade potencial foi igual a 5196  $\text{kg ha}^{-1}$ , com ERP igual

a 50,4%; este valor para a época 2 foi igual a 5553 kg ha<sup>-1</sup>, com ERP igual a 85,1%.

As produtividades da cultura (Yr) do sorgo em Capinópolis na época 1 utilizando os métodos da Zona Agroecológica e de Wageningen para o cálculo da produtividade potencial foram iguais a 3962 e 4646 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente; os correspondentes valores do ERP foram -7,9 e 8,0%; estes valores para a época 2 foram iguais a 3983 e 2064 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente; os correspondentes valores do ERP foram -7,4 e -52,0%. Em Montes Claros, na época 1, os valores de Yr para o sorgo utilizando os métodos da Zona Agroecológica e de Wageningen para o cálculo da produtividade potencial foram iguais a 4552 e 4821 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente; os correspondentes valores do ERP foram 5,9 e 12,1%; estes valores para a época 2 foram iguais a 4341 e 2454 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente; os correspondentes valores do ERP foram 1,0 e -42,9%.

As produtividades da cultura (Yr) do trigo em Capinópolis na época 1 utilizando os métodos da Zona Agroecológica e de Wageningen para o cálculo da produtividade potencial foram iguais a 4935 e 1098 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente; os correspondentes valores do ERP foram -1,3 e -78,0%; estes valores para a época 2 foram iguais a 5132 e 906 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente; os correspondentes valores do ERP foram 2,6 e -81,9%. Em Montes Claros, na época 1, os valores de Yr para o trigo utilizando os métodos da Zona Agroecológica e de Wageningen para o cálculo da produtividade potencial foram iguais a 5664 e 1743 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente; os correspondentes valores do ERP foram 13,3 e -65,1%; estes valores para a época 2 foram iguais a 6114 e 1493 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente; os correspondentes valores do ERP foram 22,3 e -70,1%.

A produtividade das culturas de milho, soja, sorgo e trigo dependeram apenas da produtividade potencial da cultura uma vez que para o mesmo local e data de plantio os valores de ky e ETr/ETm foram iguais.

### **7.3.1.2. Simulação do Plantio sem Irrigação**

O Quadro 6 apresenta os resultados obtidos por simulação dos plantios das culturas de milho, soja, sorgo e trigo sem irrigação, nas épocas 1 (20/11/1995) e 2 (20/04/1996), nas duas localidades, utilizando os métodos de Wageningen e Zona Agroecológica para o cálculo da produtividade potencial; para o cálculo da produtividade da cultura foi utilizado o modelo de Stewart e para o cálculo do valor do erro relativo percentual foi utilizado os dados de produtividade do IBGE.

O valor de  $k_y$  variou em função da data e local de plantio devido à variação da duração do ciclo da cultura. Os valores de  $k_y$  para a simulação de plantio sem irrigação foram iguais aos da simulação de plantio com irrigação. A variação da razão  $E_{Tr}/E_{Tm}$  variou em função da data e local de plantio devido a variação do total da precipitação efetiva durante o ciclo da cultura.

Os valores de  $E_{Tr}/E_{Tm}$  para a cultura do milho em Capinópolis nas épocas 1 e 2 foram iguais a 0,929 e 0,195, respectivamente; e em Montes Claros nas épocas 1 e 2 foram iguais a 0,491 e 0,082.

Os valores de  $E_{Tr}/E_{Tm}$  para a cultura da soja em Capinópolis nas épocas 1 e 2 foram iguais a 0,918 e 0,199, respectivamente; e em Montes Claros nas épocas 1 e 2 foram iguais a 0,506 e 0,084.

Os valores de  $E_{Tr}/E_{Tm}$  para a cultura do sorgo em Capinópolis nas épocas 1 e 2 foram iguais a 0,962 e 0,228, respectivamente; e em Montes Claros nas épocas 1 e 2 foram iguais a 0,528 e 0,081.

