



UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS

**SISTEMA COMPUTACIONAL
PARA A DETERMINAÇÃO DA
LÂMINA ECONÔMICA ÓTIMA EM
IRRIGAÇÃO PRESSURIZADA**

MARCELO CARAZO CASTRO

2001

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da UFLA**

Castro, Marcelo Carazo

Sistema computacional para a determinação da lâmina econômica ótima em irrigação pressurizada / Marcelo Carazo Castro. -- Lavras : UFLA, 2001.
138 p. : il.

Orientador: Manoel Alves de Faria.
Dissertação (Mestrado) – UFLA.
Bibliografia.

1. Sistema computacional. 2. Irrigação pressurizada. 3. Lâmina de irrigação. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD-631.587

52143
MFN 36658

MARCELO CARAZO CASTRO

**SISTEMA COMPUTACIONAL PARA A
DETERMINAÇÃO DA LÂMINA ECONÔMICA ÓTIMA
EM IRRIGAÇÃO PRESSURIZADA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Irrigação e Drenagem, para obtenção do título de "Mestre".

Orientador

Prof. Manoel Alves de Faria



LAVRAS
MINAS GERAIS – BRASIL
2001

MARCELO CARAZO CASTRO

**SISTEMA COMPUTACIONAL PARA A
DETERMINAÇÃO DA LÂMINA ECONÔMICA ÓTIMA
EM IRRIGAÇÃO PRESSURIZADA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Irrigação e Drenagem, para obtenção do título de "Mestre".

APROVADA em 18 de maio de 2001

Prof. Antônio Marciano da Silva UFLA

Prof. Pedro Castro Neto UFLA


Prof. Manoel Alves de Faria
UFLA
(Orientador)

**LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL**

*“Aprender é como remar contra a correnteza:
sempre que se para, volta-se para trás.”*
(Confúcio, 551-479 a.c.)

*“O que quer que você seja capaz de fazer,
ou imagina ser capaz, comece.
A ousadia contém genialidade, poder e magia.”*
(Johann Wolfgang Goethe,
poeta e dramaturgo alemão, 1749-1832)

OFEREÇO

A Deus Pai, por conceder a percepção do mundo a nossa volta;
A Deus Filho, Jesus Cristo, por mostrar o sentido maior da vida;
Ao Deus Espírito Santo, por não me deixar desanimar na fé.

Aos meus pais pela torcida e apoio nesta fase marcante de minha vida;
À minha esposa Selma por compreender as intermináveis horas de estudo.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, que, com os seus santos e santas, não cessa de olhar por nós.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) pela oportunidade de realização do curso.

Ao CNPq pelo suporte financeiro para a realização do curso.

Ao professor Manoel Alves de Faria pela amizade, orientação, confiança e abertura.

Aos professores membros da banca examinadora, Antônio Marciano da Silva e Pedro Castro Neto, pelas sugestões feitas ao trabalho.

À Lavras Irrigação por fornecer grande parte dos dados técnico-econômicos utilizados nos exemplos deste trabalho.

BIOGRAFIA

Marcelo Carazo Castro, filho de Edmundo Carazo Castro e Dalma Nise Cunha Castro, nasceu em Belo Horizonte/MG, em 24 de junho de 1968. Estudou no colégio Santo Antônio, em Belo Horizonte, concluindo o segundo grau em 1986.

Em março de 1987 iniciou o curso de Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa (UFV), graduando-se em abril de 1992. Em maio de 1992 ingressou no curso de Engenharia de Agrimensura, nesta mesma instituição, graduando-se em fevereiro de 1995.

De maio de 1995 a fevereiro de 1999, trabalhou nas duas principais empresas de irrigação do noroeste paulista, Irrigaterra e JIMA, na função de projetista.

Em maio de 1999 iniciou o curso de mestrado em Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Lavras (UFLA), defendendo a Dissertação no dia 18 de maio de 2001.

SUMÁRIO

| | Página |
|---|---------------|
| RESUMO | xii |
| ABSTRACT | xiii |
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 2 REVISÃO DE LITERATURA | 3 |
| 2.1 Considerações Gerais | 3 |
| 2.2. Balanço de Água no Solo | 6 |
| 2.2.1 Introdução | 6 |
| 2.2.2 Armazenamento de Água no Solo | 7 |
| 2.2.3 Precipitação | 9 |
| 2.2.4 Evapotranspiração | 11 |
| 2.2.4.1 Considerações | 11 |
| 2.2.4.2 Métodos de Estimativa da Evapotranspiração | 12 |
| 2.2.5 Análise Estatística dos Dados Climáticos | 18 |
| 2.2.5.1 Nível de Probabilidade | 18 |
| 2.2.5.2 Precipitação | 19 |
| 2.2.5.3 Evapotranspiração | 23 |
| 2.3 Cálculo das Lâminas de Irrigação | 25 |
| 2.4 Função Água-Produção de Culturas Agrícolas | 29 |
| 2.5 Avaliação Econômica de Sistemas Agrícolas Irrigados | 38 |

| | Página |
|--|---------------|
| 2.6 Otimização do Lucro em Agricultura Irrigada | 46 |
| 2.7 Engenharia de Software | 50 |
| 2.8 Programas Desenvolvidos para o Planejamento da Irrigação | 55 |
| | |
| 3 MATERIAL E MÉTODOS | 59 |
| 3.1 Parâmetros Técnicos | 59 |
| 3.1.1 Disponibilidade de Água no Solo | 59 |
| 3.1.2 Determinação do Consumo de Água Pela Cultura | 59 |
| 3.1.3 Precipitação | 62 |
| 3.1.4 Nível de Probabilidade Considerado | 63 |
| 3.1.5 Cálculo dos Dados Climáticos Prováveis | 63 |
| 3.1.6 Balanço de Água no Solo | 65 |
| 3.1.7 Outros Parâmetros Técnicos | 66 |
| 3.2 Parâmetros Econômicos e Metodologia | 67 |
| 3.2.1 Introdução | 67 |
| 3.2.2 Cálculo do Custo Fixo do Sistema | 67 |
| 3.2.3 Cálculo do Custo Variável do Sistema | 68 |
| 3.2.4 Determinação da Lâmina Econômica de Irrigação | 71 |
| 3.3 Elaboração do Sistema Computacional | 71 |
| | |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 78 |
| 4.1 Descrição do Sistema Computacional | 78 |
| 4.1.1 Introdução | 78 |
| 4.1.2 Arquivo de Dados Climáticos | 80 |
| 4.1.3 Configurações Gerais de Cálculo | 81 |
| 4.1.4 Obtenção da Lâmina Econômica Ótima | 82 |

| | Página |
|---|---------------|
| 4.1.5 Arquivos que Compõem o Programa | 83 |
| 4.2. Exemplos de Aplicação | 84 |
| 4.2.1 Introdução | 84 |
| 4.2.2 Dados Considerados nos Exemplos | 85 |
| 4.2.3 Exemplo de Determinação da Lâmina Econômica Ótima de Irrigação | 88 |
| 4.2.4 Exemplo de Análise da Viabilidade Econômica do Plantio Irrigado | 91 |
| 4.2.5 Exemplo de Determinação da Melhor Época de Plantio | 93 |
| 4.2.6 Exemplo de Seleção do Sistema de Irrigação de Melhor Retorno Econômico | 97 |
| 5 CONCLUSÕES | 98 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 99 |
| ANEXOS | 110 |

LISTA DE TABELAS

| Tabela | | Página |
|---------------|---|---------------|
| 1 | Equações Utilizadas para o Cálculo da Eficiência de Aplicação Potencial de Sistemas de Irrigação por Aspersão em Função da Evapotranspiração da Cultura de Referência e Velocidade do Vento | 27 |
| 2 | Funções Água-Produção Obtidas por Pesquisadores no Nordeste | 36 |
| 3 | Coefficientes da Função Água-Produção das Culturas Incluídas no Modelo $Y_{rel} = AC + BC(PE_{rel})^a - CC(PE_{rel})^b$ | 37 |
| 4 | Vida Útil e Taxa de Manutenção de Componentes de Sistemas de Irrigação | 42 |
| 5 | Custos de Operação e Manutenção dos Componentes do Sistema de Irrigação, em Porcentagem de seu Custo de Aquisição | 43 |
| 6 | Vida Útil de Alguns Elementos de Projetos de Irrigação | 43 |
| 7 | Componentes e sua Participação Relativa no Custo de Produção de Algumas Culturas Irrigadas | 46 |
| 8 | Parâmetros da Semi-Reta de Ajuste da Equação 85 Baseados na Umidade Relativa Média e Velocidade do Vento Diurno (VVD) | 60 |
| 9 | Equações do Coeficiente de Advecção (K_a) em Função do Porte da Cultura e da Área Irrigada (AI) Baseadas na Figura 1 | 62 |
| 10 | Dados Necessários ao Cálculo da Evapotranspiração em Função do Método | 81 |
| 11 | Principais Arquivos do Programa | 84 |

| Tabela | | Página |
|---------------|--|---------------|
| 12 | Orçamento Simplificado do Sistema de Irrigação por Pivô Central Utilizado nos Exemplos | 87 |
| 13 | Orçamento Simplificado do Sistema de Irrigação por Autopropelido, Tipo Carretel Enrolador, Utilizado no Exemplo | 87 |
| 14 | Valores Médios do Custo de Produção do Feijão para uma Produtividade de 1600kg/ha | 88 |

LISTA DE FIGURAS

| Figura | | Página |
|---------------|--|---------------|
| 1 | Representação do Coeficiente de Advecção em Função do Tamanho da Área Irrigada e do Porte da Cultura | 17 |
| 2 | Modelo Clássico Empregado no Planejamento de Programas | 52 |
| 3 | Esquema para a Elaboração de Modelos de Sistemas do Mundo Real | 52 |
| 4 | Fluxo Geral de Operações do Programa | 72 |
| 5 | Fluxograma Simplificado do Cálculo da Evapotranspiração Provável | 73 |
| 6 | Fluxograma Simplificado do Cálculo da Precipitação Provável . | 74 |
| 7 | Fluxograma Simplificado do Cálculo do Balanço de Água no Solo para uma Condição Específica de Reposição | 75 |
| 8 | Fluxograma Simplificado da Análise Econômica das Lâminas de Irrigação Simuladas | 76 |
| 9 | Estrutura Básica do Programa | 78 |
| 10 | Tela Principal do Programa Mostrando a Barra de Menu e Botões de Atalho | 79 |
| 11 | Valores do Lucro Ótimo em Função do Preço da Saca do Feijão | 92 |
| 12 | Valores da Lâmina Econômica Ótima de Irrigação em Função da Data de Plantio do Feijoeiro Irrigado por Pivô Central | 94 |
| 13 | Valores do Lucro Máximo Esperado em Função da Data de Plantio do Feijoeiro Irrigado por Pivô Central | 95 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|------------------|--|
| γ | constante psicrométrica, mm Hg ^o C; |
| λ | variável auxiliar; |
| σ | desvio padrão; |
| μ | valor médio dos dados agrupados; |
| β | parâmetro de escala da distribuição gama; |
| α | parâmetro de forma da distribuição gama; |
| ρ | massa específica global do solo, g/cm ³ ; |
| Δ | tangente da curva de saturação de vapor, mm Hg ^o C; |
| $\Delta\alpha$ | correção a ser aplicada ao parâmetro α da distribuição Gama; |
| $\Gamma(\alpha)$ | função Gama; |
| (es-ea) | déficit de pressão de vapor para medições a 2 metros de altura, kPa; |
| η_b | eficiência da bomba hidráulica, decimal; |
| η_m | eficiência do motor, decimal; |
| Δt | intervalo de tempo referente à diferença entre a quantidade de dias considerados no ano e t', dia; |
| A | variável auxiliar; |
| a, b | parâmetros locais que caracterizam a transmitância da atmosfera; |
| a_0, a_1, a_2 | parâmetros de ajuste da função água-produção; |
| AI | área total irrigada, ha; |
| AM | área molhada por planta, m ² ; |
| AS _I | área sombreada no dia I, m ² ; |
| AS _m | área máxima sombreada, m ² ; |
| B | diâmetro do bocal do aspersor, mm; |

| | |
|--------------|--|
| c | coeficiente de adequação da ETo calculada às condições locais; |
| C | valor do investimento; |
| CA | custo da água consumida, excluindo-se a tarifa fixa, R\$; |
| CAD | custo de administração direta e mão-de-obra, R\$; |
| CADP | quota anual de depreciação; |
| CARD | custo da água recalçada devido unicamente ao consumo do motor diesel, R\$/m ³ ; |
| CARE | custo da água recalçada devido unicamente ao consumo de energia elétrica, R\$/m ³ ; |
| CC | umidade correspondente à capacidade de campo, % peso; |
| CCST | custo de colheita, secagem e transporte da produção, R\$; |
| CD | consumo total horário de combustível do motor diesel, L/h; |
| CDEE | custo da demanda de energia elétrica, R\$/mês; |
| CDPS | custo da depreciação do equipamento de irrigação, R\$; |
| CE | custo da energia consumida, R\$; |
| CEE | consumo de energia elétrica, kWh; |
| CEe | condutividade elétrica do extrato saturado do perfil do solo na zona radicular, mmhos/cm; |
| CEi | condutividade elétrica da água de irrigação, mmhos/cm; |
| CFD | custos fixos diversos, R\$; |
| CFEE | custo total da demanda de energia elétrica, R\$; |
| CFT | custo fixo total, R\$; |
| CI | custo dos fertilizantes e defensivos utilizados na produção, R\$; |
| CM | custo com manutenção de componentes do sistema de irrigação, R\$; |
| CME | valor do consumo mensal de energia elétrica, R\$; |
| CMO | custo da mão de obra temporária, R\$; |
| CMTEE | custo mensal total da energia elétrica, R\$/mês; |

| | |
|-----------------|--|
| CS | custo do seguro do equipamento, R\$; |
| CU | coeficiente de uniformidade, decimal; |
| CUC | coeficiente de uniformidade de Christiansen, decimal; |
| CUCEE | custo unitário do consumo de energia elétrica, R\$/kWh; |
| CUD | custo unitário do diesel, R\$/L; |
| CUDEE | custo unitário da demanda de energia elétrica, R\$/kW; |
| CVD | custos variáveis diversos, R\$; |
| CVF | coeficiente de variação de fabricação, decimal; |
| CVT | custo variável total, R\$; |
| CW | custo da aplicação da água; |
| DCC | duração do ciclo da cultura, dias; |
| d_{EAN} | data de ocorrência de FS_{EAN} ; |
| d_{EAT} | data de ocorrência de FS_{EAT} ; |
| DPS | custo da depreciação do sistema de irrigação; |
| DTA | disponibilidade total de água no solo, mm; |
| DUA | disponibilidade unitária de água no solo, mm/cm de solo; |
| EA | eficiência de aplicação do sistema de irrigação localizada, decimal; |
| EAG | eficiência de aplicação global do sistema de irrigação, decimal; |
| EAP | eficiência de aplicação em potencial para $7 < IP < 17$, decimal; |
| EAP17 | eficiência de aplicação em potencial para $IP > 17$, decimal; |
| EAP7 | eficiência de aplicação em potencial para $IP < 7$, decimal; |
| EAPS | eficiência de aplicação potencial genérica do sistema, decimal; |
| EA _r | poder evaporante do ar à sombra, mm/dia; |
| EB | valor gasto com energia para bombeamento durante o ciclo da cultura; |
| EC | eficiência de condução de água, decimal; |
| EP | espaçamento de plantio, m ² ; |

| | |
|-----------------------------|---|
| ER | erro admissível no processo de integração, mm; |
| Et | evaporação do tanque Classe A, mm; |
| ETo | evapotranspiração de referência, mm/dia ou mm/mês; |
| ETo_(máx) | valor máximo de ETo ocorrido no ano, mm/dia; |
| ETo' | ETo corrigida para irrigação localizada, mm; |
| ETPc | evapotranspiração potencial da cultura, mm/dia ou mm/mês; |
| ETPc_(máx) | evapotranspiração potencial máxima da cultura, mm/dia; |
| ETPc₇₅ | evapotranspiração potencial da cultura que possui 75% de probabilidade de ocorrência, mm; |
| ETPCM | evapotranspiração potencial média mensal da cultura, mm; |
| ETRc | evapotranspiração real da cultura, mm/dia; |
| ETRD | evapotranspiração real da cultura no dia D, mm; |
| EUA | eficiência do uso da água, kg/ha/mm; |
| f | fator de disponibilidade de água no solo, decimal; |
| FA | fator de amortização ou fator de recuperação de capital, decimal; |
| FAM | fração de área molhada, decimal; |
| FAS | fração de área sombreada, decimal; |
| FC | fator de capitalização, decimal; |
| FD | fator de ajuste da precipitação efetiva mensal estimada; |
| FRCFA | fator de redução do custo fixo anual, decimal; |
| FS_{EAN} | fração de sombreamento máximo no estádio anterior, decimal; |
| FS_{EAT} | fração de sombreamento máximo no estádio atual, decimal; |
| G | densidade de fluxo de calor no solo, MJ/m ² .dia; |
| HMT | altura manométrica total, mca; |
| i | taxa de juros, decimal; |
| l | quantidade de dias acumulados do plantio até a data de interesse; |
| IAC | índice anual de calor; |
| IP | índice de pulverização do jato de água; |

| | |
|----------------------|--|
| IR | lâmina de irrigação aplicada no final do período relativo ao turno de rega, mm; |
| Ix | quantidade de dias após o plantio que ocorre a profundidade máxima das raízes; |
| K | coeficiente de umidade do solo; |
| Ka | coeficiente de advecção, decimal; |
| Kc | coeficiente de cultura, decimal; |
| KCi | coeficiente da cultura no dia i, decimal; |
| KCm | valor máximo do coeficiente da cultura, decimal; |
| KL | coeficiente de localização, decimal; |
| Kt | coeficiente do tanque Classe A; |
| L μ | média dos logaritmos dos dados; |
| L σ | desvio padrão dos logaritmos dos dados; |
| LAA _(D-1) | lâmina de água no solo no final do dia anterior ao considerado (D), mm; |
| LAA _D | lâmina de água no solo no final do dia D, mm; |
| LB | lâmina bruta, ou irrigação total necessária, mm; |
| LCE | lucro esperado com a aplicação de uma determinada lâmina de irrigação, R\$; |
| LI | limite inferior da integral, mm; |
| LIA | lâmina de irrigação aplicada durante o ciclo da cultura, mm; |
| LIR | retorno econômico obtido com a irrigação; |
| LL | lâmina líquida, ou irrigação real necessária, mm; |
| MK | maior valor entre as perdas de água e a lixiviação, usado para cálculo da lâmina bruta em irrigação localizada, decimal; |
| MOS | valor de manutenção e operação do sistema por ciclo produtivo da cultura; |
| n | duração média de insolação real medida, h/dia; |

| | |
|-----------------------|--|
| N | duração máxima possível da insolação, h/dia; |
| n0 | quantidade de zeros no conjunto de dados; |
| NDT | quantidade total de dados do conjunto; |
| ne | número de emissores por planta; |
| NI | nível de irrigação equivalente a porcentagem de evaporação observada no tanque Classe A; |
| NII | número de intervalos de integração; |
| NT | quantidade unitária total de nitrogênio aplicada, em kg/ha; |
| P | valor genérico de precipitação; |
| P0 | probabilidade do fenômeno ser igual a zero, decimal; |
| PA, PB | parâmetros do fator de ajuste local da equação da Radiação (FAO-24); |
| Pb | probabilidade de ocorrência de algum fenômeno natural, decimal; |
| PC | potência consumida pelo motor, CV; |
| PD_D | perdas diversas de água no solo referentes ao dia D; |
| Pe | precipitação efetiva, mm; |
| PE_D | precipitação efetiva do dia D, mm; |
| PLS | porcentagem mensal de horas anuais de luz solar; |
| PME | precipitação média mensal efetiva, mm; |
| PMM | precipitação média mensal, mm; |
| PMP | umidade correspondente ao ponto de murcha permanente, % peso; |
| Pot | potência nominal do motor, CV; |
| Pr | pressão de operação do aspersor, kPa; |
| Prb' | probabilidade mista de ocorrência do fenômeno, decimal; |
| PRD(W) | produção obtida com a lâmina total (precipitação e irrigação), kg/ha; |

| | |
|-----------------|---|
| PR _i | profundidade radicular efetiva no dia i , cm; |
| PR _m | profundidade radicular efetiva máxima, cm; |
| PR _o | profundidade radicular inicial, cm; |
| P _w | custo diretamente dependente da quantidade de água aplicada; |
| P _x | custo do produto por unidade de produção; |
| P _y | valor do produto (receita) por unidade de produção; |
| Q | vazão do sistema, m ³ /h; |
| q _m | vazão média de todos os emissores, L/h; |
| q _{ns} | vazão do emissor submetido à menor pressão do sistema, L/h; |
| R | saldo de radiação, cal/cm ² .dia; |
| R _a | radiação extraterrestre, mm/dia; |
| RETO | reposição da ETo para a obtenção da lâmina econômica ótima, decimal; |
| R _g | radiação global, cal/cm ² /dia; |
| RG | valor de resgate no final da vida útil; |
| RL | razão de lixiviação, decimal; |
| R _s | radiação média de ondas curtas, cal/cm ² .dia; |
| RT | receita bruta total, R\$; |
| RTCA | reposição do tanque Classe A que conduz à lâmina econômica ótima, decimal; |
| RTL | receita total líquida, R\$; |
| SR | saldo de radiação, MJ/m ² .dia; |
| t | tempo acumulado a partir de primeiro de julho, dia; |
| T | tempo máximo de funcionamento diário, h/dia; |
| t' | tempo acumulado a partir de primeiro de julho, quando ocorre ETo máxima, dia; |
| TA | tarifa fixa de água pública, R\$; |
| TAUS | tempo anual médio de utilização do sistema de irrigação, dias; |

| | |
|----------------------|--|
| TD | temperatura média diária, °C; |
| TE | tarifa de energia, R\$/kWh; |
| TM | temperatura média mensal, °C; |
| TR | turmo de rega, dias; |
| TT | tempo total disponível em um mês, horas; |
| TU | tempo de uso diário, horas; |
| U₂ | velocidade do vento a dois metros de altura, m/s; |
| V | custo variável decorrente da aplicação do fator variável x de acordo com o nível de produtividade; |
| Va | volume total de água aplicada; |
| VDU | vida útil, anos; |
| VI | valor da precipitação de interesse, mm; |
| W | lâmina aplicada, mm; |
| W_f | fator que depende da altitude e da temperatura, adimensional; |
| X | quantidade de produto (variável) aplicado; |
| x | valor de precipitação que tem probabilidade acumulada de não excedência preestabelecida; |
| Y | produtividade, em kg/ha; |
| YT | produção total esperada. |

RESUMO

CASTRO, M.C. Sistema Computacional para Determinação da Lâmina Econômica Ótima em Irrigação Pressurizada. Lavras: UFLA, 2001. 138p. (Dissertação – Mestrado em Engenharia Agrícola)*

Em nossa sociedade, interessa ao produtor rural a rentabilidade de sua atividade de tal maneira que possa obter o máximo benefício com os insumos empregados. Neste processo, a irrigação tem capital importância uma vez que permite, genericamente, elevar significativamente a produtividade e, com isso, os ganhos. Entretanto, este instrumento de produção muitas vezes não é bem empregado por falta de conhecimentos técnico-econômicos sobre sua utilização. Assim, com o objetivo de otimizar economicamente o uso de sistemas de irrigação pressurizados, elaborou-se um programa amigável, de fácil utilização por técnicos com conhecimentos básicos em agricultura irrigada, que determina a lâmina econômica ótima de irrigação. Como limitações a este cálculo, o programa admite apenas uma cultura por equipamento de irrigação, turno de rega fixo e que a água não é fator limitante. Para a determinação da lâmina de irrigação de máximo retorno econômico, procedem-se simulações do balanço hídrico com lâminas de irrigação predefinidas e dados climáticos esperados ao nível de 80% de probabilidade. Simultaneamente a estas operações, o programa efetua a análise econômica das mesmas, obtendo, ao final dos cálculos, um valor de lâmina de irrigação que resulte em máximo lucro.

* Comitê Orientador: Manoel Alves de Faria - UFLA (orientador) e Antônio Marciano da Silva - UFLA

ABSTRACT

CASTRO, M.C. Software for the Optimum Irrigation Depth Applied by Pressurized Irrigation Systems. Lavras: UFLA, 2001. 138p. (Dissertation – Master Program in Agricultural Engineering).*

In our society, it is of concern to rural producers the profit of their activity in such a way that the maximum benefit is obtained from their assets. In this process, irrigation has capital importance. In general, irrigation provides significant increase in crop yield and profit. However, due to the lack of technical and economical knowledge about irrigation application, this production factor is often not adequately applied. Thus, aiming to achieve optimum economical use of pressurized irrigation systems, a friendly use software for technicians with basic knowledge in irrigated agriculture was elaborated. This software determines the irrigation depth that maximizes profit. As limitations to this calculation, the software just admits one crop for each irrigation system and irrigation interval. The optimum economical irrigation depth is computed based on a water balance with predetermined irrigation depths and climatologic data with 80% expected probability. Simultaneously to these operations, the software makes the analysis of them, obtaining, at the end of the calculations, a value of irrigation depth that results in maximum profit.

* Guidance Committee: Manoel Alves de Faria - UFLA (Major Professor) and Antônio Marciano da Silva - UFLA

1 INTRODUÇÃO

A água é essencial à atividade agrícola. Mesmo em regiões de clima tropical, podem ocorrer períodos em que a sua presença natural, principalmente sob a forma de precipitação, coloque em risco a produção das culturas devido a sua baixa intensidade ou má distribuição durante o ciclo da cultura. Nestas situações, devem ser feitas irrigações suplementares com a finalidade de evitar déficits hídricos que inviabilizem economicamente a produção.

Sob a ótica do sistema capitalista, a rentabilidade da produção é um de seus principais objetivos. Interessa ao produtor rural, então, um planejamento agrícola que leve ao máximo retorno econômico de sua atividade. Normalmente, na agricultura, ao contrário do setor industrial, os preços dos produtos são preestabelecidos, não sendo influenciados ou controlados por aqueles que os produzem isoladamente. Recentemente, o valor do produto agrícola, em geral, tem registrado sucessivas quedas, enquanto os custos de produção elevam-se continuamente. Neste cenário, resta ao produtor direcionar seu esforço para a redução de seus custos e aumento da produtividade.

A irrigação constitui uma alternativa para a melhoria do rendimento de grande parte das culturas, proporcionando um incremento médio de produtividade da ordem de 200%, segundo Gonzaga Neto(2000), e com isso propicia uma redução dos custos unitários de produção. Entretanto, somente com um planejamento racional da agricultura irrigada, pautado no projeto bem elaborado e adequadamente manejado, é que o irrigante poderá usufruir plenamente dos benefícios advindos da irrigação e se tornam mais competitivo em um mundo cada vez mais globalizado.

O manejo racional da irrigação é um instrumento poderoso que deve ser empregado a fim de elevar os ganhos por parte dos produtores agrícolas. Além

disso, a otimização da lâmina bombeada, decorrente do manejo técnico, implica em um uso racional dos recursos energéticos, como a energia elétrica e o diesel. Isto é uma resposta coerente aos programas que estimulam a racionalização de energia, visto o fantasma emergente do colapso do sistema elétrico brasileiro.

Alguns trabalhos têm sido desenvolvidos no sentido de planejar a propriedade rural a fim de obter maximização da receita líquida. Porém, os modelos ora apresentados possuem formulação que exige um conhecimento apurado de técnicas agronômicas, matemáticas ou econômicas, os quais não se encontram acessíveis para o técnico em geral.

Assim, tendo em vista os problemas apresentados, este trabalho destinou-se à elaboração de um programa, para utilização por técnicos com noções básicas em agricultura irrigada, que facilite a determinação do valor da lâmina de irrigação de melhor retorno econômico. Considerou-se para isso, a situação de uma área irrigada fixa, na qual a água não é fator limitante, o emprego de uma única cultura por sistema de irrigação, bem como dados locais de clima, solo, cultura irrigada e valores econômicos relacionados à produção e ao sistema de irrigação.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Considerações Gerais

Segundo Arruda(1987), a água é utilizada na produção vegetal em soluções de fertilizantes e defensivos, no controle da salinidade, no combate à geadas, no controle de plantas invasoras e nematóides por inundação e, principalmente, pela irrigação.

Os fatores que limitam, com maior frequência, os rendimentos da produção agrícola, segundo Frizzone(1987), são a água e os fertilizantes. Entretanto, nas lavouras de cereais irrigados do Estado de São Paulo, Arruda(1987) comenta que os problemas mais comuns que restringem a produção devem-se não só à deficiência de adubação para altas produtividades, mas também à acidez do solo, à pequena população de plantas e à grande quantidades de falhas de plantio e germinação.

Mesmo quando é possível alcançar a máxima produtividade, Howell e Hiler(1975) afirmam que esta raramente é de interesse, sob o ponto de vista econômico, uma vez que os recursos, como fertilizantes, controle de doenças e pragas e trabalho, não são utilizados eficientemente.

Em termos de agricultura irrigada, Oliveira et al.(1993) afirmam que o uso da irrigação, visando a máxima produtividade das culturas em geral, pode se tornar economicamente inviável uma vez que o ótimo econômico não corresponde à máxima produção física. Esta é uma situação observada, segundo English(1981), quando a água é escassa ou a irrigação é onerosa.

Heinemann et al.(1998) mencionam que a aplicação de uma lâmina menor que a requerida para máxima produção pode ser economicamente viável

dependendo da resposta das culturas a água, da variabilidade climática e das flutuações das condições econômicas.

Todavia, nas situações em que os custos de irrigação são baixos e não se possui limitação de quantidade de água, English(1981) menciona que a política de otimização, que consiste na maximização do benefício obtido por unidade de água usada, é aplicar o bastante para se obter a máxima produção.

Uma alternativa para aumentar a renda líquida da propriedade, segundo English(1990), é admitir um déficit de irrigação na lavoura a fim de se aumentar a área irrigada.

Genericamente, os sistemas de irrigação são dimensionados para atender à média do consumo máximo das plantas. Ocasionalmente, para reduzir o custo ou em caso de limitação dos recursos hídricos, os sistemas são dimensionados para otimizar a produção por unidade de água aplicada. Em tais casos, os sistemas seriam dimensionados para aplicar cerca de 80% da água necessária e ainda seriam obtidos 95% da produção ótima (Keller e Bliesner,1990).

Sousa, Frizzone e Peres(1996) mencionam que a irrigação, muito mais que uma simples técnica de adicionamento de água ao solo, deve ser encarada como um método que proporciona uma determinada umidade ao solo a fim de atender às culturas de maneira mais econômica possível. Para isso, o conhecimento da função água-produção é importante para o empresário agrícola, de acordo com Tubelis(1988), uma vez que permite estimar com antecedência a produtividade das culturas e avaliar os incrementos de produção que podem ser obtidos com a irrigação suplementar.

Pereira Neto(1998) lembra que o uso eficiente da água nada mais é do que a sua otimização para que, juntamente com os demais fatores de produção, resulte o melhor nível de produtividade e renda por unidade de área.

A adoção de um modelo que atenda ao objetivo da eficiência econômica, segundo Pereira Neto(1998), possivelmente dispensaria ou reduziria os subsídios

que são utilizados atualmente para bancar os recursos que seriam cobrados via tarifa d'água, o qual, por seu turno, levaria à viabilização dos projetos públicos de irrigação.

Na situação brasileira, Arruda(1987) relata que um número cada vez maior de irrigantes estão descontentes com os desperdícios de água e energia que aumentam os custos, resultado de irrigações feitas sem controle técnico. Bruxel(1991) menciona que a experiência dos produtores tem mostrado que nem sempre há rentabilidade na agricultura irrigada, o que evidencia uma ausência de planejamento da mesma devido a uma carência ou falta de uso de instrumentos para tal.

Arce(1990) menciona que modelos de programação linear podem ser usados no planejamento de lâminas e intervalos ótimos de irrigação e que o uso eficiente da água e o incremento de produção podem ser obtidos através de mudanças nas datas de plantio.

Dorfman(1988) afirma que o máximo retorno econômico da produção agrícola é alcançado com uma combinação de vários fatores, sendo que a omissão de algum deles pode ser tão danosa que limitará a produção em níveis não desejados. Assim, o fator água pode não produzir os resultados esperados se houver deficiência na adubação ou se forem empregadas sementes de má qualidade, por exemplo.

Para determinar a operação ótima de um sistema de irrigação, é necessário o conhecimento das variáveis climáticas no local do projeto. Segundo Windsor e Chow(1971), um método de determinar os registros hidrológicos para uso em projetos é definir a natureza randômica da precipitação e evapotranspiração através de alguma distribuição de probabilidade específica e então usar a teoria da programação dinâmica estocástica na solução deste procedimento.

A probabilidade de ocorrência do resultado de uma operação matemática com valores prováveis não tem a mesma probabilidade de ocorrência de seus componentes individualmente. Desta forma, Heermann, Shull e McCkelson(1974) alertam para o fato de que a subtração de valores prováveis de precipitação dos valores prováveis de evapotranspiração, ambos referentes a um mesmo período e esperados com o mesmo nível de probabilidade, não tem base teórica e menciona que o correto seria gerar uma função de distribuição com a diferença destes dados ao invés de efetuar a diferença das funções. Sousa(1993), entretanto, considerando a diferença entre as funções de distribuição de evapotranspiração e precipitação para o planejamento da irrigação, obteve resultados satisfatórios em seu modelo avaliado em Viçosa-MG para a cultura do milho.

No manejo da irrigação, Marouelli(1983) menciona que não se deve levar em consideração apenas a decisão diária de irrigar ou não, com base no teor de água no solo, e sim analisar as características da distribuição da precipitação de modo que haja melhor aproveitamento das precipitações futuras, melhorando, assim, os resultados econômicos.

O processo de otimização de lâminas de irrigação consiste basicamente em efetuar o balanço de água no solo com lâminas de irrigação conhecidas e então analisar a receita e custos daí oriundos.

2.2 Balanço de Água no Solo

2.2.1 Introdução

Sousa(1993) afirma que, embora existam diversos métodos utilizados no monitoramento da água no solo, como o controle de umidade, sensibilidade da planta, lisímetros e outros instrumentos de medição da evapotranspiração, o de

balanço de água destaca-se dos demais em virtude da facilidade de simulação em rotinas computacionais.

O balanço de água no solo consiste da sua contabilização, em termos de entrada e saída, podendo oferecer, em um determinado instante, a quantidade de água disponível no perfil.

A entrada de água no solo se deve à precipitação, irrigação e ascensão capilar, enquanto a saída ocorre basicamente devido à evapotranspiração e percolação.

Andrade et al.(1998) lembram que a percolação profunda sempre estará presente, mesmo que a taxa cada vez menores com o tempo após uma irrigação ou precipitação.

2.2.2 Armazenamento de Água no Solo

O solo pode ser considerado como um reservatório de água para as plantas, possuindo um limite superior, definido pela capacidade de campo, e um limite inferior, dado pelo ponto de murcha permanente, sendo expresso em termos unitários pela equação:

$$DUA = \frac{CC - PMP}{10} \cdot \rho \quad (1)$$

em que: DUA = disponibilidade unitária de água no solo, mm/cm de solo;

CC = umidade correspondente à capacidade de campo, % peso;

PMP = umidade correspondente ao ponto de murcha permanente, % peso;

ρ = massa específica global do solo, g/cm³.

A cultura tem capacidade de explorar a umidade do solo até a profundidade efetiva do seu sistema radicular, o que leva à alteração da equação anterior para aquela apresentada por:

$$DTA = DUA.PRi \quad (2)$$

em que: DTA = disponibilidade total de água no volume de controle do solo, mm;

PRi = profundidade efetiva do sistema radicular, cm.

Por profundidade efetiva do sistema radicular, Bernardo(1989) denomina aquela que contém pelo menos 80% do sistema radicular da cultura.

O perfil padrão de extração de água, segundo Ayres e Westcot(1991), é de 40% para o primeiro quarto superior da zona radicular, 30% para o segundo, 20% para o terceiro e 10% para o quarto inferior. Para a cultura do milho em Viçosa-MG, Lopes da Silva(1993) considerou 5 camadas do solo, sendo a primeira com espessura de 22,5cm e as outras com 15cm, e observou, respectivamente, os seguintes pesos de extração de água: 45%, 25%, 15%, 10% e 5%. Entretanto, Renedo(1996) observou experimentalmente que a distribuição relativa do sistema radicular do tomateiro para 5 camadas de mesma espessura, de 0 a 50cm de profundidade, foi de 59%, 22%, 9%, 7% e 3%, enquanto o perfil médio de extração nas camadas de 0-15cm, 15-25cm, 25-35cm e 35-45cm foi, respectivamente, 47%, 23%, 17% e 13%.

A disponibilidade total de água no solo depende, dentre outros fatores, da característica de desenvolvimento das raízes durante a época de crescimento, o qual constitui um parâmetro importante para o manejo adequado da irrigação. Kincaid et al.(1979) e Sedyama et al.(1979) consideraram, em seus respectivos modelos de balanço de água no solo, um crescimento linear das raízes com o

tempo, do plantio à cobertura efetiva. Villalobos e Fereres(1989) sugerem a equação 3 para o cálculo da profundidade efetiva das raízes em um dia qualquer.

$$Pr_i = PR_o + \frac{KCi.(PR_m - PR_o)}{KC_m} \quad (3)$$

em que: PR_i = profundidade radicular efetiva no dia "i", cm;

PR_o = profundidade radicular inicial, cm;

PR_m = profundidade radicular efetiva máxima, cm;

KCi = coeficiente da cultura no dia "i";

KC_m = valor máximo do coeficiente da cultura.

Já Borg e Grimes(1986), após o estudo de diversos modelos e experimentos, propuseram a equação:

$$PR_i = PR_m \left[0,5 + 0,5 \cdot \text{sen} \left(\frac{3,03 \cdot I}{I_x - 1,47} \right) \right] \quad (4)$$

em que: I = quantidade de dias acumulados após o plantio até a data de interesse;

I_x = quantidade de dias após o plantio que ocorre a profundidade efetiva máxima (PR_m).

2.2.3 Precipitação

Da precipitação atmosférica incidente em uma área, apenas uma parte é utilizável pela cultura, a chamada precipitação efetiva. Por precipitação provável

entende-se aquela estimada através de conceitos estatísticos, como a distribuição Gama Incompleta, cadeia de Markov, método log-normal ou Kimbal, baseada em uma série histórica de dados, para um nível de probabilidade especificado.

Marouelli(1983), estudando diversos modelos de análise da precipitação aplicados ao manejo da irrigação suplementar em Viçosa-MG, concluiu que o modelo baseado nas probabilidades de ocorrência de períodos secos, com o limite de precipitação diária mínima de 0,1mm, foi o que possibilitou maior economia de água.

Para caracterizar com precisão o processo de infiltração, Lopes da Silva(1993) menciona que as intensidades de precipitação horárias devem ser usadas no lugar das diárias para se obterem resultados confiáveis.

Bernardo e Hill(1978) e Marouelli(1983), em seus modelos de balanço de água no solo, consideraram a precipitação provável como efetiva até o valor máximo dado pela diferença entre a disponibilidade total de água e a umidade atual no solo.

Jensen, Burman e Allen(1990) apresentam a seguinte equação para estimativa da precipitação mensal efetiva:

$$PME = FD.[1,25.PMM^{0,824} - 2,93].[10^{0,000955.ETPCM}] \quad (5)$$

em que: PME = precipitação média mensal efetiva, mm;

PMM = precipitação média mensal, mm;

ETPCM = evapotranspiração potencial média mensal da cultura, mm;

FD = fator de ajuste em função da disponibilidade total de água no solo (DTA), dado por

$$FD = 0,53 + 0,0116.DTA - 0,0000894.DTA^2 + 2,32.10^{-7}.DTA^3 \quad (6)$$

Bernardo(1989) comenta que embora o método de cálculo da precipitação efetiva pela equação 5 seja bastante usado, ela não considera a umidade antecedente às precipitações, a capacidade de infiltração do solo, a influência da intensidade das precipitações e a interceptação foliar.