Os valores de  $E_{Tr}/E_{Tm}$  para a cultura do trigo em Capinópolis nas épocas 1 e 2 foram iguais a 0,950 e 0,224, respectivamente; e em Montes Claros nas épocas 1 e 2 foram iguais a 0,552 e 0,095.

As produtividades da cultura ( $Y_r$ ) do milho em Capinópolis na época 1 utilizando os métodos da Zona Agroecológica e de Wageningen para o cálculo da

produtividade potencial foram iguais a 7011 e 6070 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente; os correspondentes valores do ERP foram 175,8 e 138,8%; estes valores para a

## Quadro 6

época 2 foram iguais a 2644 e 1061 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente; os correspondentes valores do ERP foram 4,0 e -58,3%. Em Montes Claros, na época 1, os valores de Yr para a soja utilizando os métodos da Zona Agroecológica e de Wageningen para o cálculo da produtividade potencial foram iguais a 5255 e 4302 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente; os correspondentes valores do ERP foram 106,7 e 69,2%; estes valores para a época 2 foram iguais a 2206 e 979 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente; os correspondentes valores do ERP foram -13,2 e -61,5%.

As produtividades da cultura (Yr) da soja em Capinópolis na época 1 utilizando o método da Zona Agroecológica para o cálculo da produtividade potencial foi igual a 4339 kg ha<sup>-1</sup>, com ERP igual a 122,2; este valor para a época 2 foi igual a 2667 kg ha<sup>-1</sup>, com ERP igual a 36,5%. Em Montes Claros, na época 1, os valores de Yr para a soja utilizando o método da Zona Agroecológica para o cálculo da produtividade potencial foi igual a 3915 kg ha<sup>-1</sup>, com ERP igual a 100,5%; este valor para a época 2 foi igual a 2886 kg ha<sup>-1</sup>, com ERP igual a 47,8%.

As produtividades da cultura (Yr) do sorgo em Capinópolis na época 1 utilizando os métodos da Zona Agroecológica e de Wageningen para o cálculo da produtividade potencial foram iguais a 3437 e 3640 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente; os correspondentes valores do ERP foram 243,7 e 264,0%; estes valores para a época 2 foram iguais a 3883 e 4554 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente; os correspondentes valores do ERP foram 288,3 e 355,4%. Em Montes Claros, na época 1, os valores de Yr para o sorgo utilizando os métodos da Zona Agroecológica e de Wageningen para o cálculo da produtividade potencial foram iguais a 2179 e 1232 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente; os correspondentes valores do ERP foram 117,9 e 23,2%; estes valores para a época 2 foram iguais a 2310 e 1197 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente; os correspondentes valores do ERP foram 131,0 e 19,7%.

As produtividades da cultura (Yr) do trigo em Capinópolis na época 1 utilizando os métodos da Zona Agroecológica e de Wageningen para o cálculo da produtividade potencial foram iguais a 4466 e 1374 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente; os

correspondentes valores do ERP foram 346,6 e 37,4%; estes valores para a época 2 foram iguais a 4818 e 1072 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente; os correspondentes valores do ERP foram 381,8 e 7,2%. Em Montes Claros, na época 1, os valores de Yr para o trigo utilizando os métodos da Zona Agroecológica e de Wageningen para o cálculo da produtividade potencial foram iguais a 3423 e 836 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente; os correspondentes valores do ERP foram 242,3 e -16,4%; estes valores para a época 2 foram iguais a 3182 e 562 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente; os correspondentes valores do ERP foram 218,2 e -43,8%.

A produtividade das culturas de milho e soja dependeu apenas da produtividade potencial da cultura uma vez que para o mesmo local e data de plantio os valores de ky e ETr/ETm foram iguais.