A interceptação foliar, de acordo com Lopes da Silva(1993), considera a quantidade de água evaporada na copa da cultura durante a precipitação e a quantidade retida no dossel vegetativo, podendo atingir até 50% do total precipitado em regiões temperadas. Este mesmo autor menciona ainda que os valores de interceptação foliar variam significativamente com a mudança do tipo de emissor em pivô central, sendo menor para difusores de baixa pressão e maior para aspersor rotativo de baixa pressão.

2.2.4 Evapotranspiração

2.2.4.1 Considerações

Evapotranspiração pode ser entendida como o processo de transferência de água para a atmosfera pela evaporação da superfície do solo e das plantas e transpiração das plantas.

Doorenbos e Pruitt(1977) definem a evapotranspiração da cultura de referência (ET_o) como a taxa de evapotranspiração que ocorre em uma superfície extensa de grama com a altura entre 8 e 15 cm, em pleno crescimento, cobrindo plenamente o solo e sem restrição de água. Pereira, Villa Nova e Sedyama(1997) comentam que a evapotranspiração assim definida coincide com a potencial.

De acordo com Mota(1989), a evapotranspiração depende do poder evaporante do ar, que é determinado pelo vento, umidade relativa e temperatura. Para Fereres(1988), os fatores que afetam a evapotranspiração de um cultivo são

dados pela disponibilidade de água no solo, fatores climáticos, métodos de irrigação e fatores do próprio cultivo, como estágio de desenvolvimento, cobertura do solo, altura e rugosidade da copa.

Bergamaschi(1992) afirma que quanto mais complexo for o método de estimativa da evapotranspiração, maior será a possibilidade dele ser mais preciso e menor o intervalo de tempo possível para a estimativa. A escolha do método utilizado, segundo este autor, depende de 3 aspectos básicos: da precisão necessária, da adequação do método às condições locais e da disponibilidade de dados meteorológicos.

Segundo Ometto(1981), os métodos de estimativa da evapotranspiração da cultura de referência mais usados até então eram Penman, o tanque Classe A e Thornthwaite.

Para Varejão Silva e Reis(1988), a equação de Penman é bastante complexa, sendo freqüentemente apontada como a melhor para estimar a evapotranspiração de referência. Esta equação, de acordo com Mota(1989), é baseada em princípios físicos e não empíricos, como a de Thornthwaite.

Vianello e Alves(1991) afirmam que nenhum método utilizado para estimar a ETo é suficientemente preciso para substituir os métodos observacionais realizados por meio de lisímetros e evapotranspirômetros. De acordo com Fereres(1988), para obter uma alta precisão na estimativa da evapotranspiração, deve-se fazer uma calibragem local, mesmo para os métodos considerados mais precisos, como Penman.

Em 1990, de acordo com Pereira, Villa Nova e Sedyama(1997), a FAO reuniu um grupo de especialistas em evapotranspiração, os quais concluíram que se deveria adotar o método de Penman-Monteith para a estimativa da evapotranspiração diária, por ser o mais adequado até então.

2.2.4.2 Métodos de Estimativa da Evapotranspiração

Para o cálculo da evapotranspiração de referência, Bernardo(1989) apresenta as seguintes equações:

- Blaney-Criddle:

$$ET_o = c.[PLS.(0,457.TM+ 8,13)] \quad (7)$$

- Penman:

$$ET_o = c. \left[\frac{0,017.R.\frac{\Delta}{\gamma} + EA_r}{\frac{\Delta}{\gamma} + 1} \right] \quad (8)$$

- Tanque Classe A:

$$ET_o = kt.Et \quad (9)$$

- Hargreaves:

$$ET_o = c.[0,0075.(1,8.TD + 32).R_g].\frac{10}{(595 - 0,51.TD)} \quad (10)$$

em que: ET_o = evapotranspiração de referência, mm;

c = coeficiente de adequação da equação às condições locais;

PLS = porcentagem mensal de horas anuais de luz solar;

TM = temperatura média mensal, °C;

R = saldo de radiação, cal/cm².dia;

Δ = tangente da curva de saturação de vapor, em função da temperatura

do ar, mm Hg/°C;

γ = constante psicrométrica, mm Hg/°C;

EAr = poder evaporante do ar à sombra, mm/dia;

Kt = coeficiente do tanque Classe A, adimensional;

Et = evaporação do tanque Classe A, mm;

TD = temperatura média diária, °C;

Rg = radiação global, cal/cm².dia.

Doorenbos e Kassan(1994) apresentam a equação 11 para a estimativa da evapotranspiração de referência, baseada no balanço de energia e indicada quando se conhece a temperatura do ar e a radiação. Pereira, Villa Nova e Sedyama(1997) mencionam que este procedimento é também conhecido como Método FAO-24 da Radiação.

$$ET_o = c.(W_f.R_s) \quad (11)$$

em que: W_f = fator que depende da altitude e da temperatura, adimensional;

R_s = radiação média de ondas curtas, cal/cm².dia.

Pereira e Allen(1999) apresentam a equação 12 para o cálculo da ET_o pelo método de Penman-Monteith, para períodos de 24 horas.

$$ET_o = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (SR - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot U_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot U_2)} \quad (12)$$

em que: SR = saldo de radiação, MJ/m².dia;

G = densidade de fluxo de calor no solo, MJ/m².dia;

U_2 = velocidade do vento medida a 2 metros de altura, m/s;

$(e_s - e_a)$ = déficit de pressão de vapor para medições a 2 metros de altura, kPa.

A ET_o pode ser também estimada pela equação de Thornthwaite, segundo Varejão Silva e Reis(1988), como:

$$ET_o = 0,533 \cdot \left(10 \cdot \frac{TM}{IAC} \right)^A \quad (13)$$

em que: IAC = índice anual de calor dado pelo somatório dos doze índices mensais baseados na temperatura média mensal, conforme a equação 14;

A = variável auxiliar definida pela equação 15.

$$IAC = \sum_{m=1}^{12} \left[\left(\frac{TM}{5} \right)^{1,514} \right] \quad (14)$$

$$A = 6751 \cdot 10^{-10} \cdot IAC^3 - 771 \cdot 10^{-7} \cdot IAC^2 + 1792 \cdot 10^{-5} \cdot IAC + 0,49239 \quad (15)$$

Para irrigação localizada, segundo Cabello(1990), é necessário proceder à correção da evapotranspiração, anteriormente calculada, pela equação:

$$ET_o' = ET_o \cdot KL \cdot Ka \quad (16)$$

em que: ET_o' = ET_o corrigida para irrigação localizada, mm;

KL = coeficiente de localização, decimal;

Ka = coeficiente de advecção, decimal.

Para a determinação do coeficiente de localização, Cabello(1990) apresenta as equações 17, 18, 19 e 20 propostas por diversos autores.

$$KL = 1,34. FAS \quad (17)$$

$$KL = 0,1 + FAS \quad (18)$$

$$KL = FAS + 0,50.(1-FAS) \quad (19)$$

$$KL = FAS + 0,15.(1-FAS) \quad (20)$$

em que: FAS = fração de área sombreada, decimal.

Para a determinação do coeficiente de advecção, leva-se em consideração o porte da cultura e o tamanho da área irrigada. Cabello(1990) apresenta a Figura 1, através da qual se pode estimar tal coeficiente.

Em se tratando de irrigação, o que interessa é a conversão da ETo em evapotranspiração potencial da cultura (ETPc), a qual pode ser obtida por meio do coeficiente de cultura (Kc), de acordo com Bernardo(1989), da seguinte forma:

$$ETPc = ETo.Kc \quad (21)$$

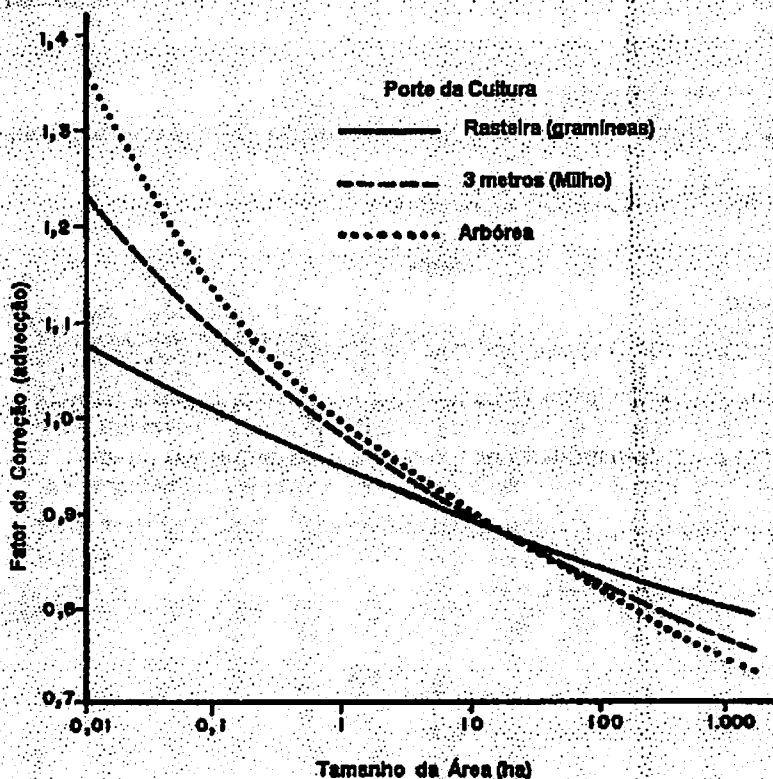


FIGURA 1 – Representação do Coeficiente de Advecção em Função do Tamanho da Área Irrigada e do Porte da Cultura (Fonte: Cabello, 1990)

O coeficiente de cultura é determinado experimentalmente. Ele varia com o tipo de cultura, estágio de desenvolvimento, velocidade do vento e umidade relativa do ar. Geralmente, o valor do K_c cresce até a cultura atingir seu pleno desenvolvimento e depois decresce à medida que ela amadurece. (Doorenbos e Kassan, 1994)

A melhor forma de estimar a duração de cada fase fenológica para a cultura do milho, segundo Lopes da Silva (1993), é através da correlação com a

temperatura média do ar. Entretanto, Idike, Larson e Slack(1982) estimaram o valor do K_c , também para a cultura do milho, correlacionando-o unicamente com o número de dias após a emergência das plantas.

De acordo com Mota(1989), a evapotranspiração real de um solo vegetado não depende somente de fatores meteorológicos, como no caso da potencial, mas também dos fatores relacionados com a cultura e as propriedades físicas do solo.

Bernardo(1989) apresenta um coeficiente de umidade do solo (K), expresso pela equação 22, para fins de conversão da evapotranspiração potencial da cultura em evapotranspiração real, o qual é feito pela equação 23.

$$K = \frac{\ln(LAA_{(D-1)} + 1)}{\ln(DTA + 1)} \quad (22)$$

em que: $LAA_{(D-1)}$ = lâmina de água disponível no solo no dia anterior ao considerado, mm.

$$ETR_c = K \cdot ETP_c \quad (23)$$

em que: ETR_c = evapotranspiração real da cultura, mm/dia;

ETP_c = evapotranspiração potencial da cultura, mm/dia.

2.2.5 Análise Estatística dos Dados Climáticos

2.2.5.1. Nível de Probabilidade

Doorenbos e Pruitt(1977) afirmam que os valores de evapotranspiração e precipitação, para projeto, são baseados em uma probabilidade de ocorrência de 75% ou 80%. Entretanto, estes autores mencionam que em períodos críticos

da cultura ao estresse hídrico, como a germinação, um nível maior de probabilidade de precipitação, como 90%, seria mais adequado. Uma probabilidade de precipitação de 75 ou 80% significa que se pode esperar uma lâmina mínima de chuva, respectivamente, em três a cada quatro anos ou quatro a cada cinco anos.

2.2.5.2 Precipitação

Existem inúmeras funções que podem ser usadas para descrever os dados de precipitação com a finalidade de estimar o valor provável. Dentre estas, a de uso mais comum, segundo Costa(1991), é a distribuição Gama Incompleta. Marouelli(1983) menciona que o melhor ajuste para a probabilidade de precipitação é obtido quando se usa a distribuição Gama.

A distribuição Gama é uma função flexível que pode se ajustar a diferentes tipos de curvas com diversos graus de assimetria. Entretanto, nem sempre este ajuste é recomendado, como no caso da estimativa diária dos dados de precipitação de Lavras-MG, devido à não significância observada, de acordo com Botelho(1998).

Costa(1991) apresenta a distribuição Gama Incompleta, para o cálculo da probabilidade acumulada de ocorrência de um fenômeno futuro, como:

$$P_b = \frac{1}{\beta^\alpha \cdot \Gamma(\alpha)} \cdot \int_0^x P^{\alpha-1} \cdot e^{-\frac{P}{\beta}} \cdot dP \quad (24)$$

em que: P_b = probabilidade de que a precipitação esteja entre 0 e o valor x ;

x = valor de precipitação que tem probabilidade de não excedência ' P_b ' de ocorrer;

P = valor genérico de precipitação;

α = parâmetro de forma da distribuição gama;

β = parâmetro de escala da distribuição gama;

$\Gamma(\alpha)$ = função gama, dada por

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} x^{(\alpha-1)} e^{-x} dx \quad (25)$$

De acordo com Thom(1958), o principal problema para a aplicação da distribuição Gama a dados climatológicos é a estimativa dos parâmetros β e α para o conjunto de dados amostrados. Este autor apresenta as equações 26 e 27 para estimativa destes parâmetros.

$$\hat{\alpha} = \frac{1 + \sqrt{1 + 4.A / 3}}{4.A} - \Delta\alpha \quad (26)$$

$$\hat{\beta} = \frac{\mu}{\alpha} \quad (27)$$

em que: A = valor dado pela equação 28;

$\Delta\alpha$ = correção a ser aplicada;

μ = média dos dados considerados.

$$A = \log(\mu) - \frac{1}{n} \Sigma(\log x) \quad (28)$$

Alternativamente, Haan(1977) menciona que o estimador α pode ser calculado pelas equações 29 e 30, respectivamente para $0 \leq A \leq 0,5722$ e $0,5772 < A \leq 17$, os quais fornecem um erro inferior a 0,01%.

$$\alpha = (0,5000876 + 0,1648852.A - 0,0544274.A^2).A \quad (29)$$

$$\alpha = \frac{8,898919 + 9,05995.A + 0,9775373.A^2}{A.(17,79728 + 11,968477.A + A^2)} \quad (30)$$

Para períodos pequenos, como estimativa de dados diários, Botelho(1998) comenta que o uso da distribuição exponencial pode apresentar melhores resultados que o uso da distribuição Gama Incompleta.

Para a função acumulativa exponencial, Haan(1977) apresenta a equação 31, sendo seu parâmetro auxiliar λ definido na equação 32.

$$Pb = P(x) = \int_0^x \lambda \cdot e^{(-\lambda \cdot t)} dt = 1 - e^{(-\lambda \cdot x)} \quad (31)$$

$$\lambda = \frac{1}{\mu} \quad (32)$$

De acordo com Haan(1977) e Yevjevich(1982), a distribuição de probabilidade Log-Normal pode ser também utilizada para o ajuste de dados de precipitação. Esta é apresentada pela equação 33 e possui a mesma forma e propriedades da distribuição Normal, diferenciando-se basicamente desta pela transformação dos dados observados para a forma logarítmica antes de se proceder ao cálculo de seus parâmetros.

$$Pb = P(x) = \int_0^x \frac{1}{L\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(x) - L\mu}{L\sigma} \right)^2} \quad (33)$$

em que: $L\mu$ = média dos logaritmos dos dados;

$L\sigma$ = desvio padrão dos logaritmos dos dados.

Uma vez que, tratando de precipitação, existe a possibilidade de ocorrência de fenômenos nulos (precipitações inexistentes), a transformação logarítmica de um conjunto de dados com a presença de zeros requer manuseio especial. Haan(1977) e Costa(1991) apresentam algumas alternativas para solucionar este problema, dentre as quais uma função mista dada pela equação 34.

$$Prb' = P_0 + (1 - P_0) \cdot P_b \quad (34)$$

em que: Prb' = probabilidade mista de ocorrência do fenômeno;

P_0 = probabilidade do fenômeno ser igual a zero, dado por

$$P_0 = \frac{n_0}{NDT} \quad (35)$$

em que: n_0 = quantidade de zeros no conjunto de dados;

NDT = quantidade total de dados do conjunto.

Em certas regiões, Marouelli(1983) comenta que se pode admitir que a ocorrência de dias secos e chuvosos está associada as condições anteriores, possibilitando, assim, o emprego das Cadeias de Markov. Segundo este autor, o resultado obtido com o emprego deste método depende, basicamente, mais do resultado da tentativa precedente do que de qualquer outro resultado prévio. Um exemplo do uso adequado deste método, de acordo com Sedyama et al.(1978), é no ajuste dos dados de precipitação de Tel-Aviv, em Israel. Sedyama et al.(1978) mencionam ainda que a precipitação diária pode ser calculada por meio da Cadeia de Markov associada a uma função de distribuição adequada, como a função de densidade Gama Incompleta.

Como uma forma de comprovação do ajuste de um conjunto de dados a uma função de distribuição, Massey(1951) apresenta o teste de Kolmogorov-Smirnov. Crutcher(1975) fornece formas de correção deste teste quando o mesmo é aplicado a funções cujos parâmetros são estimados, como é o caso dos dados agroclimatológicos. Este autor afirma que o uso de tabelas tradicionais para a avaliação dos dados, como aquelas fornecidas por Massey(1951), superestima os resultados, podendo, conseqüentemente, levar a análises errôneas.

Além do uso adequado das funções de densidade, deve-se ater à quantidade de dados necessários às análises a partir das séries históricas. Com dados de precipitação de uma série curta, é impossível determinar a média real de longo prazo. Qualquer evento de uma série de cinco anos provavelmente conterà um erro de 15% em relação à média real; para dez anos, o erro será de 8,2%; e para vinte anos, 3,3% do valor real e assim por diante. Dados de uma série de 30 a 40 anos provavelmente conterão um erro de 2% em relação à média real de precipitação de longo prazo e constituem uma aproximação suficiente para as finalidades práticas (Sousa, 1993).

2.2.5.3 Evapotranspiração

Pruitt, Oettingem e Morgan(1972), trabalhando com intervalos de dados de evapotranspiração de um a trinta dias, observaram um bom ajuste da distribuição normal para dados de evapotranspiração diária, enquanto McGuinness e Parmele(1972), estudando a evapotranspiração com este mesmo intervalo, a partir da evaporação de lagos, concluíram que estes valores foram log-normalmente distribuídos, conforme comprovou o teste de Kolmogorov-Smirnov. Jensen e Wright(1978) afirmam que o desvio padrão das taxas de evapotranspiração média diária esperada é normalmente distribuído.

De acordo com Costa(1991), pode-se determinar o valor da evapotranspiração potencial da cultura (ETPc), com 75% de probabilidade de não excedência de ocorrer, tomando-se a média (μ) e o desvio padrão (σ) de uma série de dados de ETPc de um mesmo período do ano e associando-os por meio da equação 36.

$$ETPc_{75} = \mu + 0,675 \sigma \quad (36)$$

em que 0,675 = constante extraída das tabelas de distribuição normal.

Segundo Leme e Chaudhry(1992), pode-se estimar a evapotranspiração de referência (ETo) pela equação 37, que representa sua curva de distribuição normal ao longo do ano.

$$ETo = ETo_{(máx)} \cdot e^{\left[-\left(\frac{t-t'}{\Delta t} \right)^2 \right]} \quad (37)$$

em que: ETo = evapotranspiração de referência estimada, mm/dia;

$ETo_{(máx)}$ = valor máximo de ETo ocorrido no ano, mm/dia;

t = tempo acumulado a partir de primeiro de julho, dia;

t' = tempo acumulado a partir de primeiro de julho, quando ocorre

$ETo_{(máx)}$, dia;

Δt = intervalo de tempo referente à diferença entre a quantidade de dias considerados no ano e t', dia.

A ETo pode ser representada por uma curva de regressão polinomial, de acordo com Leme e Chaudhry(1992), caso seja constatado um coeficiente de correlação elevado entre os dados reais e estimados, bem como um nível de significância adequado.