### **7.3.2. Modelo de Mantovani**

#### **7.3.2.1. Simulação do Plantio com Irrigação**

O Quadro 7 apresenta os resultados obtidos por simulação dos plantios das culturas de milho, soja, sorgo e trigo com irrigação, nas épocas 1 (20/11/1995) e 2 (20/04/1996), nas duas localidades, utilizando os métodos de Wageningen e Zona Agroecológica para o cálculo da produtividade potencial; para o cálculo da produtividade da cultura foi utilizado o modelo de Mantovani e para o cálculo do valor do erro relativo percentual foi utilizado os dados de produtividade da FAO.

O valor de ky variou em função da data e local de plantio devido à variação da duração do ciclo da cultura. Os valores de ky para a simulação de plantio com irrigação utilizando o método de Mantovani foram os mesmos que os obtidos com o método de Stewart. O valor de p variou em função da data e local de plantio devido a variação do total da precipitação efetiva durante o ciclo da cultura. O

valor de Cd variou em função da data e local de plantio devido a variação em razão das lâminas bruta aplicada e requerida durante o ciclo da cultura.

#### Quadro 7

Os valores de p na época 1, para todas culturas e localidades consideradas, foram iguais a 1. Por outro lado, na época 2, os valores de p, em Capinópolis e em Montes Claros, para o milho foram iguais a 0,134 e 0,028, respectivamente; para a soja foram 0,141 e 0,028, respectivamente; para o sorgo foram 0,173 e 0,027, respectivamente; e para o trigo foram 0,154 e 0,032, respectivamente.

Os valores de Cd da cultura do milho em Capinópolis nas épocas 1 e 2 foram iguais a 0,00423 e 0,00419, respectivamente; esses valores em Montes Claros foram 0,00759 e 0,00291, respectivamente. Os valores de Cd da cultura da soja em Capinópolis nas épocas 1 e 2 foram iguais a 0,00277 e 0,00695, respectivamente; esses valores em Montes Claros foram 0,00564 e 0,00734, respectivamente. Os valores de Cd da cultura do sorgo em Capinópolis nas épocas 1 e 2 foram iguais a 0,00082 e 0,00481, respectivamente; esses valores em Montes Claros foram 0,00817 e 0,00468, respectivamente. Os valores de Cd da cultura do trigo em Capinópolis nas épocas 1 e 2 foram iguais a 0,00146 e 0,00695, respectivamente; esses valores em Montes Claros foram 0,00864 e 0,00370, respectivamente.

As produtividades da cultura (Yr) do milho em Capinópolis na época 1 utilizando os métodos da Zona Agroecológica e de Wageningen para o cálculo da produtividade potencial foram iguais a 7423 e 6426 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente; os correspondentes valores do ERP foram -7,2 e -19,7%; estes valores para a época 2 foram iguais a 7442 e 2887 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente; os correspondentes valores do ERP foram -7,0 e -62,7%. Em Montes Claros, na época 1, os valores de Yr para o milho utilizando os métodos da Zona Agroecológica e de Wageningen para o cálculo da produtividade potencial foram iguais a 8610 e 7048 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente; os correspondentes valores do ERP foram -7,6 e -11,9%; estes valores para a época 2 foram iguais a 8134 e 3608 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente; os correspondentes valores do ERP foram 1,7 e -54,9%.

As produtividades da cultura (Yr) da soja em Capinópolis na época 1 utilizando o método da Zona Agroecológica para o cálculo da produtividade

potencial foi igual a  $4528 \text{ kg ha}^{-1}$ , com ERP igual a 50,9%; este valor para a época 2 foi igual a  $4620 \text{ kg ha}^{-1}$ , com ERP igual a 54,0%. Em Montes Claros, na época 1, os valores de Yr para a soja utilizando o método da Zona Agroecológica para o cálculo da produtividade potencial foi igual a  $5196 \text{ kg ha}^{-1}$ , com ERP igual a 73,2%; este valor para a época 2 foi igual a  $5533 \text{ kg ha}^{-1}$ , com ERP igual a 84,4%.