2.3 Cálculo das Lâminas de Irrigação

A lâmina líquida de irrigação pode ser determinada pelas equações 38 e 39, respectivamente para irrigação por aspersão e localizada.

$$LL = DTA.f - Pe \quad (38)$$

$$LL = DTA.f.FAM - Pe \quad (39)$$

em que: LL = lâmina líquida, ou irrigação real necessária, mm;

f = fator de disponibilidade de água no solo, decimal;

Pe = precipitação efetiva, mm;

FAM = fração de área molhada dada por:

$$FAM = \frac{AM}{EP} \quad (40)$$

em que: AM = área molhada por planta, m²;

EP = espaçamento de plantio, m².

Para a determinação da lâmina bruta em sistemas de irrigação por aspersão, Keller e Bliesner(1990) apresentam a equação abaixo:

$$LB = \frac{LL}{(1 - RL).EAG} \quad (41)$$

em que: LB = lâmina bruta, ou irrigação total necessária, mm;

RL = razão de lixiviação, decimal;

EAG = eficiência de aplicação global do sistema de irrigação, decimal.

A eficiência de aplicação global de um sistema de irrigação por aspersão é um termo usado por Keller e Bliesner(1990) para incluir o efeito das perdas devido a desuniformidades de aplicação, percolação, evaporação, deriva e vazamento da tubulação, a qual pode ser calculada por

$$EAG = CUC.EAPS.EC \quad (42)$$

em que: CUC = coeficiente de uniformidade de Christiansen, decimal;

EAPS = eficiência de aplicação potencial do sistema, decimal;

EC = eficiência de condução de água, decimal.

Keller e Bliesner(1990) fornecem uma metodologia para o cálculo da eficiência de aplicação potencial do sistema, em irrigação por aspersão, levando em consideração a velocidade do vento, a evapotranspiração da cultura de referência e o índice de pulverização do jato de água (IP), sendo este último determinado pela equação 43. Esta metodologia inclui o uso de gráficos, os quais foram convertidos em equações por Nogueira(1993). Para valores de $IP \leq 7$, jatos pouco pulverizados, e $IP \geq 17$, jatos muito pulverizados, Nogueira(1993) obteve as equações mostradas na Tabela 1. Para valores intermediários de IP ($7 < IP < 17$), Keller e Bliesner(1990) sugerem o uso da equação 44.

$$IP = 0,032 \cdot \frac{Pr^{1,3}}{B} \quad (43)$$

em que: IP = índice de pulverização do jato de água;

Pr = pressão de operação do aspersor, kPa;

B = diâmetro do bocal, mm.

TABELA 1 –Equações Utilizadas para o Cálculo da Eficiência de Aplicação Potencial de Sistemas de Irrigação por Aspersão em Função da Evapotranspiração da Cultura de Referência (ET_o) e da Velocidade do Vento (VV)

| VV (km/h) | IP ≤ 7 | IP ≥ 17 |
|--------------|---|---|
| 2 a 6 | -0,000108.ET _o ² - 0,00054.ET _o +0,991225 | -0,00054.ET _o ² - 0,00378.ET _o +0,958387 |
| 6 a 16 | -0,000022.ET _o ² - 0,00226.ET _o +0,985787 | -0,000164.ET _o ² - 0,00592.ET _o +0,948225 |
| 16 a 24 | -0,000056.ET _o ² - 0,00214.ET _o +0,973300 | -0,00218.ET _o ² - 0,00754.ET _o +0,933712 |

Fonte: Nogueira(1993).

$$EAP = \frac{IP - 7}{10} \cdot EAP7 + \frac{17 - IP}{10} \cdot EAP17 \quad (44)$$

em que: EAP = eficiência de aplicação potencial do sistema para 7 < IP < 17, decimal;

EAP7 = eficiência de aplicação em potencial para IP ≤ 7, decimal;

EAP17 = eficiência de aplicação em potencial para IP ≥ 17, decimal.

No caso de irrigação localizada, Cabello(1990) apresenta a equação 45 para o cálculo da lâmina bruta de irrigação.

$$LB = \frac{LL}{(1 - MK).CU} \quad (45)$$

em que: CU = coeficiente de uniformidade;

MK = maior valor entre os fornecidos pelas equações 46 e 47, respectivamente para o caso de perdas e lixiviação.

$$MK = (1 - EA) \quad (46)$$

$$MK = RL \quad (47)$$

em que: EA = eficiência de aplicação do sistema de irrigação localizada;

RL = razão de lixiviação.

A razão de lixiviação (RL) indica a necessidade de lixiviação de sais existentes no solo e pode ser determinada pelas equações 48 e 49, respectivamente para irrigação por aspersão e localizada, de acordo com Keller e Bliesner(1990). Em sistemas de irrigação por aspersão, segundo estes autores, quando $RL < 0,10$, as próprias perdas que ocorrem no sistema cumprem esta função.

$$RL = \frac{CEi}{2.CEe} \quad (48)$$

$$RL = \frac{CEi}{5.CEe - CEi} \quad (49)$$

em que: CEi = condutividade elétrica da água de irrigação, mmhos/cm;

CEe = condutividade elétrica do extrato saturado do perfil do solo na zona radicular para 100% de produtividade, mmhos/cm.

Para o cálculo do coeficiente de uniformidade de sistemas de irrigação localizada, Cabello(1990) fornece a equação:

$$CU = \left(1 - \frac{1,27 \cdot CVF}{\sqrt{ne}} \right) \cdot \frac{qns}{qm} \quad (50)$$

em que: CVF= coeficiente de variação de fabricação, decimal;

ne = número de emissores por planta;

qns = vazão do emissor submetido à menor pressão do sistema, L/h;

qm = vazão média de todos os emissores, L/h.

2.4 Função Água-Produção de Culturas Agrícolas

Carvalho et al.(1998) afirmam que a água é o fator mais importante que afeta a produção agrícola e que o conhecimento das relações água-produção é fundamental para a seleção do manejo de água mais adequado em áreas irrigadas.

De acordo com Cuenca(1989), para quantificar o benefício econômico da irrigação, é necessário quantificar o aumento na produção como uma função do aumento da quantidade de água aplicada pelo sistema de irrigação, sendo tal relação denominada função água-produção. Este autor menciona ainda que uma maneira alternativa de expressar a função água-produção é associar o uso consuntivo, ou a evapotranspiração, com a produção obtida.

De acordo com Yaron(1971), o conceito de função água-produção deve-se à resposta das culturas a diferentes variações no conteúdo de água do solo

dentro da faixa de umidade facilmente disponível e que a redução deste nível de umidade do solo pode reduzir sensivelmente a taxa de crescimento e produção final.

Martin, Watts e Gilley(1984), Dantas Neto(1994) e Bernardo(1998) afirmam que os modelos de função resposta água-produção mais utilizados são o linear, polinomial e potencial, tendo-se por variável dependente a produção, e independente, a lâmina aplicada.

Karmeli, Peri e Todes(1985) e Bernardo (1998) mencionam que o modelo polinomial de segundo grau é normalmente utilizado quando se trabalha com lâmina total aplicada. Para Oliveira et al.(1993), este modelo polinomial é o que melhor descreve a função de produção e tem sido amplamente usado para várias culturas.

De acordo com Carvalho et al.(1998), as funções água-produção normalmente seguem a lei de produtividade decrescente e por isso é esperado que elas tenham forma polinomial.

Dantas Neto (1994) menciona que a natureza curvilínea da função água-produção se deve ao fato de que o excesso de água não disponível para a evapotranspiração do cultivo esteja provocando lixiviação de nutrientes e doenças associadas com o solo úmido. Cuenca(1989) afirma que este excesso de umidade reduz a produção por diminuir a aeração do solo e impedir as transferências de gases na zona radicular.

A produção máxima das culturas, em geral, é obtida em uma faixa de umidade próxima da capacidade de campo. Entretanto, com uma umidade tal que deixe o solo com uma porosidade livre de água inferior a 10%, característica de solos próximos à saturação, espera-se um significativo decréscimo de produção. Outro fator que afeta a produtividade da lavoura irrigada é a uniformidade de aplicação de água, a qual produz impactos diferenciados em função do tipo de cultura e da lâmina aplicada (Arruda, 1987).

Os coeficientes da função água-produção, de acordo com Tubelis(1988), são resultados da combinação de fatores do solo, adubação, tratos culturais, variedade (cultivar) e clima, entre outros, sendo, portanto, sujeitos a modificações quando se alteram estas combinações. Dantas Neto(1994) comenta que a produtividade, em função da água, pode ser diferente para diferentes tipos de solos.

Teodoro, Frizzone e Pereira(1992) estudaram o efeito de lâminas de irrigação e doses de nitrogênio variáveis na produção de aveia branca (*Avena sativa* L.) cv UPF7, em Pirassununga/SP, e concluíram que uma mesma lâmina de água tem efeitos diferentes no rendimento da cultura em virtude da quantidade de nitrogênio aplicada.

Oliveira et al.(1993), trabalhando com milho doce, variedade Doce Cristal, irrigado por aspersão convencional, na EMBRAPA-CNPMS, em Sete Lagoas/MG, observaram que a ausência de nitrogênio, mesmo sem qualquer deficiência hídrica, reduziu em 34,5% a produtividade potencial máxima física. Estes autores ainda afirmam que a lâmina de água que trará máximo retorno econômico é diretamente influenciada pela quantidade de nitrogênio aplicada à cultura.

Para considerar a água como a única variável que influencia na produção, Cuenca(1989) e Frizzone(1998) afirmam que os demais fatores que contribuem para esta produção devem permanecer fixos, em níveis ótimos que promovam o máximo crescimento em qualquer lâmina de irrigação aplicada, sendo que a cultura é, ainda, assumida como livre de pragas e doenças.

Frizzone (1987), analisando os resultados obtidos em um experimento com a cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) conduzido na FEIS-UNESP, em Ilha Solteira/SP, obteve a produção de grãos como uma função da lâmina total aplicada e da dose de nitrogênio, conforme apresentado na equação 51.

$$Y=759,290+12,771.NT+7,960.W-0,091.NT^2-0,0085.W^2+ 0,0152.NT.W \quad (51)$$

em que: Y = produtividade, em kg/ha;

W = lâmina aplicada, mm;

NT = quantidade unitária de nitrogênio aplicada, em kg/ha.

Felipe(1991) analisou também os efeitos de diferentes lâminas de irrigação e épocas de parcelamento de nitrogênio, para a cultura do feijoeiro plantada no campus da Universidade Federal de Lavras (UFLA), e obteve a equação 52 como o melhor resultado de seu experimento. Esta foi obtida com uma aplicação de nitrogênio de 30 kg/ha na semeadura, 30 kg/ha aos 20 dias após a semeadura e outros 30 kg/ha aos 45 dias após a semeadura. O intervalo da lâmina total esteve compreendido entre 169 mm e 283 mm.


$$Y = -0,067588.W^2 + 42,3725.W - 5064,8170 \quad (52)$$

Costa, Souza e Silva(1993) apresentam uma relação água-produção para a cultura do alho plantada no campus da UFLA, para o intervalo de lâminas totais de 167 mm a 374 mm:

$$Y = 4,1449.W + 3469,8869 \quad (53)$$

Guerra(1994) obteve, para a cevada (*Hordeum vulgare* L.), cultivada em latossolo vermelho escuro na região de Planaltina-DF, a equação 54.

$$Y = -0,0192.W^2 + 31,41.W - 6384,71 \quad (54)$$



Guerra(1995) também estudou as relações água-produção para a cultura do trigo (cv Br-12 Aruanã) na mesma região de Planaltina-DF e obteve a seguinte equação:

$$Y = -0,0009565.W^2 + 4,929.W + 2161,28 \quad (55)$$

Araújo e Ferreira(1996), estudando a resposta do amendoim, cultivar PI-165317 tipo *Spanish*, a diferentes lâminas de irrigação aplicadas através de tubos janelados, em Pentecostes-CE, obtiveram a relação água-produção de grãos, para o intervalo de 243 a 543mm, como:

$$Y = 7,84.W - 1579,88 \quad (56)$$

Oliveira et al.(1996), estudando o efeito da irrigação por aspersão na produtividade da ervilha cultivada na EMBRAPA-CNPQ, em Brasília-DF, obtiveram a seguinte função água-produção para a cultivar Maria:

$$Y = -0,0228.W^2 + 17,341.W - 946,99 \quad (57)$$

Andrade Júnior et al.(1996), estudando o efeito da irrigação por gotejamento na melancia, cv. Crimson Sweet, na EMBRAPA-CPAMN, em Parnaíba-PI, com ciclo de 62 dias e evaporação média do tanque Classe A de 9,24mm/dia, obtiveram as seguintes equações:

$$Y = -22104,167.NI^2 + 32747,5.NI + 53299,667 \quad (58)$$

$$EUA = -268,338.NI + 344,82 \quad (59)$$

em que: EUA = eficiência do uso da água, kg/ha.mm;

NI = nível de irrigação equivalente à porcentagem de evaporação observada no tanque Classe A, variando entre os limites de 0,2 e 1,0.

Carvalho, Pruski e Caixeta(1998) mencionam que a função de produção do feijoeiro, tomada apenas em relação à lâmina de irrigação, pode ser dada por:

$$Y = 0,0296.W^2 - 2,5082.W + 39,934 \quad (60)$$

Aguiar Netto et al.(1998) estudaram o efeito de lâminas de irrigação na produtividade da batata cv. Aracy, em São Manuel-SP, sob latossolo vermelho escuro distrófico, e obtiveram a seguinte equação:

$$Y = 0,006.W^3 - 1,987.W^2 + 329,965.W - 9838,563 \quad (61)$$

Sousa et al.(1998) avaliaram o efeito de lâminas de irrigação por gotejamento no meloeiro cv. Eldorado 300 cultivado na EMBRAPA, em Parnaíba-PI, e obtiveram a seguinte equação:

$$Y = 26879,18.e^{(-0,5\left(\frac{W-0,96}{0,958}\right)^2)} + 37791,51 \quad (62)$$

Martins et al.(1998) obtiveram a relação água-produção, dada pela equação 63, para o maracujá amarelo, variedade *falvicarpa reg.*, em Campos dos Goytacazes-RJ.

$$Y = -0,0359.W^2 + 97,835.W - 27604 \quad (63)$$

Bernardo(1998) apresenta a relação entre os efeitos das lâminas de irrigação na cultura do milho, cv. BR-105, em Bom Jesus da Lapa-Ba, para uma adubação de 160 kg N/ha, como sendo:

$$Y = -0,0142.W^2 + 23,351.W - 559,19 \quad (64)$$

Bernardo(1998) menciona que a relação água-produção para cenoura, cv Brasília, plantada em Viçosa-MG, pode ser expressa por:

$$Y = -0,0005.W^2 + 0,4302.W - 59,338 \quad (65)$$

Bernardo(1998) apresenta ainda a função água-produção para a goiabeira, cultivada em São Francisco do Itabopoana-RJ, como sendo:

$$Y = -0,00016.W^2 + 0,4737.W - 235,65 \quad (66)$$

Dantas Neto(1994) apresenta a Tabela 2 com funções água-produção obtidas por diversos pesquisadores no Nordeste.

TABELA 2 – Funções Água-Produção Obtidas por Pesquisadores no Nordeste

| Cultura | Equação |
|-------------------------|--|
| melancia | $Y = -2301,15 + 81,0895.W - 0,0457.W^2$ |
| tomate | $Y = -23000 + 271,935279.W - 0,239484.W^2$ |
| cebola | $Y = -115910 + 378,924.W - 0,2299.W^2$ |
| banana | $Y = -36848 + 63,250411.W - 0,010975.W^2$ |
| feijão <i>Phaseolus</i> | $Y = 8,001813.10^{-2}.EXP[3,8227.10^{-2}.W + (-3,507706.10^{-2}.W^2)]$ |
| feijão <i>Vigna</i> | $Y = 436,3158.EXP[2,92035.10^{-3}.W + (1,61882.10^{-6}.W^2)]$ |
| pimentão | $Y = 9453,68.EXP[6,744224.10^{-4}.W + (-4,421719.10^{-7}.W^2)]$ |
| milho | $Y = -8481,9373 - 20,6859.W + 1151,92245.W^{0,5}$ |
| melão | $Y = 6,031133.10^{-2}.W^{(3,604451 - 0,606465106.W)}$ |

Fonte: Dantas Neto(1994).

Carvalho et al.(1998) apresentam a Tabela 3, contendo os coeficientes da função água-produção para algumas culturas em vários tipos de solo, clima e práticas agrícolas empregadas no Chile.

TABELA 3 – Coeficientes da Função Água-Produção das Culturas Incluídas no Modelo $Y_{rel} = AC + BC(PE_{rel})^a - CC(PE_{rel})^b$

| Tipo de Solo | Cultura | Coeficientes da Função de Produção | | |
|----------------|----------------|------------------------------------|------|-------|
| | | AC | BC | CC |
| arenoso | aspargo | 0,080 | 1,80 | -0,90 |
| | cana-de-açúcar | -0,200 | 2,10 | -0,92 |
| | milho | -0,450 | 2,80 | -1,40 |
| silto-arenoso | kiwi | -0,100 | 2,70 | -1,65 |
| | aspargo | -0,200 | 2,30 | -1,18 |
| | trigo | 0,080 | 2,27 | -1,45 |
| | milho | -0,100 | 2,15 | -1,05 |
| | feijão | 0,100 | 2,10 | -1,30 |
| siltoso | aspargo | -0,327 | 2,60 | -1,35 |
| | cana-de-açúcar | -1,220 | 5,36 | -3,23 |
| | trigo | -0,080 | 1,75 | -0,85 |
| | milho | -0,060 | 1,78 | -0,76 |
| | feijão | 0,090 | 1,90 | -1,01 |
| silto-argiloso | kiwi | -0,040 | 1,98 | -0,95 |
| | aspargo | 0,120 | 1,66 | -0,80 |
| | cana-de-açúcar | -0,250 | 2,63 | -1,41 |
| | trigo | 0,100 | 1,90 | -1,00 |
| | milho | -0,350 | 2,21 | -0,91 |
| argiloso | trigo | 0,120 | 1,90 | -0,98 |
| | milho | -0,002 | 2,30 | -1,40 |

OBS: Y_{rel} - produtividade relativa, dada por Y/Y_{max} (Y = produtividade da cultura, kg/ha e Y_{max} = produtividade máxima, kg/ha) e PE_{rel} = evapotranspiração relativa, dada por PE/PE_{max} (PE = evapotranspiração atual, mm e PE_{max} = evapotranspiração máxima, mm).

(Fonte: Carvalho et al., 1998)

Frizzone(1998) afirma que os efeitos do déficit hídrico sobre a produtividade dependem do tipo de cultura e do estágio fenológico em que ocorre.

Cuenca(1989) afirma que alguns dos mais sérios problemas na aplicação da função água-produção estão relacionados à frequência e época de irrigação. Este autor apresenta resultados com a cultura do milho, nos quais mostra funções água-produção obtidas pelo estresse concentrado em diferentes períodos de desenvolvimento da cultura ao longo de todo o ciclo. Com base neste trabalho, o autor afirma que se o déficit hídrico é inevitável, a maior produtividade será obtida quando ele é igualmente distribuído ao longo de todo o ciclo da cultura.

Embora já existam diversas relações água-produção na literatura, Tubelis(1988) e Frizzone(1998) afirmam que elas não refletem a condição de uma propriedade rural específica, devendo-se, portanto, proceder a sua determinação no próprio local. Scaloppi(1983), Tubelis(1988) e Bernardo(1998) apresentam metodologias para tal. Doorenbos e kassan(1994) afirmam ainda que o efeito do déficit hídrico, e conseqüentemente a função água-produção, podem ser diferentes entre as variedades de uma mesma espécie, o que foi observado por Oliveira et al.(1996) para a cultura da ervilha.

2.5 Avaliação Econômica de Sistemas Agrícolas Irrigados

Hoffmann et al.(1987) apresentam as bases elementares de economia, a saber:

$$RT = YT \cdot Py \quad (67)$$

$$V = X \cdot Px \quad (68)$$

$$RLT = RT - V - CFT \quad (69)$$

em que: RT = receita bruta total;

V = custo variável decorrente da aplicação do fator variável x de acordo com o nível de produtividade;

RLT = receita líquida total;

YT = produção total;

Py = valor do produto;

X = quantidade de produto (variável) aplicado;

Px = custo do produto;

CFT = custo dos fatores fixos, os quais não variam com a quantidade produzida.

Dorfman(1988) menciona os custos e benefícios da irrigação, classificando os primeiros como:

Custos de capital, relativos aos investimentos para a materialização do projeto, como construção de estradas de acesso, desmatamento, construção de estruturas hidráulicas, bem como custos de engenharia para a elaboração do projeto e juros a serem pagos por empréstimos durante sua construção;

Custos anuais, que ocorrerão ao longo da operação do projeto, como os custos financeiros do capital emprestado e os juros que serão pagos durante a operação, custos de operação, manutenção e reposição necessários ao funcionamento e ainda taxas, como a de cobrança de água, e seguros recolhidos ao poder público.

Em seu trabalho de otimização, Carvalho et al.(1998) consideraram o custo de produção composto dos custos da água de irrigação, do sistema de irrigação utilizado, da mão-de-obra e custos diversos, como, por exemplo,

sementes, fertilizantes, pesticidas, maquinaria, colheita e secagem. Para estes autores, o custo de irrigação para sistemas de aspersão, gotejamento e microjet são amortizados considerando uma vida útil de 20 anos, com o fator de recuperação de capital calculado por

$$FA = \frac{i \cdot (1+i)^{VDU}}{(1+i)^{VDU} - 1} \quad (70)$$

em que: FA = fator de amortização ou fator de recuperação de capital, decimal;

VDU = vida útil, anos;

i = taxa de juros anual, decimal.

Com relação ao insumo água, Carvalho, Pruski e Caixeta(1998) afirmam que a legislação estabelece sua cobrança em projetos públicos em duas parcelas: valor a ser pago por hectare irrigável, relativo aos custos fixos do investimento público nas obras de infra-estrutura de irrigação de uso comum, e valor a ser pago em função do consumo de água pelo usuário, relativo os custos variáveis do investimento governamental, como operação e manutenção das infra-estruturas.

Nos EUA, onde a água para uso agrícola é taxada, Garrick(1998) menciona que o seu preço pode variar significativamente de sistema para sistema, fazenda para fazenda, região para região. O mesmo autor afirma ainda que esse custo dependerá do sistema utilizado para transportar água e sua manutenção, do trabalho necessário para seu fornecimento e ainda de fatores sócio-políticos.

Na seleção do sistema de irrigação mais econômico para a produção de tomate industrial, Marouelli, Silva e Silva(1998) calcularam o custo fixo total anual como a soma da depreciação com o custo de oportunidade do capital sobre o valor do sistema de irrigação. Dentre os custos variáveis, estes autores

consideraram o custo adicional referente as despesas com colheita e transporte decorrentes do aumento da produção em relação ao sistema com menor produtividade.

Para cálculo da depreciação dos equipamentos de irrigação convencional, Tomazela e Scaloppi(1988) consideraram o método das anuidades, o qual leva em conta os juros do capital e define cotas anuais constantes, dado pela seguinte equação:

$$CADP = [C.(1+i)^{VDU} - RG].FC \quad (71)$$

em que: CADP = quota anual de depreciação;

C = valor do investimento;

RG = valor de resgate no final da vida útil;

FC = fator de capitalização equivalente a

$$FC = FA - i \quad (72)$$

Scaloppi e Colombo(1988) afirmam que, em países ou regiões subdesenvolvidas, o custo da mão-de-obra geralmente não representa parcela significativa do custo operacional do sistema de irrigação.

Na determinação do custo dos insumos, particularmente a adubação nitrogenada, Oliveira et al.(1993), trabalhando com pivô central, consideraram apenas o custo de aquisição, desprezando o custo de aplicação uma vez que este se daria via equipamento de irrigação, procedendo-se à chamada fertirrigação.

Segundo Programa Nacional de Irrigação-PRONI (BRASIL, 1987), o cálculo do custo de manutenção dos sistemas de irrigação é feito a partir de valores médios anuais expressos em porcentagem sobre o valor de aquisição dos equipamentos, estimados com base nos dados da Tabela 4, para uma operação

anual de 2000 horas. Atualmente, esta tabela deve ser utilizada com reserva uma vez que houve evolução tecnológica de certos equipamentos, como é o caso dos motores diesel e elétricos e dos tubo de polietileno para gotejamento, alterando, com isso, sua vida útil e os valores de manutenção.

Dorfman(1988) apresenta o custo relativo para estimativa das despesas com administração direta e conservação dos componentes do sistema de irrigação na Tabela 5, e vida útil dos componentes para determinação dos custos de reposição na Tabela 6.

TABELA 4 – Vida Útil e Taxa de Manutenção de Componentes de Sistemas de Irrigação

| Componentes | Vida Útil (anos) | Manutenção Anual (% do novo) |
|-------------------------------------|-----------------------------|---|
| Aspersores fixos | 7-10 | 5,0 – 8,0 |
| Aspersores móveis | 10-15 | 5,0 – 8,0 |
| Bomba centrífuga | 16-25 | 3,0 – 5,0 |
| Estrutura da estação de bombeamento | 20-40 | 0,5 – 1,5 |
| Estruturas de concreto | 15-25 | 0,5 – 1,0 |
| Motor diesel | 10-20 | 5,0 – 8,0 |
| Motor elétrico | 20-25 | 1,5 – 2,5 |
| Reservatórios | --- | 1,0 – 2,0 |
| Sistematização de terras | --- | 1,5 - 2,5 |
| Tubo de aço enterrado | 15 – 25 | 0,25 – 0,50 |
| Tubo de aço na superfície | 10 – 20 | 1,0 – 2,0 |
| Tubo de alumínio | 10 – 20 | 1,5 – 2,5 |
| Tubo de concreto | 15 - 25 | --- |
| Tubo de polietileno (gotejamento) | 8 - 10 | 1,5 – 2,5 |
| Tubo de PVC enterrado | 15 - 40 | 0,25 – 0,75 |

Fonte: BRASIL(1987)

TABELA 5 – Custos de Operação e Manutenção dos Componentes do Sistema de Irrigação, em Porcentagem de seu Custo de Aquisição

| Item | % |
|---|----------|
| canais revestidos | 1,0 |
| canais não revestidos | 2,0 |
| adutoras metálicas | 1,5 |
| obras de madeira | 8,0 |
| sistemas pressurizados de aplicação de água | 3,0 |

Fonte: Dorfman(1988)

TABELA 6 – Vida Útil de Alguns Elementos de Projetos de Irrigação

| Item | Vida Útil (anos) |
|--|-----------------------------|
| obras civis de canais, barragens e estações de bombeamento | 50 |
| tubos de ferro fundido | 50 |
| tubulação de recalque | 35 |
| acessórios de estações de bombeamento | 35 |
| linhas e equipamentos elétricos | 25 |
| conjunto moto-bomba elétrico | 15 |
| Tubos portáteis de irrigação | 15 |
| motores diesel | 12 |
| válvulas e acessórios | 10 |
| aspersores | 8 |
| poços | 25 |

Fonte: Dorfman(1988)

Zocoler et al.(1996) estimaram o custo anual total de sistemas de irrigação por aspersão convencional como sendo a soma do valor gasto anualmente com bombeamento, devido à energia despendida pelo sistema, com o valor anual da mão-de-obra gasto com manutenção e reparos, assumido pelos autores como 3% do investimento total com os equipamentos, e com o custo anual fixo dos equipamentos, baseados em sua depreciação.

Bruxel(1991) apresenta a equação 73, para o cálculo do consumo de energia elétrica mensal, e a equação 74, para determinação do custo da energia elétrica total para o produtor rural.

$$CME = \frac{(0,736.PC) \cdot \frac{TU}{TT} \cdot 730.CUCEE}{0,82} \quad (73)$$

em que: CME = valor do consumo mensal de energia elétrica, R\$;

PC = potência do motor, CV;

TU = tempo de uso diário, h;

TT = tempo total disponível em um mês, horas;

730 = número de horas disponíveis em um mês;

CUCEE = custo unitário do consumo de energia elétrica, R\$/kWh;

0,82 = constante para inclusão do ICMS de 18%.

$$CMTEE = CDEE + CME \quad (74)$$

em que: CMTEE = custo mensal total da energia;

CDEE = custo da demanda de energia elétrica dado pela equação 75.

$$CDEE = \frac{(0,736.Pot).CUDEE}{0,82} \quad (75)$$

em que: Pot = potência nominal do motor, CV;

CUDEE = valor unitário da demanda, R\$/kW.

No caso do motor a diesel, Carvalho(2000) fornece a equação 76 para o cálculo do consumo de combustível.

$$CD = \left[0,03054 + \frac{0,2445}{PC} \right]^{0,5} \cdot PC \quad (76)$$

em que: CD = consumo total horário de combustível do motor diesel, L/h.

Guerra et al.(1988) apresentaram uma metodologia para avaliar economicamente um sistema de irrigação por pivô central. Os indicadores econômicos para tal avaliação foram o valor líquido presente, a taxa interna de retorno e a relação custo/benefício, considerando ainda os fatores de risco da atividade. Aplicaram então este modelo aos pivôs utilizados no serviço de produção de sementes básicas da EMBRAPA de Petrolina-PE e concluíram que o projeto de irrigação analisado, nas condições de ensaio, não é rentável, sendo preferível a aplicação do capital em outra atividade econômica, como a caderneta de poupança.

Mattoso e Silva(1989) desenvolveram um modelo que permite, além de estimar o custo de produção da cultura irrigada sob pivô central, avaliar os efeitos, em termos de resultado econômico, de qualquer variação de seus componentes de custo. Tal modelo foi então aplicado a uma planilha eletrônica e constou de 5 etapas: custo da mão-de-obra e operação das máquinas e equipamentos; custo de operação do sistema de irrigação; custo do desmatamento, correção e conservação de solo; custo de produção da cultura; e receita total.

Bruxel(1991) relatou a participação dos custos de produção para trigo, feijão e tomate irrigados por pivô central, resumidos na Tabela 7.

TABELA 7 – Componentes e sua Participação Relativa no Custo de Produção de Algumas Culturas Irrigadas

| Cultura | Proporção Relativa dos Custos de Produção (%) | | |
|---------|---|--------------------------|-------------------------|
| | Insumos ⁽¹⁾ | Irrigação ⁽²⁾ | Serviços ⁽³⁾ |
| trigo | 47,5 | 26,5 | 26,0 |
| feijão | 51,3 | 18,0 | 30,7 |
| tomate | 61,8 | 6,2 | 32,0 |

OBS.: ⁽¹⁾ refere-se a todo material gasto na produção, como, por exemplo, sementes, adubos, inseticidas, fungicidas e herbicidas; ⁽²⁾ refere-se exclusivamente ao custo da energia elétrica considerando-se a tarifação verde; ⁽³⁾ refere-se ao custo para preparo do solo, aplicação de produtos químicos, sulcamento e adubação, plantio, tratos culturais em geral e colheita.

(Fonte: Bruxel, 1991)

2.6 Otimização do Lucro em Agricultura Irrigada

Genericamente, a otimização do lucro é obtida pela maximização da produção com uma minimização dos custos. Bernardo(1998) lembra que, para o agricultor, o aumento da produtividade não é o objetivo final, mas um caminho para se obter o lucro máximo. Desta forma, a lâmina econômica ótima de irrigação é aquela lâmina que proporciona uma produtividade tal que conduz ao lucro máximo permitido.

Segundo Scaloppi e Colombo(1988), a maximização da receita líquida do irrigante exige o conhecimento do custo de aplicação de cada incremento de

água e seu respectivo resultado econômico. Com relação à quantidade de água utilizada na produção vegetal, esta depende do tipo de cultura, incluindo variedade e comprimento do ciclo, e do clima local.

Costa(1991) elaborou um modelo computacional para determinar a combinação de época de plantio de diversas culturas de tal forma que se obtenha um menor consumo de água de irrigação. Para isso, ele utilizou os valores de necessidades hídricas das culturas determinadas em função dos valores de evapotranspiração e de precipitação, que têm 75% de probabilidade de ocorrência.

Nos processos de otimização de renda em agricultura irrigada, Frizzone(1998) afirma que quando a área é fixa e não ocorre limitação de quantidade de água, a lâmina econômica ótima é muito sensível ao preço do produto. Menciona ainda que preços baixos do produto podem tornar a irrigação inviável economicamente.

Algumas particularidades são ainda mencionadas na literatura com relação ao uso da função água-produção e seu conseqüente efeito econômico.

Arruda(1987), analisando os resultados obtidos pelo Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) com a função água-produção para feijão e trigo, observou que próximo ao ponto de melhor rendimento água-produção, a produção máxima variou pouco, cerca de 10%, com uma quantidade elevada de água, cerca de 40%.

Sousa, Frizzone e Peres(1996), estudando a otimização da renda baseada na função água-produção das culturas do feijão, milho, melancia e tomate industrial, plantados em uma mesma propriedade, concluíram que o melhor resultado econômico seria obtido com um déficit de 20%, se não houvesse limitação de área, ou com um déficit de 10%, caso ocorresse tal limitação.

Por outro lado, comparando as lâminas e produtividades máximas econômicas e máximas físicas para a cultura do milho em Sete Lagoas-MG, Oliveira et al.(1993) perceberam que as diferenças eram muito pequenas, cerca de 5% para as lâminas e inferior a 1,4% para a produtividade, e atribuíram esse fato aos altos custos fixos dos projetos de irrigação analisados. Com isso, concluíram que se poderia fazer uso máximo do fator água sem que houvesse prejuízo significativo de ordem econômica ao produtor.

Da mesma forma, utilizando a função água-produção do milho doce cultivado em Sete Lagoas-MG, Heinemann et al.(1998) também concluíram que a lâmina correspondente à máxima produtividade física foi a que apresentou maior receita líquida.

Uma forma que Karmeli, Peri e Todes(1985) encontraram para maximizar o lucro a ser obtido com irrigação foi por meio de uma função objetivo, dada por

$$\text{Max[LIR]} = \text{YT} \cdot (\text{Py} - \text{Px}) - \text{Va} \cdot \text{CW} \quad (77)$$

em que: LIR = retorno econômico obtido com a irrigação;

YT = produção total esperada;

Py = ganho por unidade de produção ou valor unitário do produto;

Px = custo por unidade de produção;

Va = volume total de água aplicada;

CW = custo da aplicação da água.

Os custos de produção, na agricultura irrigada, são classificados por Frizzone(1998) em quatro categorias: custos independentes da quantidade de água aplicada, como preparo do solo; custos que dependem indiretamente da quantidade de água aplicada, como fertilizantes; custos que dependem

diretamente da quantidade de água aplicada, como energia; e custos que dependem diretamente da quantidade produzida, como colheita.

Assumindo-se a condição de que a terra é o único fator limitante à produção, que a função água-produção é um polinômio do segundo grau, como mostrada na equação 78, e assumindo-se ainda que a soma dos custos fixos (CF) e dos custos que dependem indiretamente da quantidade de água (C) é constante, Frizzone(1998) expressou o custo total de produção (CT) como mostrada na equação 79.

$$Y = a_0 + a_1.W + a_2.W^2 \quad (78)$$

$$CT = C + W.P_w \quad (79)$$

em que: P_w = custo diretamente dependente da quantidade de água aplicada;

W = quantidade de água aplicada.

A receita líquida (RTL) ou lucro é dada por Oliveira et al.(1993), Bernardo(1998) e Frizzone(1998) como:

$$RTL = YT.P_y - (C + W.P_w) \quad (80)$$

em que: P_y = preço unitário do produto;

YT = produção total.

Oliveira et al.(1993) consideraram o preço do fator água (PF_w) como sendo:

$$PF_w = DPS + MOS + EB \quad (81)$$

em que: DPS = custo da depreciação do sistema de irrigação;

MOS = valor de manutenção e operação do sistema por ciclo produtivo da cultura;

EB = valor gasto com energia para bombeamento durante o ciclo da cultura.

Para a maximização da receita líquida em relação ao fator água, ou seja, lucro máximo, estes autores derivaram a equação 80 em relação à quantidade de água aplicada e encontraram a equação 82, de onde concluíram que o lucro é máximo quando a derivada primeira do rendimento em relação à lâmina total de água for igual à relação de preços do fator água e do produto.

$$\frac{dY}{dW} = \frac{Pw}{Py} \quad (82)$$

Aplicando a equação 78 na equação 82, Frizzone(1998) encontrou a quantidade ótima de água para máximo lucro:

$$W = \frac{Pw - Py \cdot a_1}{2 \cdot a_2 \cdot Py} \quad (83)$$

2.7 Engenharia de Software

Engenharia de software é definida por Maffeo(1992) como “a área interdisciplinar que engloba vertentes tecnológicas e gerenciais visando abordar, de modo sistemático, os processos de construção, implantação e manutenção de produtos de software com qualidade assegurada por construção,

segundo cronogramas e custos previamente definidos". Complementando, o autor menciona que a engenharia de software tem como objetivo básico o aprimoramento da qualidade dos produtos de software e o aumento da produtividade dos programadores.

Das diversas metodologias utilizadas pela engenharia de software no planejamento de programas, Maffeo(1992) menciona um modelo clássico que divide o processo de desenvolvimento em fases a serem executadas sequencialmente e especifica os documentos a serem gerados nessas fases, conforme mostrado na Figura 2.

Em termos de agricultura, na fase de projeto da Figura 2, utilizam-se modelos, que constituem representações abstratas do sistema em estudo, os quais permitem descrever e/ou prever comportamentos específicos de tal sistema utilizando, para isso, uma quantidade reduzida de suas características. Esta simplificação dos sistemas reais, de acordo com Maffeo(1992), é a característica básica do processo de modelagem que tem a finalidade de permitir dominar sua complexidade devido à grande quantidade de detalhes envolvidos. Este autor apresenta, na Figura 3, um esquema para a elaboração de modelos de sistemas do mundo real.

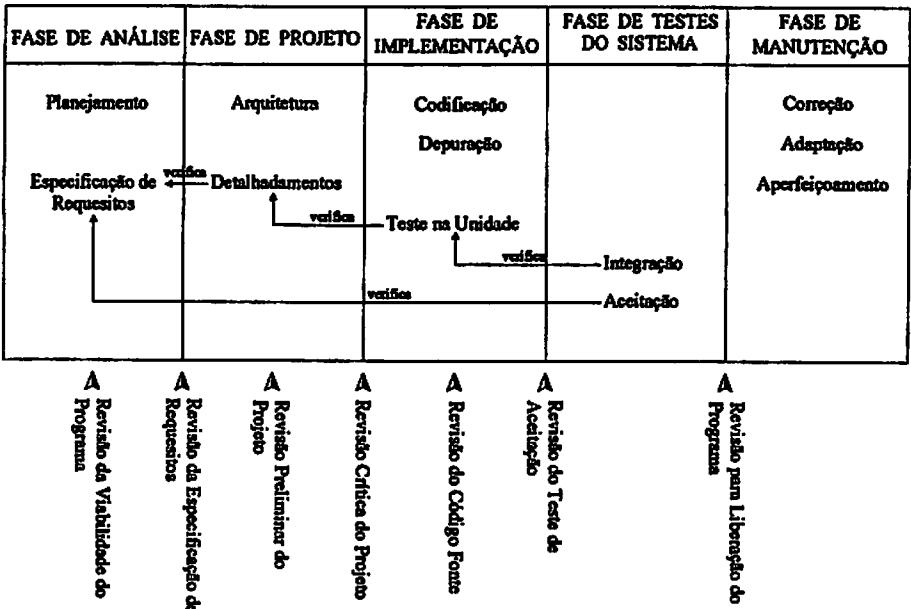


FIGURA 2 – Modelo Clássico Empregado no Planejamento de Programas
(Fonte: Maffeo,1992)

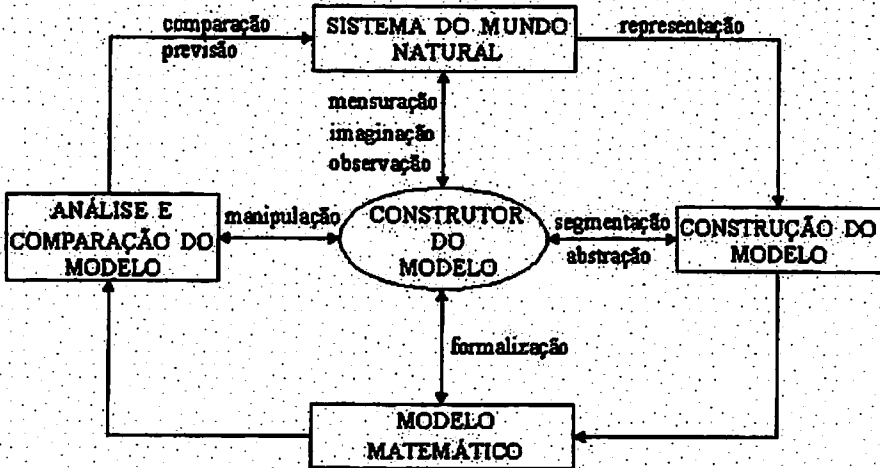


FIGURA 3 – Esquema para a Elaboração de Modelos de Sistemas do Mundo Real
(Fonte: Maffeo,1992)

Além da modelagem, o programador deve se preocupar também com a interface do programa com o usuário. Heckel(1993) menciona um estudo que afirma que, para o êxito de um programa, a qualidade da interface é três vezes mais importante do que a técnica de programação propriamente dita. Com a finalidade de auxiliar o programador na tarefa de elaboração de um software fácil de usar, ou amigável, Heckel(1993) apresenta diversos conselhos, dentre os quais:

i) o programador deve ter um conhecimento adequado sobre o assunto do programa;

ii) o programador deve também conhecer o público alvo e a forma de utilização do programa a ser elaborado, o que implica em estabelecer um nível mínimo de conhecimento que o usuário deve ter sobre o assunto e uma comunicação prevendo a forma de pensar do usuário;

iii) o programa deve utilizar outros recursos na interface além da escrita, como imagens, ícones (pequenos gráficos) e sons;

iv) a essência do programa deve ser simples, embora seus detalhes não precisem necessariamente sê-lo, o que o torna fácil de entender, aprender e usar. Para isso o programador deve usar, por exemplo, vocabulário e conceitos o mais simples possível e que sejam familiares ao usuário. O programa ideal, segundo o autor, é aquele que não precisa de manual ou informações complementares para seu uso;

v) o programador deve prever os possíveis erros que o usuário possa cometer e eliminar suas conseqüências no processamento, bem como descrever os problemas o melhor possível para usuário;

vi) o programa deve se comunicar com o usuário sempre em termos específicas, e não genéricos, seja solicitando ou apresentando informações;

vii) o programa deve permitir que o usuário altere facilmente as informações fornecidas, devendo, para isso, responder imediatamente às suas ações.