As produtividades da cultura (Yr) do sorgo em Capinópolis na época 1 utilizando os métodos da Zona Agroecológica e de Wageningen para o cálculo da produtividade potencial foram iguais a 3963 e  $4647 \text{ kg ha}^{-1}$ , respectivamente; os correspondentes valores do ERP foram -7,8 e 8,1%; estes valores para a época 2 foram iguais a 3978 e  $2062 \text{ kg ha}^{-1}$ , respectivamente; os correspondentes valores do ERP foram -7,5 e -52,1%. Em Montes Claros, na época 1, os valores de Yr para o sorgo utilizando os métodos da Zona Agroecológica e de Wageningen para o cálculo da produtividade potencial foram iguais a 4552 e  $4821 \text{ kg ha}^{-1}$ , respectivamente; os correspondentes valores do ERP foram 5,9 e 12,1%; estes valores para a época 2 foram iguais a 4332 e  $2449 \text{ kg ha}^{-1}$ , respectivamente; os correspondentes valores do ERP foram 0,7 e -43,1%.

As produtividades da cultura (Yr) do trigo em Capinópolis na época 1 utilizando os métodos da Zona Agroecológica e de Wageningen para o cálculo da produtividade potencial foram iguais a 4938 e  $1098 \text{ kg ha}^{-1}$ , respectivamente; os correspondentes valores do ERP foram -1,2 e -78,0%; estes valores para a época 2 foram iguais a 5117 e  $904 \text{ kg ha}^{-1}$ , respectivamente; os correspondentes valores do ERP foram 2,3 e -81,9%. Em Montes Claros, na época 1, os valores de Yr para o trigo utilizando os métodos da Zona Agroecológica e de Wageningen para o cálculo da produtividade potencial foram iguais a 5664 e  $1743 \text{ kg ha}^{-1}$ , respectivamente; os correspondentes valores do ERP foram 13,3 e -65,1%; estes valores para a época 2 foram iguais a 6104 e  $1491 \text{ kg ha}^{-1}$ , respectivamente; os correspondentes valores do ERP foram 22,1 e -70,2%.

A produtividade das culturas de milho e soja dependeu apenas da produtividade potencial da cultura uma vez que para o mesmo local e data de plantio os valores de  $k_y$  e  $C_d$  foram iguais.

## 7.4. Discussão dos Resultados

### 7.4.1. Melhores valores do ERP para plantios com irrigação

O Quadro 8 apresenta o resumo dos melhores resultados dos valores do ERP obtidos por meio da simulação dos plantios das culturas de milho, soja, sorgo e trigo com irrigação, nas épocas 1 (20/11/1995) e 2 (20/04/1996), nas localidades de Capinópolis e Montes Claros, utilizando os métodos de Wageningen e Zona Agroecológica para o cálculo da produtividade potencial, utilizando os modelos Stewart e de Mantovani para o cálculo da produtividade da cultura e os dados de produtividade da FAO para o cálculo do valor do erro relativo percentual.

O resumo dos melhores resultados dos valores do ERP obtidos por meio de simulação do plantio com irrigação das culturas de milho e soja nas localidades de Capinópolis e Montes Claros nas épocas 1 e 2 indicam que o método da Zona Agroecológica foi o que melhor estimou a produtividade potencial das culturas consideradas.

Para simulação com irrigação, o erro relativo percentual (ERP) para a estimativa da produtividades da cultura do milho utilizando o modelo de Mantovani variou de  $-7,2$  a  $7,6\%$ ; essa variação para o modelo de Stewart foi de  $-7,3$  a  $7,6\%$ . Os valores do ERP para a estimativa da produtividade da cultura da soja utilizando o modelo de Mantovani variou de  $50,9$  a  $84,4$ ; essa variação para o modelo de Stewart foi de  $50,4$  a  $85,1\%$ . Os valores do ERP para a estimativa da produtividade da cultura do sorgo utilizando o modelo de Mantovani variou de  $-$

7,8 a 5,9; essa variação para o modelo de Stewart foi de -7,9 a 5,9%. Os valores do ERP para a estimativa da produtividades da cultura do trigo utilizando o modelo de Mantovani variou de -1,2 a 22,1; essa variação para o modelo de Stewart foi de -1,3 a 22,3%.