Os programas podem ser elaborados para operar principalmente no ambiente DOS ou Windows. Diferenciando a aplicação no ambiente DOS da aplicação no ambiente Windows, no primeiro, o controle de execução fica praticamente a cargo do programador, sendo o usuário normalmente obrigado a passar por todos os campos da tela. Já no ambiente Windows, o usuário pode permutar entre as telas e campos do programa escolhendo qual item deseja acessar primeiro. Outra característica relevante das linguagens para o ambiente Windows é que elas fornecem ao programador uma considerável biblioteca de ferramentas a ser usada na interface com o usuário sem a necessidade de que ele tenha que construí-las totalmente. Além disso, o ambiente Windows, segundo Lima(1996), pelos elementos gráficos presentes, é bem mais agradável para o usuário do que a interface do DOS, o que levou Craig(1994) a afirmar que o Windows torna o computador mais amigável para o usuário.

Alguns elementos de percepção visual do ambiente Windows para interface com o usuário, mencionadas por Lima(1996), são: contornos, para fornecer efeito tridimensional enfatizando algum elemento; cores; fontes; botões; barras de rodapé, que servem para transmitir avisos e/ou informações ao usuário; e ícones, que servem para simbolizar graficamente funções específicas.

Lima(1996) menciona que as três linguagens mais utilizadas até então no desenvolvimento de aplicações para Windows eram o Visual Basic, que foi uma das primeiras a surgir para esse ambiente, o SQL Windows, que embora não tão difundido como o anterior, apresenta certas características importantes em termos de produtividade, e o Delphi, que tem se popularizado devido a seu alto desempenho. Em termos de poder, flexibilidade e velocidade, Craig(1994) afirma que a versão 3 do Visual Basic praticamente se iguala à linguagem C,

superando-a em termos de produtividade. Atualmente, o Visual Basic está em sua sexta versão, possuindo novos componentes de programação visual e a possibilidade de geração de bibliotecas de linkagem dinâmica, conhecida pela sigla DLL. Comparando o Delphi com o Visual Basic, Rubenking(1998) menciona que o primeiro possui algumas vantagens, como serviço completo de compilação.

Tanto os programas desenvolvidos em Visual Basic como em Delphi são orientados a objetos, sendo este um conceito fundamental nos aplicativos em ambiente Windows, de acordo com Craig(1994). Um objeto pode ser entendido como uma combinação de variáveis e rotinas em um único elemento, que pode ainda incorporar ou ser incorporada por outros objetos e com isso herda ou transmite características. Para Cantú(1996), uma das principais vantagens da programação orientada a objetos é a reutilização das mesmas ferramentas de programação visual em vários programas diferentes.

2.8 Programas Desenvolvidos para o Planejamento da Irrigação

Nas últimas três décadas, diversos programas foram desenvolvidos objetivando auxiliar o planejamento operacional de sistemas de irrigação. Em comum, tais programas consideram o método do balanço de água no solo e apresentam a lâmina total de irrigação, e diferem entre si basicamente pelo grau de complexidade do algoritmo empregado e tipo de dados requeridos.

Windsor e Chow(1971) apresentam um modelo computacional para a determinação do turno de rega que leva à obtenção do lucro máximo com a máxima produtividade da cultura irrigada, usando, para isso, procedimentos iterativos associando dados técnicos e econômicos.

Já no modelo de Howell, Hiler e Reddell(1975), o objetivo é a determinação da lâmina de irrigação de melhor eficiência técnica, dada pela

relação entre a produção da cultura e a lâmina total de irrigação aplicada, não levando em consideração parâmetros econômicos.

Um programa foi desenvolvido por Bernardo e Hill(1978) para estimar a irrigação suplementar em qualquer tipo de solo, planta e clima, com turnos de rega preestabelecidos entre 5 e 30 dias.

Baseando-se em rotinas computacionais existentes, Dean(1980) desenvolveu um programa que pode ser usado no planejamento da irrigação em diferentes climas, culturas e solos. Este difere basicamente do programa de Bernardo e Hill(1978) pelo uso de um algoritmo mais elaborado para o balanço de água no solo.

Também a partir de rotinas existentes, no caso o modelo ICSWAB para culturas de sequeiro, Reddy(1983) elaborou um programa para o planejamento de irrigação.

Miyamoto(1984) desenvolveu um modelo computacional específico para a estimativa do consumo de água de irrigação em pomares. Devido às limitações de hardware da época, o autor dividiu seu modelo em três programas: o primeiro processa dados climáticos, o segundo efetua o manejo de água no solo e o terceiro estabelece a forma de operação do sistema de irrigação.

Considerado a extratificação do solo e balanços de água em intervalos diários, Chesness, Cochran e Hook(1986) desenvolveram um modelo para estimar a irrigação suplementar.

Levando em consideração a influência do lençol freático sobre a cultura, Abdulmumin(1989) apresentou um modelo computacional que estima as irrigações necessárias para a obtenção da máxima produtividade.

Um modelo numérico que simula o crescimento das raízes, o movimento de água no solo e estima a produção agrícola em função da quantidade e duração das irrigações foi desenvolvido por Tracy e Marino(1989).

A partir de um programa capaz de fornecer dados ajustados de precipitação diária e o outro de balanço de água no solo, o qual possui rotina para determinação da evapotranspiração, Villalobos e Fereres(1989) desenvolveram um modelo que estima as datas e quantidades de irrigação.

Com base na escolha adequada da data de plantio, Costa(1991) elaborou um programa que determina o consumo mínimo de água de irrigação para se obter a máxima produtividade das culturas do algodão, feijão e milho cultivadas na região norte de Minas Gerais.

Especificamente para a cultura do arrozeiro sob inundação, Azhar, Murty e Phien(1992) desenvolveram um modelo computacional para a simulação do manejo de irrigação.

Um programa para planejamento de irrigações, que utiliza dados do coeficiente basal da cultura a ser irrigada, foi apresentado por Leme e Chaudhry(1992).

Souza(1993) desenvolveu um programa para planejamento de irrigações e acompanhamento do manejo das culturas irrigadas, não sendo, entretanto, adequado para sistemas de irrigação localizada devido à não consideração das particularidades deste tipo de irrigação.

Para facilitar a entrada de dados pelos usuários em seu programa, Fox Júnior e Slack(1994) acrescentaram um banco de dados com informações de 60 culturas, dados climáticos e dados técnicos de sistemas de irrigação relativos ao estado norte americano do Arizona.

Prajamwong, Merkley e Allen(1997) desenvolveram um programa para estimar as exigências de água das culturas e estudar formas de manejo de áreas irrigadas considerando, inclusive, o efeito da salinidade da água e do solo.

Dos programas mencionados anteriormente, apenas os de Howell, Hiler e Reddell(1975) e Tracy e Marino(1989) não visam o planejamento da irrigação para se obter a máxima produtividade das culturas e apenas o de Windsor e

Chow(1971) leva em consideração aspectos econômicos neste planejamento. Isso mostra que a grande ênfase dos programas ora desenvolvidos é o uso da irrigação para a obtenção da produtividade física ótima, ou máxima produção, e não a produtividade econômica ótima, objetivo do presente trabalho.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Parâmetros Técnicos e Metodologia

3.1.1 Disponibilidade de Água no Solo

A determinação da disponibilidade total de água no solo foi feita pela equação 2. Considerou-se que as raízes cresciam diariamente até atingir seu valor máximo, segundo a equação 4.

3.1.2 Determinação do Consumo de Água Pela Cultura

A evapotranspiração de referência (ET_o) foi calculada usando os dados climáticos disponíveis aplicados às equações 7 a 13. Quando se utilizaram as equações 8, 11 e 12 para tal, a radiação de ondas curtas (R_s) foi determinada pela equação de Angstrom:

$$R_s = \left(a + b \cdot \frac{n}{N} \right) \cdot R_a \quad (84)$$

em que: R_a = radiação extraterrestre, mm/dia;

n = duração média de insolação real, h/dia;

N = duração máxima possível da insolação, h/dia;

a e b = parâmetros locais que caracterizam a transmitância da atmosfera.

Doorenbos e Kassan(1994) apresentam os valores genéricos dos coeficientes a e b da equação 84 respectivamente como 0,25 e 0,50, os quais são usados como padrão pelo programa.

Para a determinação do coeficiente c de ajuste local da equação 11, Doorenbos e Kassan(1994) fornecem um grupo de semi-retas, o qual pode ser expresso genericamente pela equação 85. A Tabela 8 fornece os parâmetros desta equação com base na umidade relativa e no vento diurno médios.

$$c = PA + \frac{PB}{W_r \cdot R_s} \quad (85)$$

em que: PA e PB: parâmetros de ajuste mostrados na Tabela 8.

TABELA 8 – Parâmetros da Semi-Reta de Ajuste da Equação 85 Baseados na Umidade Relativa Média e Velocidade do Vento Diurno (VVD)

| Intervalo de VVD (m/s) | Intervalos de Umidade Relativa Média | | | | | | | |
|------------------------|--------------------------------------|---------|----------|---------|----------|---------|--------|---------|
| | < 40% | | 40 – 55% | | 55 – 70% | | > 70% | |
| | PA | PB | PA | PB | PA | PB | PA | PB |
| 0 – 2 | 1,0404 | -0,5598 | 0,9910 | -0,6232 | 0,9322 | -0,6520 | 0,8318 | -0,6006 |
| 2 – 5 | 1,1253 | -0,4624 | 1,0635 | -0,5883 | 1,0012 | -0,6564 | 0,8828 | -0,5646 |
| 5 – 8 | 1,2102 | -0,5037 | 1,1243 | -0,2553 | 1,0669 | -0,6538 | 0,9413 | -0,5813 |
| > 8 | 1,2634 | -0,3241 | 1,1964 | -0,3761 | 1,1178 | -0,6448 | 0,9877 | -0,5891 |

Fonte: Adaptado de Doorenbos e Kassan(1994).

Para o cálculo da ETo pelo método de Penman, dado pela equação 8, utilizou-se a metodologia de Doorenbos e Kassan(1994). Alterou-se, entretanto, o albedo original de 0,25 para 0,23 por ser este último um valor que melhor represente uma superfície gramada, de acordo com Pereira, Villa Nova e Sediayama(1997). Já o cálculo por Penman-Monteith, equação 12, adotou-se o procedimento descrito por Pereira e Allen(1999), com as ressalvas anteriores.

Para o cálculo da ETo por meio do tanque Classe A, utilizou-se a metodologia descrita em Bernardo(1989).

Para o cálculo da ETo mensal por Blaney-Criddle e Thornthwaite, respectivamente equações 7 e 13, adotou-se procedimento fornecido por Varejão Silva e Reis(1988).

Para irrigação localizada, efetuou-se a correção da ETo anteriormente calculada conforme apresentado na equação 16. Para cálculo do coeficiente de localização, o programa estima a área sombreada através da equação 86. Nesta, considera-se que o desenvolvimento do dossel vegetativo é linear entre dois estádios consecutivos e que o sombreamento é diretamente proporcional a esse desenvolvimento. Com o valor assim determinado, calculou-se a fração de área sombreada e então o coeficiente de localização, segundo as equações 17, 18, 19 e 20. Para uso pelo programa do coeficiente de advecção fornecido pela Figura 1, obtiveram-se as equações apresentadas na Tabela 9.

$$AS_1 = ASm \cdot \left[FS_{EAN} + (FS_{EAT} - FS_{EAN}) \cdot \frac{d - d_{EAN}}{d_{EAT} - d_{EAN}} \right] \quad (86)$$

em que: AS_1 = área sombreada no dia "1", m^2 ;

ASm = área máxima sombreada, m^2 ;

FS_{EAN} = fração de sombreamento máximo no estádio anterior, decimal;

FS_{EAT} = fração de sombreamento máximo no estádio atual, decimal;

d_{EAN} = data de ocorrência de FS_{EAN} ;

d_{EAT} = data de ocorrência de FS_{EAT} .

TABELA 9 – Equações do Coeficiente de Advecção (Ka) em Função do Porte da Cultura e da Área Irrigada (AI), Baseadas na Figura 1

| Porte da Cultura | Faixa de Validade (área irrigada, ha) | Equação | |
|-------------------------|--|----------------------------|------------------|
| gramínea | 0,01 – 1000,00 | $Ka = 0,9496.AI^{-0,0257}$ | $(r^2 = 0,9992)$ |
| milho (3 metros) | 0,01 – 1000,00 | $Ka = 0,9975.AI^{-0,0410}$ | $(r^2 = 0,9959)$ |
| | 0,01 – 0,10 | $Ka = 1,0306.AI^{-0,0507}$ | $(r^2 = 0,9905)$ |
| | 0,10 – 1,00 | $Ka = 1,0083.AI^{-0,0450}$ | $(r^2 = 0,9975)$ |
| árvore | 1,00 – 1000,00 | $Ka = 0,9934.AI^{-0,0417}$ | $(r^2 = 0,9999)$ |

Posteriormente ao cálculo da ETo, os resultados foram agrupados dentro de intervalos predefinidos e calculou-se a evapotranspiração provável de referência, como descrito no item 3.1.5. Obtido esse valor, calculou-se a evapotranspiração potencial (provável) da cultura por meio da equação 21. Para o cálculo da evapotranspiração real, utilizou-se a equação 23.

3.1.3 Precipitação

Os dados de precipitação foram inicialmente agrupados para a determinação do valor provável dos mesmos. Quando os dados forem diários, eles são agrupados diretamente dentro de um intervalo predefinido, como, por exemplo, o turno de rega. Quando forem mensais, o programa agrupa todos os dados referentes a um mesmo mês, calcula a precipitação provável mensal e então estima-se simplesmente a precipitação média diária.

Na necessidade de estimativa da precipitação efetiva teórica, utilizou-se a equação 5. O valor efetivo máximo, entretanto, foi sempre determinado pela

diferença entre a disponibilidade total de água no solo, para o dia em questão, e a lâmina de água no solo após computar a evapotranspiração ocorrida no balanço de água no solo.

3.1.4 Nível de Probabilidade Considerado

No programa, considerou-se uma probabilidade de excedência de ocorrência de precipitação de 80%, o que corresponde a uma probabilidade de não excedência de 20%. Para a evapotranspiração, considerou-se uma probabilidade de não excedência de ocorrência de 80%.

3.1.5 Cálculo dos Dados Climáticos Prováveis

Com base na série história de dados de evapotranspiração e precipitação, estimaram-se os respectivos valores prováveis pelas funções Gama Incompleta, Exponencial e Log-Normal, de acordo com as equações 24, 31 e 33.

Para a resolução da distribuição normal reduzida, utilizada pela Log-Normal, foram empregados os algoritmos apresentados por Dachs(1988).

Para a determinação dos valores prováveis pela função Gama Incompleta, a função Gama foi calculada pelos procedimentos apresentados por Haan(1977). Os parâmetros α e β desta equação foram determinados pelas equações 26 e 27. Na determinação do nível de probabilidade, a integral da função Gama Incompleta foi resolvida por meio da primeira regra de Simpson, segundo metodologia apresentada por Barroso et al.(1987). Independente do valor de evapotranspiração ou precipitação, a integração foi efetuada sempre com um número de intervalos que fornecesse um erro máximo arbitrado em 0,001mm. O limite inferior da integral, em qualquer caso, foi considerado como 0,1 mm, por ser este o menor valor mensurável em estações climatológicas. A

equação 87, apresentada por Barroso et al.(1987), define este número de intervalos.

$$NII = \left(\frac{-(LI - VI)^5}{180.ER} \right)^{0,25} \quad (87)$$

em que: NII = número de intervalos de integração;

LI = limite inferior da integral, mm;

VI = valor da precipitação ou evapotranspiração de interesse, mm;

ER = erro admissível, mm.

Uma particularidade dos dados de precipitação é a possibilidade de ocorrência de valores nulos, os quais não podem ser usados pelas funções anteriormente descritas. Por isso, procedeu-se a uma análise destes dados através de distribuição mista, dada pela equação 34.

Como existe a possibilidade de ajuste de três funções distintas para o mesmo agrupamento de dados, procedeu-se à escolha da melhor função com base no teste de Kolmogorov-Smirnov, conforme descrito por Massey(1951). Neste caso, para encontrar o valor de evapotranspiração ou precipitação, dado um nível de probabilidade, foi implementado o método de Newton-Rapson, de acordo com Barroso et al.(1987), sendo a função básica calculada pelo processo de Simpson. O valor inicial deste processo foi tomado como sendo a média dos valores contidos no intervalo considerado.

3.1.6 Balanço de Água no Solo

O balanço de água no solo foi efetuado pela equação:

$$LAA_D = LAA_{(D-1)} - ETR_D + PT_D + IR - PD_D \quad (88)$$

em que: LAA_D = lâmina de água no solo no final do dia “D”, mm;

$LAA_{(D-1)}$ = lâmina de água no solo no final do dia anterior ao considerado, mm;

ETR_D = evapotranspiração real da cultura no dia “D”, mm;

PT_D = precipitação total do dia “D”, mm;

IR = lâmina de irrigação aplicada no final do período relativo ao turno de rega, mm;

PD_D = perdas diversas, percolação e escoamento superficial, por exemplo, referentes ao dia “D”, mm.

O valor inicial da lâmina de água no solo refere-se ao definido na data de plantio.

Com irrigação prevista para um determinado dia, ela é efetuada após a consideração da precipitação efetiva. O valor máximo da lâmina de irrigação é baseado em algum nível de reposição da evapotranspiração e seu valor efetivo é limitado ao máximo necessário para elevar a umidade atual do solo à capacidade de campo.

O componente de perdas da equação 88 diz respeito à parte da precipitação ou irrigação que não pôde ser aproveitada para o armazenamento ou consumo pela cultura.

3.1.7 Outros Parâmetros Técnicos

O intervalo de tempo entre duas irrigações consecutivas é denominado de turno de rega e foi determinado pela equação:

$$TR \leq \frac{LL}{ETPC_{(máx)}} \quad (89)$$

em que: TR = turno de rega, dias;

LL = irrigação real necessária, mm;

ETPC_(máx) = evapotranspiração potencial máxima da cultura, mm/dia.