Quadro 8 – Resumo dos melhores resultados dos valores do ERP obtidos por meio da simulação dos plantios das culturas de milho e soja, com irrigação

MCPProd	Cultura	Época de Plantio	Local	MCPProdPot	Yr (kg ha <sup>-1</sup> )	ERP (%)
Stewart	milho	1	Capinópolis	Zona agroecológica	7413	-7,3
Mantovani	milho	1	Capinópolis	Zona agroecológica	7423	-7,2
Mantovani	milho	2	Capinópolis	Zona agroecológica	7442	-7,0
Stewart	milho	2	Capinópolis	Zona agroecológica	7463	-6,7
Mantovani	milho	2	Montes Claros	Zona agroecológica	8134	1,7
Stewart	milho	2	Montes Claros	Zona agroecológica	8138	1,7
Mantovani	milho	1	Montes Claros	Zona agroecológica	8610	7,6
Stewart	milho	1	Montes Claros	Zona agroecológica	8609	7,6
Stewart	soja	1	Capinópolis	Zona agroecológica	4513	50,4
Mantovani	soja	1	Capinópolis	Zona agroecológica	4528	50,9
Stewart	soja	2	Capinópolis	Zona agroecológica	4616	53,9
Mantovani	soja	2	Capinópolis	Zona agroecológica	4620	54,0
Mantovani	soja	1	Montes Claros	Zona agroecológica	5196	73,2

Stewart	soja	1	Montes Claros	Zona agroecológica	5196	73,2
Mantovan i	soja	2	Montes Claros	Zona agroecológica	5533	84,4
Stewart	soja	2	Montes Claros	Zona agroecológica	5553	85,1
Stewart	sorgo	1	Capinópolis	Zona agroecológica	3962	-7,9
Mantovan i	sorgo	1	Capinópolis	Zona agroecológica	3963	-7,8
Mantovan i	sorgo	2	Capinópolis	Zona agroecológica	3978	-7,5
Stewart	sorgo	2	Capinópolis	Zona agroecológica	3983	-7,4
Mantovan i	sorgo	2	Montes Claros	Zona agroecológica	4332	0,7
Stewart	sorgo	2	Montes Claros	Zona agroecológica	4341	1,0
Mantovan i	sorgo	1	Montes Claros	Zona agroecológica	4552	5,9
Stewart	sorgo	1	Montes Claros	Zona agroecológica	4552	5,9
Stewart	trigo	1	Capinópolis	Zona agroecológica	4935	-1,3
Mantovan i	trigo	1	Capinópolis	Zona agroecológica	4938	-1,2
Mantovan i	trigo	2	Capinópolis	Zona agroecológica	5117	2,3
Stewart	trigo	2	Capinópolis	Zona agroecológica	5132	2,6
Mantovan i	trigo	1	Montes Claros	Zona agroecológica	5664	13,3
Stewart	trigo	1	Montes Claros	Zona agroecológica	5664	13,3
Mantovan i	trigo	2	Montes Claros	Zona agroecológica	6104	22,1
Stewart	trigo	2	Montes Claros	Zona agroecológica	6114	22,3

MCProd – método de cálculo da produtividade real; MCProdPot – método de cálculo da produtividade potencial; Yr – produtividade real; e ERP – erro relativo percentual.

Verifica-se ainda que, nos casos estudados, os valores do ERP foram muito elevados para as estimativas da produtividade da cultura de soja por ambos métodos de Stewart e Mantovani.

#### 7.4.2. Melhores valores do ERP para plantios sem irrigação

O Quadro 9 apresenta o resumo dos melhores resultados dos valores do ERP obtidos por meio da simulação dos plantios das culturas de milho, soja, sorgo e trigo sem irrigação, nas épocas 1 (20/11/1995) e 2 (20/04/1996), nas localidades de Capinópolis e Montes Claros, utilizando os métodos de Wageningen e Zona Agroecológica para o cálculo da produtividade potencial, utilizando o modelo de Stewart para o cálculo da produtividade da cultura e os dados de produtividade da IBGE para o cálculo do valor do erro relativo percentual.

Quadro 9 – Resumo dos melhores resultados dos valores do ERP obtidos por meio da simulação dos plantios das culturas de milho e soja, sem irrigação

MCProd	Cultura	Época de Plantio	Local	MCProdPot	Yr(kg ha <sup>-1</sup> )	ERP(%)
Stewart	trigo	2	Capinópolis	Wageningen	562	-43,8
Stewart	trigo	2	Montes Claros	Wageningen	836	-16,4
Stewart	trigo	1	Capinópolis	Wageningen	1072	7,2

Stewart	sorgo	2	is Capinópolis	Wageningen	1197	19,7
Stewart	sorgo	2	Montes Claros	Wageningen	1232	23,2
Stewart	trigo	1	Montes Claros	Wageningen	1374	37,4
Stewart	milho	1	Montes Claros	Wageningen	4302	69,2
Stewart	milho	1	Capinópolis	Wageningen	6070	138,8
Stewart	milho	2	Montes Claros	Zona agroecológica	2206	-13,2
Stewart	milho	2	Capinópolis	Zona agroecológica	2644	4,0
Stewart	soja	2	Capinópolis	Zona agroecológica	2667	36,5
Stewart	soja	2	Montes Claros	Zona agroecológica	2886	47,8
Stewart	soja	1	Montes Claros	Zona agroecológica	3915	100,5
Stewart	soja	1	Capinópolis	Zona agroecológica	4339	122,2
Stewart	sorgo	1	Montes Claros	Zona agroecológica	3437	243,7
Stewart	sorgo	1	Capinópolis	Zona agroecológica	3883	288,3

MCProd – método de cálculo da produtividade real; MCProdPot – método de cálculo da produtividade potencial; Yr – produtividade real; e ERP – erro relativo percentual.

O resumo dos melhores resultados dos valores do ERP obtidos por meio de simulação do plantio sem irrigação das culturas de milho, soja, sorgo e trigo nas localidades de Capinópolis e Montes Claros nas datas épocas 1 e 2 indicam que houve diferenças entre os métodos de Wageningen e da Zona Agroecológica.

Para simulação sem irrigação, o erro relativo percentual (ERP) para a estimativa da produtividades da cultura do milho utilizando o método de Wageningen variou de 138,8 a 7,6%; essa variação para o método da Zona Agroecológica foi de 4,0 a 243,7%.

Para simulação do plantio da cultura do milho sem irrigação na época 1, o método de Wageningen apresentou os maiores valores do ERP, com valores iguais a -13,2 e 4,0% para as localidades de Capinópolis e Montes Claros, respectivamente. Por outro lado, na época 2, o método da Zona Agroecológica apresentou os maiores valores do ERP para a cultura do milho, com valores iguais a 138,8 e 69,2% para as localidades de Capinópolis e Montes Claros, respectivamente.

Para simulação do plantio da cultura da soja sem irrigação na época 1, o método da Zona Agroecológica apresentou os melhores valores do ERP, com valores iguais a 122,2 e 100,5% para as localidades de Capinópolis e Montes Claros, respectivamente. Na época 2, o método da Zona Agroecológica também apresentou os melhores valores do ERP para a cultura da soja, com valores iguais a 36,5 e 47,8% para as localidades de Capinópolis e Montes Claros, respectivamente.