A lâmina bruta de irrigação está diretamente relacionada com alguns custos variáveis e foi calculada pela equação 41 ou 45, conforme o tipo do sistema em questão, respectivamente aspersão ou localizada.

Outro tópico relevante diz respeito à capacidade de bombeamento do sistema para repor a lâmina simulada. Esta é determinada pelo tempo admitido para a operação, dado pela equação 90. Como pode ser percebido por esta equação, considerou-se, no programa, que as irrigações eram feitas diariamente ao longo de todo o turno de rega.

$$T \leq LB \cdot 10 \cdot \frac{AI}{Q} \cdot \frac{1}{TR} \quad (90)$$

em que: T = tempo máximo de funcionamento diário, h/dia;

LB = lâmina bruta de projeto, mm;

AI = área total irrigada, ha;

Q = vazão do sistema, m³/h;

TR = turno de rega, dias.

3.2 Parâmetros Econômicos e Metodologia

3.2.1 Introdução

O valor do lucro (LR) obtido para uma condição de reposição de lâmina de irrigação foi calculado pela equação:

$$LR = RT - (CFT + CVT) \quad (91)$$

em que: RT = receita bruta total calculada pela equação 92, R\$;

CFT = custo fixo total, R\$;

CVT = custo variável total, R\$.

$$RT = PRD(W) \cdot P_y \cdot AI \quad (92)$$

em que: PRD(W) = produtividade obtida com a lâmina total W, correspondente à precipitação e irrigação, usando-se a função água-produção, kg/ha;

P_y = valor unitário da produção, R\$/kg;

AI = área total irrigada, ha.

3.2.2 Cálculo do Custo Fixo do Sistema

O custo fixo total (CFT) foi calculado por:

$$CFT = CDPS + CFEE + CAD + CS + CM + TA + CFD \quad (93)$$

em que: CDPS = custo da depreciação do equipamento de irrigação, calculado pela equação 71, R\$;

CFEE = custo total da demanda de energia elétrica, R\$;

CAD = custo de administração direta e mão-de-obra, R\$;

CS = custo do seguro do equipamento, R\$;

CM = custo com manutenção de componentes do sistema de irrigação, calculado a partir das Tabelas 4 e 5, R\$;

TA = tarifa fixa de água pública, R\$;

CFD = custos fixos diversos, R\$.

Para os custos referentes ao período anual, CDPS, CS e CM, por exemplo, procedeu-se a uma redução do valor dos mesmos pela equação:

$$\text{FRCFA} = \frac{\text{DCC}}{\text{TAUS}} \quad (94)$$

em que: FRCFA = fator de redução do custo fixo anual, decimal;

DCC = duração do ciclo da cultura, dias;

TAUS = tempo anual médio de utilização do sistema de irrigação, dias.

3.2.3 Cálculo do Custo Variável do Sistema

O custo variável total (CVT) foi calculado por:

$$\text{CVT} = \text{CE} + \text{CMO} + \text{CI} + \text{CCST} + \text{CA} + \text{CVD} \quad (95)$$

em que: CE = custo da energia consumida, R\$;

CMO = custo da mão-de-obra temporária, R\$;

CI = custo dos fertilizantes e defensivos utilizados na produção, R\$;

CCST = custo de colheita, secagem e transporte da produção, R\$;

CA = custo da água consumida, excluindo-se a tarifa fixa, R\$;

CVD = custos variáveis diversos, R\$.

Para o cálculo do custo da energia, determinou-se a potência consumida pelo motor na operação de recalque através da equação:

$$PC = \frac{Q \cdot HMT}{270 \cdot \eta_h \cdot \eta_m} \quad (96)$$

em que: PC = potência consumida pelo motor, CV;

Q = vazão do sistema, m³/h;

HMT = altura manométrica total, mca;

η_h = eficiência da bomba hidráulica, decimal;

η_m = eficiência do motor, decimal.

Com base nos valores médios da potência *versus* consumo dos motores monofásicos e trifásicos fornecidos pela Centrais Energéticas de São Paulo-CESP(1995), obtiveram-se as equações 97, 98 e 99.

Para motores monofásicos, de 0,33 a 12,5 CV:

$$CEE = 0,3249 + 0,9050 \cdot Pot \quad (r^2 = 0,99) \quad (97)$$

Para motores trifásicos, de 0,33 a 12,5 CV:

$$CEE = 0,9093 \cdot Pot^{0,9736} \quad (r^2 = 0,99) \quad (98)$$

Para motores trifásicos, de 15 a 200 CV:

$$CEE = 1,0669.Pot^{0,9101} \quad (r^2 = 0,99) \quad (99)$$

em que: CEE = consumo de energia elétrica, kWh;

Pot = potência nominal do motor, CV.

Para o cálculo do custo de energia elétrica por volume bombeado, utilizou-se a equação:

$$CARE = \frac{CEE.TE}{Q.(1 - ICMS)} \quad (100)$$

em que: CARE = custo da água recalçada devido unicamente ao consumo de energia elétrica, R\$/m³;

TE = tarifa de energia, R\$/kWh;

Q = vazão recalçada, m³/h.

Caso o bombeamento do sistema se faça com motor diesel, o consumo de combustível é calculado com base na equação 76 e o custo da água recalçada, relativo unicamente ao custo de combustível deste motor, pela equação

$$CARD = \frac{CD.CUD}{Q} \quad (101)$$

em que: CARD = custo da água recalçada devido unicamente ao consumo do motor diesel, R\$/m³;

CUD = custo unitário do diesel, R\$/L;

3.2.4 Determinação da Lâmina Econômica Ótima de Irrigação

O valor da lâmina econômica ótima é aquele que gera maior lucro. Para determinar este valor, simularam-se diversas lâminas recalculadas pelo sistema de irrigação e determinou-se o respectivo lucro pela equação 91, com base no valor presente dos custos e receita na data de plantio. Procedeu-se desta maneira para obter uma maior precisão dos resultados, uma vez que a precipitação se dá de forma irregular e o consumo de água é variável ao longo do ciclo da cultura, o que implica em custos variáveis diferenciados com a operação do sistema de irrigação.

No processo iterativo de busca da lâmina ótima, o programa iniciou a reposição de irrigação com o máximo permitido e reduzia, a cada iteração, o valor da lâmina em 1%. Com o valor ótimo assim encontrado, o programa passou à fase de refinamento procedendo-se aos mesmos cálculos anteriores, porém com uma faixa de valores de reposição correspondente ao ponto ótimo anterior $\pm 1\%$ e decrementos de 0,01%. O valor da lâmina com maior lucro assim encontrado foi assumido como o procurado.

3.3 Elaboração do Sistema Computacional¹

Foi elaborado um programa computacional em linguagem DELPHI 5.0, versão acadêmica, operando sob o sistema operacional Windows®, para microcomputadores padrão IBM-PC/AT, a fim de proceder à determinação do valor da lâmina de irrigação.

¹ As marcas e nomes de empresas citados no texto não implicam em recomendação por parte do autor.

O programa foi desenvolvido de maneira que o usuário tenha uma interface amigável mesmo que não possua muita experiência no uso de computadores.

O fluxo de operações é mostrado, genericamente, na Figura 4. Os principais cálculos são mostrados, simplificados, pelos fluxogramas apresentados nas Figuras 5, 6, 7 e 8, respectivamente para a determinação da evapotranspiração e precipitação prováveis, balanço de água no solo e análise econômica das lâminas de irrigação simuladas.

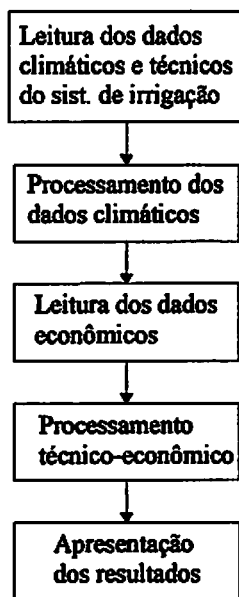


FIGURA 4 – Fluxo Geral de Operações do Programa

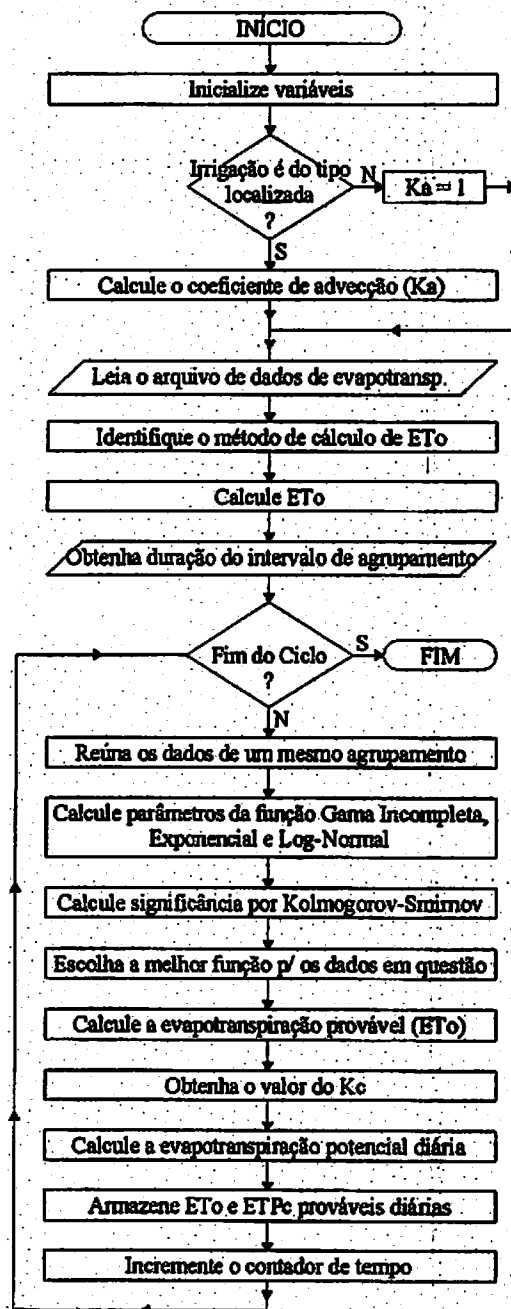


FIGURA 5 – Fluxograma Simplificado do Cálculo da Evapotranspiração Provável

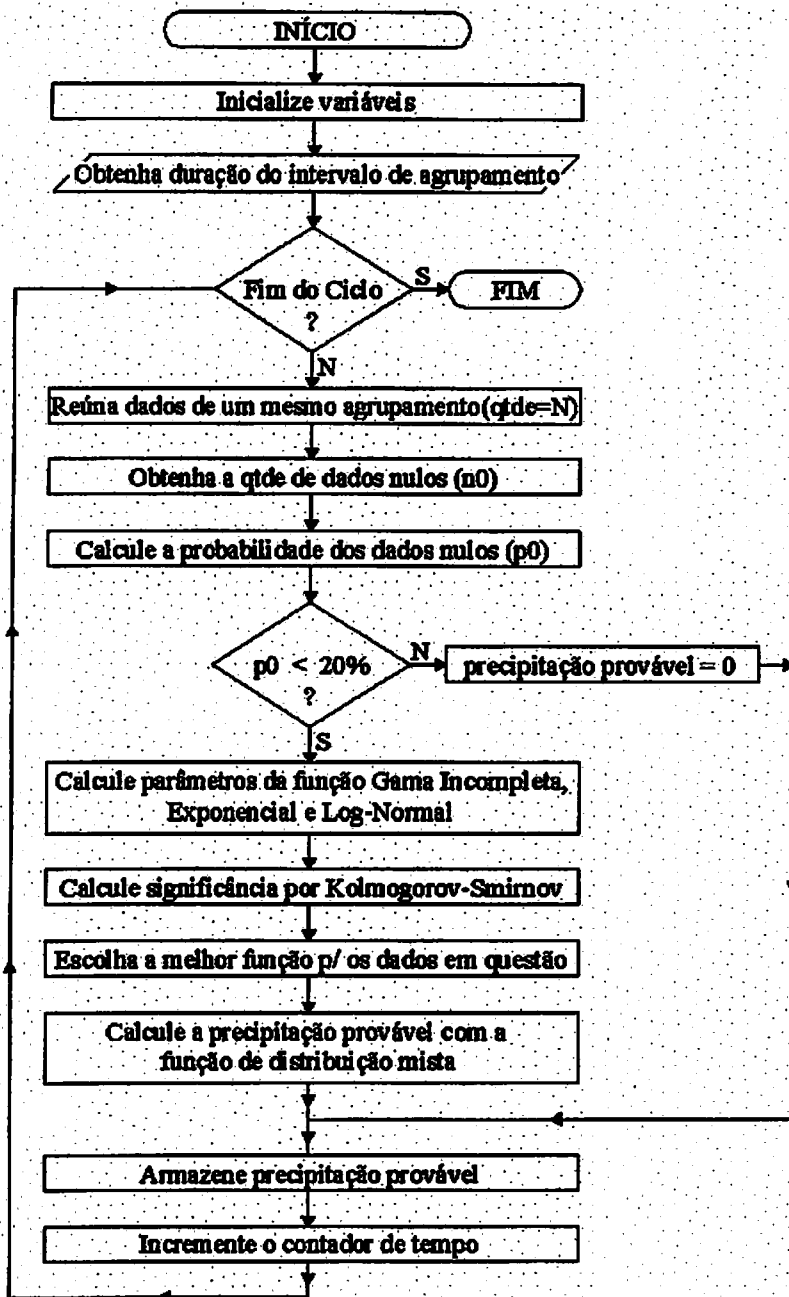


FIGURA 6 – Fluxograma Simplificado do Cálculo da Precipitação Provável

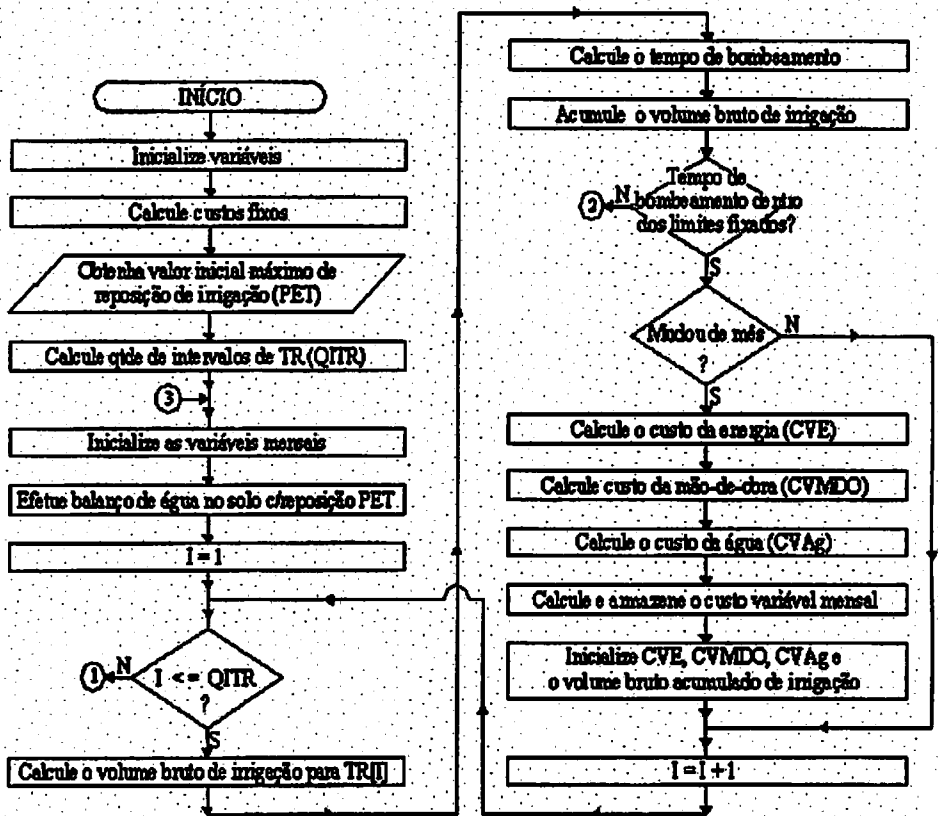
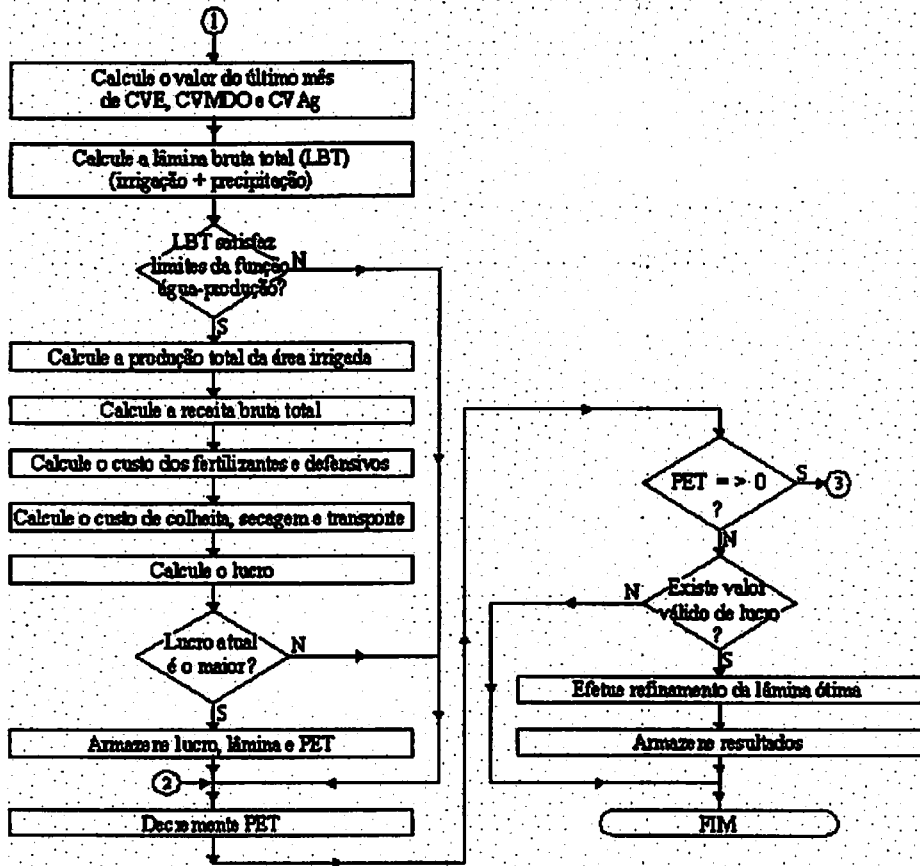


FIGURA 8 – Fluxograma Simplificado da Análise Econômica das Lâminas de Irrigação Simuladas (...Continua...)

FIGURA 8, Cont.



4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Descrição do Sistema Computacional

4.1.1 Introdução

O programa desenvolvido possui a estrutura apresentada na Figura 9. Para sua implementação, foram necessárias 21.500 linhas de código fonte.

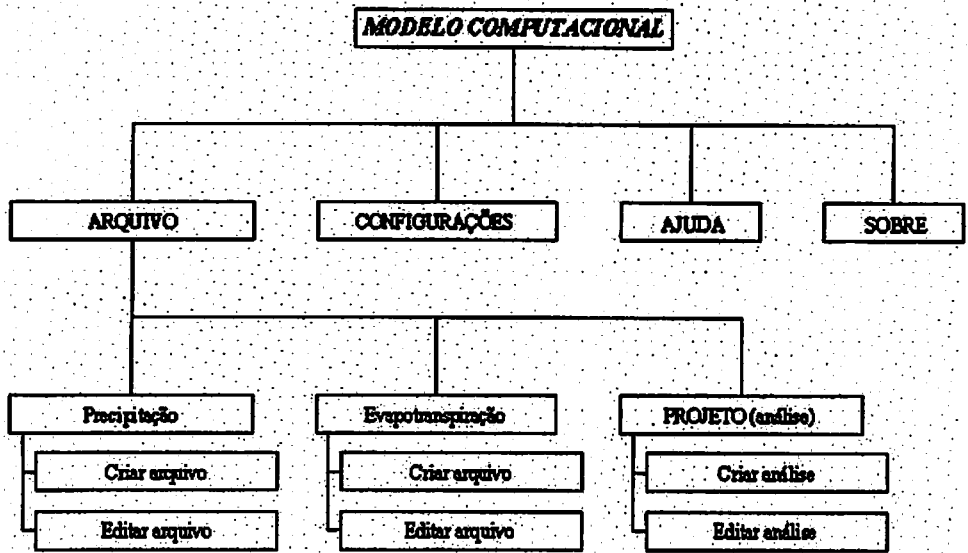


FIGURA 9 – Estrutura Básica do Programa

A tela principal contém a barra de menu e botões de atalho, conforme mostrado na Figura 10. A barra de menu contém quatro opções: Arquivo, que permite a criação e edição do arquivo de dados de precipitação e evapotranspiração, e ainda é responsável pela execução da análise econômica propriamente dita e finalização do programa; Configurações, que fornece algumas opções que interferem na anterior; Ajuda, que acessa o arquivo de ajuda e o manual on-line do programa, o qual é apresentado resumidamente no Anexo; e Sobre, que mostra informações a respeito do programa. Os botões de atalho são, simplesmente, uma maneira alternativa de acessar as principais opções da barra de menu, descritas anteriormente.