Para simulação do plantio da cultura do sorgo sem irrigação na época 1, o método da Zona Agroecológica apresentou os melhores valores do ERP, com valores iguais a 288,3 e 243,7% para as localidades de Capinópolis e Montes Claros, respectivamente. Por outro lado, na época 2, o método de Wageningen apresentou os melhores valores do ERP para a cultura do sorgo, com valores iguais a 19,7 e 23,2% para as localidades de Capinópolis e Montes Claros, respectivamente.

Para simulação do plantio da cultura do trigo sem irrigação na época 1, o método de Wageningen apresentou os melhores valores do ERP, com valores iguais a 7,2 e 37,4% para as localidades de Capinópolis e Montes Claros,

respectivamente. Na na época 2, o método de Wageningen também apresentou os melhores valores do ERP para a cultura do trigo, com valores iguais a  $-43,8$  e  $-16,4\%$  para as localidades de Capinópolis e Montes Claros, respectivamente.

De um modo geral, o modelo de Stewart combinado com os métodos de Wageningen e da Zona agroecología tenderam a superestimar a produtividade das culturas nos plantios sem irrigação simulados em Capinópolis e em Montes Claros.

## 8. RESUMO E CONCLUSÕES

Nas épocas analisadas, verifica-se que a duração do ciclo das culturas de milho e soja tendem a ser maiores em Montes Claros do que em Capinópolis.

A estimativa da produtividade potencial das culturas de milho, sorgo e trigo, utilizando o método de Wageningen foi proporcional a produção de matéria seca total da cultura padrão que, por sua vez, foi diretamente proporcional a radiação de ondas curtas, como era resperado. A influência da temperatura também influenciou nesses resultados principalmente na duração do ciclo da cultura e também nos valores da correção para a temperatura.

No método da Zona Agroecológica, também utilizado para o cálculo da produtividade potencial, a influência da temperatura também pode ser notada principalmente na duração do ciclo da cultura.

O modelo de Stewart, usado para a estimativa da produtividade das culturas de milho, soja, sorgo e trigo com e sem irrigação dependeu apenas da produtividade potencial da cultura uma vez que para o mesmo local e data de plantio os valores de  $k_y$  e  $E_{Tr}/E_{Tm}$  foram iguais. O valor de  $k_y$  variou em função da data e local de plantio devido à variação da duração do ciclo da cultura. Na simulação do plantio com irrigação, praticamente não houve variação da razão

$ET_r/ET_m$  para as datas e locais simulados. Já na simulação do plantio com irrigação, a razão  $ET_r/ET_m$  variou em função da data e local de plantio devido a variação do total da precipitação efetiva durante o ciclo da cultura.

O modelo de Mantovani, usado para a estimativa da produtividade das culturas de milho, soja, sorgo e trigo com irrigação dependeu apenas da produtividade potencial da cultura uma vez que para o mesmo local e data de plantio os valores de  $k_y$  e  $C_d$  foram iguais. O valor de  $k_y$  variou em função da data e local de plantio devido à variação da duração do ciclo da cultura. A variação do valor de  $p$  variou em função da data e local de plantio devido a variação do total da precipitação efetiva durante o ciclo da cultura. A variação do valor de  $C_d$  variou em função da data e local de plantio devido a variação em razão das lâminas bruta aplicada e requerida durante o ciclo da cultura.

Os modelos de Stewart e o de Mantovani são igualmente indicados para estimar a produtividade das culturas de milho, soja, sorgo e trigo com irrigação.

A combinação entres os modelos de Stewart ou de Mantovani como o método da Zona Agroecológica foi o que estimou melhor a produtividade das culturas do milho, soja, sorgo e trigo com irrigação.

De um modo geral, o modelo de Stewart combinado com os métodos de Wageningen e da Zona agroecológica tenderam a superestimar a produtividade das culturas nos plantios sem irrigação em Capinópolis e em Montes Claros.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BURMAN, R.; POCHOP, L. O. Evaporation, Evapotranspiration and Climatic Data. Elsevier Science. Amsterdam, 1994. 278p.
- CASTRO, P. R. C., APPEZZATO, B., LUCCHESI, A. A., CESAR, M. A. A., DECHEN, A. R., ELIAS, M. H. Desenvolvimento, nutrição mineral e caracteres tecnológicos comparados em cultivares de sorgo sacarino. Anais do 16 Congresso Nacional de Milho e Sorgo. Sete Lagoas, MG, EMBRAPA/CNPMS: 472-483,1986.
- CHEN, D.; WALLENDER, W. W. Economic Sprinkler Selection, Spacing, and orientation. Trans. of the Asae, 1984. 737-743p.
- CONFALONE, A. E. Captura e utilização da radiação na cultura de soja [*Glycine max* (L.) Merrill] com e sem irrigação em diferentes estádios de desenvolvimento. Viçosa: UFV, 1998. 74p. (Tese de Mestrado).
- DOORENBOS, J., KASSAM, A. H. Yield response to water. FAO: Irrigation and Drainage Paper, 33, Rome, FAO, 1979.172p.
- FAO. Annex V: FAO Penman-Monteith Formula. In: Expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements, Rome, Italy, 1990. 24p.
- FONTES, L. E. F., OLIVEIRA, L. B. Curva de retenção de umidade de solos do norte de Minas Gerais, área de atuação da SUDENE. Rio de Janeiro, EMBRAPA-SNLCS, Boletim de Pesquisa 4, 1982.19p.

- HANKS, R. J. Model for prediction plant yield as influenced by water use. *Agronomy J.*, Madison, 66: 660-665, 1974.
- HEXEM, R. W.; HEADY, E. O. Water production functions for irrigated agriculture. The Iowa State University Press. 1978. 215p.
- IBGE. Censo Agropecuário 1995-1996. Número 16 – Minas Gerais. Rio de Janeiro. 1998. 421p.
- KELLER, J., BLIESNER, R. D. Sprinkler and trickle irrigation. An Avi Book, New York. 1990. 652p.
- LEAL, B. G. Caracterização da radiação, análise de crescimento e do desenvolvimento de milho (*Zea mays* L.) em três densidades de plantio. Viçosa: UFV, 1993. 55p. (Tese de Mestrado).
- LEME, A. E. J. Otimização da irrigação da cana de açúcar (*Sacharum spp*) via coeficientes culturais, função de produção e programação dinâmica. San Carlos, 1993. 399 p. (Doutor - Universidade de São Paulo).
- MANTOVANI, E. C. Desarrollo y evaluación de modelos para el manejo del riego: estimación de la evapotranspiración e efectos de la uniformidad de aplicación del riego sobre la producción de los cultivos. Córdoba, España. 1993. 184 p. (Doctorado Universidad de Córdoba Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos).
- MANTOVANI, E. C., RAMOS, M. M. Manejo da irrigação. In: *Quimigação*. Editores COSTA, E. F., VIEIRA, R. F. e VIANA, P. A. EMBRAPA/CNPMS, Brasília, DF. 1994. p129-158.
- MOTA, F. S., OLIVEIRA, M. O. Indicação para a elaboração de um programa de computador para o cálculo do balanço hídrico diário versátil (adaptado de Baier et al., 1972) para uso no Brasil. *Boletim Técnico do Instituto Nacional de Meteorologia* n.16:23-36, 1978.
- PENNING de VRIES, F. W. T.; JANSEN, D. M.; BERGE, H. F. M.; TEM BAKEMA, A. Simulação de ecophysiological processes of growth in several annual crops. IRRI los Baños, Pudoc Wageningen 1989. 271 p.

VAUX, H. J. Jr.; PRUITT, W. O.; HATCHETT, S. A.; SOUZA F. Optimization of water use with respect to crop production. University of California, Davis, California. 1981. 173p.

WEIR, A. H., BRAGG, P. L., PORTER, J. R., RAYNER, J. H. A winter wheat crop simulation model without water or nutrient limitations. J. Agric. Sci. Camb., 102:371-382, 1984.