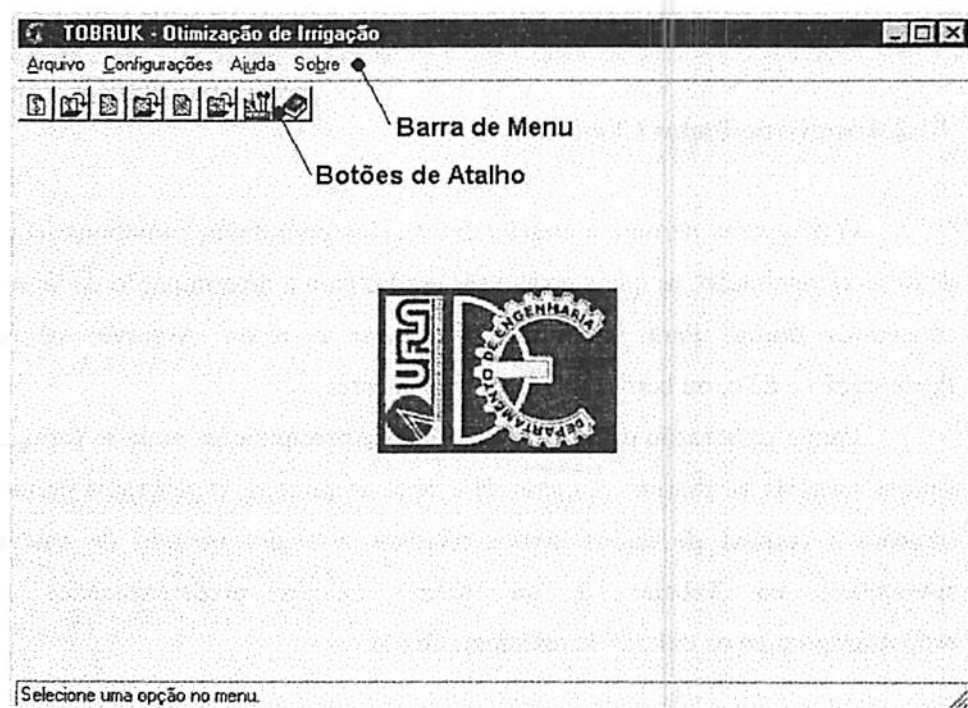


FIGURA 10 – Tela Principal do Programa Mostrando a Barra de Menu e Botões de Atalho

Para o uso do programa, aconselha-se, inicialmente, estabelecer as configurações de interesse através do menu Configurações. Os arquivos de dados meteorológicos, que são essenciais para a execução do mesmo, podem ser pré-fornecidos ou confeccionados com as opções adequadas do menu Arquivo. Só então deve-se usar a opção Projeto deste menu para iniciar uma nova análise. Para eventuais dúvidas, o programa é provido de ajuda on-line, que pode ser ativada a qualquer momento por meio da tecla F1.

Além da obtenção da lâmina econômica ótima, o programa permite ainda a simulação de uma condição específica de irrigação, para a obtenção do lucro por ela proporcionada. Isso pode ser utilizado, por exemplo, para estimar o retorno econômico gerado em datas de plantio diferentes, proporcionando, assim, parâmetros econômicos para a escolha da melhor época de plantio.

4.1.2 Arquivo de Dados Climáticos

O programa permite a criação de arquivos com dados pluviométricos e de evapotranspiração, os quais podem ser usados para a determinação da lâmina econômica ótima. Para isso, pode-se utilizar o menu Arquivo, opções Precipitação e ETo, ou botões de atalho equivalentes.

Para a elaboração do arquivo de dados de precipitação, pode-se fornecer valores mensais ou diários. No caso da evapotranspiração, o programa permite somente a entrada de dados diários relativos a algum método de cálculo apresentado na Tabela 10, ou mesmo valores predeterminados da evapotranspiração da cultura de referência (ETo).

TABELA 10 – Dados Necessários ao Cálculo da Evapotranspiração em Função do Método

| Método de Cálculo | Dados Necessários |
|-------------------------------|--|
| Thornthwaite e Blaney-Criddle | temperatura média mensal e latitude do local |
| Método da Radiação e Penman | latitude e altitude do local, dados diários de temperatura média do ar, duração real da insolação, umidade relativa média e velocidade do vento a dois metros de altura |
| Penman-Monteith | latitude e altitude do local, dados diários de temperatura mínima, média e máxima do ar, duração real da insolação, umidade relativa média e velocidade do vento a dois metros de altura |
| Tanque Classe A | tipo e raio de bordadura do tanque e dados diários de evaporação do tanque, umidade relativa média e velocidade do vento |

Os arquivos de dados de precipitação e evapotranspiração podem ser ainda elaborados por outros programas, como o Excel[®], desde que se siga o padrão de formatação exigido pelo programa, apresentado no Anexo.

Uma vez elaborado o arquivo de dados de precipitação ou evapotranspiração, o programa permite sua leitura, para eventual verificação e/ou alteração de seus dados, através da opção adequada em Precipitação ou ETo do menu Arquivo, ou botão de atalho correspondente.

4.1.3 Configurações Gerais de Cálculo

Por meio do menu ou botão de atalho Configurações, o programa permite que se alterem opções que podem interferir na determinação da lâmina econômica ótima, bem como permite que se acompanhem os cálculos da mesma.

Os parâmetros que interferem no cálculo dizem respeito à estimativa ou não da precipitação efetiva (equação 5); valor mínimo de umidade a ser mantido no solo durante o processo de determinação da lâmina econômica ótima; valor do intervalo de agrupamento dos dados de precipitação e evapotranspiração para o cálculo do valor provável dos mesmos; e valores locais dos coeficientes da equação de radiação de ondas curtas (equação 84).

4.1.4 Obtenção da Lâmina Econômica Ótima

A determinação da lâmina econômica ótima é realizada por meio da seleção de alguma opção do item Projeto do menu Arquivo, ou botão de atalho correspondente, o qual, após a seleção, apresenta um grupo de telas dispostas seqüencialmente, tanto na geração de uma nova análise quanto na edição de alguma previamente gravada.

O programa é adequado para a obtenção da lâmina econômica ótima de sistemas de irrigação localizada ou por aspersão em culturas anuais. Dentre as características do módulo específico para a obtenção da lâmina econômica ótima, pode-se destacar as que seguem abaixo.

Para a entrada dos dados da cultura, o programa pode apresentar valores sugestivos dos coeficientes da cultura (k_c) e suas respectivas durações baseados em informações de Doorenbos e Kassan(1994). O programa permite ainda o uso de bombas de recalque acionadas com motores elétricos ou a óleo diesel, admitindo, no caso do uso de energia elétrica, a utilização de tarifas horosazonal ou noturna reduzida, conforme o grupo tarifário vigente para o sistema de irrigação em questão. Na determinação da lâmina econômica ótima, pode-se optar entre definir o valor do turno de rega ou deixar o programa calculá-lo. Pode-se ainda fornecer informações específicas do sistema de irrigação em questão para que o programa auxilie na determinação do valor da eficiência de

irrigação necessário aos cálculos. Pode-se também estabelecer a forma de obtenção da lâmina de irrigação, se baseada em algum valor porcentual da evapotranspiração da cultura de referência (ET_o), evapotranspiração real da cultura (ET_{Rc}) ou evapotranspiração potencial da cultura (ET_{Pc}).

Na apresentação dos resultados, além de mostrar o valor da lâmina econômica ótima de irrigação e o lucro por ela proporcionado, o programa mostra também o valor de reposição da evapotranspiração a que se refere tal lâmina, a fim de orientar, em termos gerais, o manejo da irrigação para sua obtenção. O programa mostra ainda gráficos e planilhas com informações técnicas e econômicas que foram utilizados no processo de obtenção da lâmina econômica ótima, permitindo sua impressão ou gravação para arquivo em disco. Pode-se ajustar uma equação que descreva a relação entre as lâminas de irrigação simuladas e os respectivos lucros esperados.

No caso de edição de análises previamente gravadas para a obtenção da lâmina econômica ótima, o programa mostra as análises gravadas existentes, exibindo, inicialmente, o resumo das mesmas, os quais consistem, basicamente, da lâmina econômica ótima e seu respectivo lucro.

4.1.5 Arquivos que Compõem o Programa

A Tabela 11 mostra os principais arquivos que fazem parte do programa e fornece uma breve descrição dos mesmos.

TABELA 11 – Principais Arquivos do Programa

| Arquivo | Descrição |
|--------------------------|--|
| TOBRUK.exe | Arquivo responsável pela execução do programa |
| HELP_TOBRUK.hlp | Arquivo de ajuda do programa |
| TOBRUK_CONFIG.dat | Arquivo de dados referente às opções de configuração |
| ARQPROJ.dat | Arquivo de dados que contém as análises salvas pelo usuário |
| TEMP_ACOMP.txt | Arquivo texto gerado durante a execução do programa a fim de permitir o acompanhamento posterior das operações numéricas |

Dos arquivos apresentados na Tabela 11, apenas os dois primeiros são indispensáveis ao programa. Se o arquivo **TOBRUK_CONFIG.dat** não for encontrado, ele é gerado durante o carregamento do programa.

Em sua execução, o programa gera arquivos temporários os quais são gravados no diretório corrente, como é o caso do **TEMP_ACOMP.txt**. Por este motivo, não se deve executar o programa diretamente a partir de CD-ROM ou quaisquer outros dispositivos que não tenham suporte adequado para gravação.

Os arquivos de dados meteorológicos, gerados a partir do programa ou por ele importados, possuem sempre o formato tipo texto (*.txt).

4.2 Exemplos de Aplicação

4.2.1 Introdução

O programa desenvolvido determina, basicamente, a lâmina de irrigação que trará melhor retorno econômico para um dado local, equipamento de irrigação e cultura anual. Dentre as aplicações possíveis deste resultado,

destacam-se a escolha do sistema de irrigação, da cultura a ser irrigada e da época de plantio que proporcionam melhor retorno econômico, e a definição de valores que viabilizam a operação do sistema de irrigação. A exemplificação de tais aplicações é feita nos itens apresentados a seguir.

4.2.2 Dados Considerados nos Exemplos

O local irrigado da propriedade analisada de Três Pontas-MG possui área de 30,55 ha. O solo sob irrigação apresentou os valores de umidade na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente respectivamente de 34% e 22%, em base peso, e massa específica global de $1,2 \text{ g/cm}^3$. Os dados de qualidade da água de irrigação são desconhecidos.

Utilizaram-se os dados meteorológicos obtidos da estação climatológica principal de Lavras-MG, situada no campus da Universidade Federal de Lavras (UFLA), referentes ao período de 1989 a 2000. Tais dados consistiam nos valores diários de precipitação, evaporação do tanque Classe A, velocidade média do vento e umidade relativa média. A bordadura do tanque Classe A é gramada e com um raio mínimo de 16 metros. Com estas informações, elaboraram-se os arquivos de dados climatológicos usando o próprio programa. Para a análise estatística efetuada pelo programa, estabeleceu-se o agrupamento dos dados em períodos de cinco dias.

A cultura utilizada nas simulações foi a do feijoeiro estudada por Felipe(1991), plantada no campus da UFLA em 4 de abril, cuja função água-produção (FAP) é apresentada na equação 52. Este autor menciona que a emergência ocorreu 11 dias após a semeadura (DAS) e que a duração observada dos estádios fenológicos até a colheita, ocorrida a partir de 95 DAS, foi de 20, 21, 40 e 14 dias, respectivamente para os estádios I, II, III e IV. Considerou-se a profundidade de plantio de 5 cm e a ocorrência da máxima profundidade efetiva

das raízes de 30 cm, aos 41 DAS. O autor procedeu a 10 irrigações com turnos de rega variáveis de 6 a 20 dias, baseadas na evaporação direta do tanque Classe A. Uma vez que o programa só admite valores fixos de turno de rega, o mesmo foi estabelecido em cinco dias, conforme projeto técnico elaborado para o pivô central da referida propriedade.

Nas simulações, foram considerados os valores dos coeficientes da cultura sugeridos por Doorenbos e Kassan(1994), os quais estão disponíveis na tela Dados da Cultura-I do programa. Em termos de configuração, estabeleceu-se o limite mínimo de umidade do solo, a ser observada pelo programa nos cálculos, equivalente ao valor no ponto de murcha permanente.

Utilizou-se o orçamento atualizado do sistema de irrigação por pivô central instalado na propriedade, conforme apresentado na Tabela 12. Nele, nota-se a utilização de motor a óleo diesel para o acionamento da bomba de irrigação. Para esta mesma área, elaborou-se ainda o projeto de um autopropelido tipo carretel enrolador, cujo orçamento é fornecido na Tabela 13. Ambos os sistemas aplicam lâmina líquida de 6,8 mm/dia. Para o projeto do pivô central, foi considerada uma eficiência de irrigação de 85%, resultando em uma lâmina bruta de 8,0 mm/dia. Com um tempo de trabalho diário de 24 horas, obteve-se uma vazão de 0,0283 m³/s (102 m³/h) e uma pressão de 1048,37 kPa (107 mca). Nestas condições, a bomba hidráulica do pivô possui um rendimento de 70% e exige uma potência líquida do motor de 42,4757 kW (57,75 CV). Para o carretel enrolador, considerou-se uma eficiência de irrigação de 75% e o bombeamento da lâmina bruta de 9,1 mm/dia, em um período de 20 horas. Assim, com a vazão de 0,0386 m³/s (139 m³/h), pressão de 1763,61 kPa (180 mca) e eficiência da bomba hidráulica de 75%, a potência líquida necessária ao motor deste sistema de irrigação é de 90,9090 kW (123,60 CV).

TABELA 12 - Orçamento Simplificado do Sistema de Irrigação por Pivô Central Utilizado nos Exemplos

| Item | Valor (R\$) |
|---|------------------------|
| Conjunto moto-bomba (motor diesel, bomba centrífuga e carreta) | 23.470,00 |
| Tubulação adutora e acessórios (tubos de aço zincado, válvulas e peças especiais) | 8.965,00 |
| Parte aérea do pivô (torre central, lances, tubos de descida, emissores e painel de controle) | 66.310,0 |
| Diversos (grupo gerador e cabos elétricos) | 16.812,00 |
| Total | 115.557,00 |

TABELA 13 - Orçamento Simplificado do Sistema de Irrigação por Autopropelido, Tipo Carretel Enrolador, Utilizado no Exemplo

| Item | Valor (R\$) |
|--|--------------------|
| Conjunto moto-bomba (motor diesel, bomba centrífuga e carreta) | 32.998,00 |
| Tubulação adutora e acessórios (tubos de aço zincado, válvulas, hidrantes e peças especiais) | 14.249,00 |
| Carretel enrolador e canhão de espera | 46.743,00 |
| Total | 93.990,00 |

Os custos de produção da cultura do feijoeiro foram baseados nos valores médios fornecidos por Du Pont(2000) para uma produtividade de 1600 kg/ha, conforme apresentado na Tabela 14. Esta produtividade é a que mais se aproxima do valor máximo possível de ser obtido pela função água-produção utilizada, de 1576 kg/ha. A receita bruta considerada foi R\$ 80,00/saca. Considerou-se ainda o valor do óleo diesel de R\$ 0,809/litro e o custo da mão-de-obra, exclusivamente para a operação do pivô, de R\$ 250,00/mês. Para o carretel enrolador, consideraram-se as despesas com mão-de-obra e trator, necessária à operação deste sistema, como sendo R\$ 500,00/mês. Arbitrou-se a taxa de juros anual em 12% e o tempo de utilização dos sistemas de irrigação em 210 dias (7 meses) por ano.

TABELA 14 – Valores Médios do Custo de Produção do Feijão para uma Produtividade de 1600kg/ha

| Item. | Valor. (R\$/ha)¹ |
|--|------------------------------------|
| Custo de implantação (gradagens, sementes e plantio) | 184,68 |
| Custos com adubação e defensivos | 439,76 |
| Custo de colheita e transporte da produção | 220,80 |
| Custos diversos. (administração, assistência técnica e impostos) | 192,00 |

¹nota: valores convertidos baseados na equivalência de US\$ 1,00 = R\$ 2,00.
Fonte: Du Pont(2000).

4.2.3 Exemplo de Determinação da Lâmina Econômica Ótima de Irrigação

Com os dados mencionados anteriormente, alimentou-se o programa, para a data de plantio de 4 de abril, e obteve-se a lâmina econômica ótima total de 282,99 mm considerando-se a limitação original da função água-produção em

283 mm. A lâmina assim encontrada compõe-se exclusivamente da irrigação, uma vez que a precipitação estimada para todo o período do ciclo da cultura foi nula. A lâmina econômica ótima de irrigação correspondeu a uma reposição de 93,03 % da ETo e propiciou um lucro de R\$ 16.103,32. Pelo programa, obteve-se a equação 102, que descreve 47 relações entre a lâmina de irrigação aplicada, para valores compreendidos entre 173 mm e 283 mm, e o respectivo lucro esperado.

$$LCE = -2,3718.LIA^2 + 1458,9003.LIA - 206804,96 \quad (r^2 = 0,99) \quad (102)$$

em que: LCE = lucro esperado, R\$;

LIA = lâmina total irrigação aplicada, mm.

Observa-se que a lâmina econômica ótima de irrigação obtida é praticamente a mesma definida para o limite superior de restrição da FAP, a qual foi informada ao programa, indicando que tal restrição provavelmente limita o valor da lâmina ótima. Executando-se novamente o programa, ignorando-se os limites da FAP, encontrou-se a lâmina econômica ótima de 302,34 mm que fornece um lucro de R\$ 17.468,38. Assim, caso experimentos comprovem a validade desta FAP para lâminas iguais ou superiores a 302,34 mm, dever-se-ia, teoricamente, adotar este valor para o manejo do sistema.

A máxima produção física da FAP utilizada é obtida com a lâmina de 313,5 mm. Substituindo este valor na equação 102, obtém-se o lucro de R\$ 17.454,44, o qual é 0,07% inferior ao máximo econômico, para um acréscimo de lâmina de 3,69% em relação à ótima econômica. Desta forma, em termos práticos, poder-se-ia adotar o manejo de irrigação para a obtenção da máxima produção física sem grandes prejuízos, caso se considere a FAP válida para esta situação.

O valor de reposição da lâmina econômica ótima, fornecido pelo programa, tem o objetivo de orientar, em termos gerais, a forma de manejo do sistema de irrigação para a obtenção da referida lâmina. No caso, para manejo a ser efetuado pelo tanque Classe A, pode-se utilizar a equação 103, que fornece o valor de reposição a ser observado para a obtenção da lâmina econômica ótima. Assim, por exemplo, tomando-se o valor médio do coeficiente do tanque Classe A como 0,75, para as condições consideradas, a lâmina econômica ótima, respeitando-se as restrições da FAP, é obtida com uma reposição de 69,77% da evaporação do tanque Classe A.

$$RTCA = RETo.kt \quad (103)$$

em que: RTCA = reposição do tanque Classe A que conduz à lâmina econômica ótima, decimal;

RETO = reposição da ETo para a obtenção da lâmina econômica ótima, decimal.

Embora seja uma ferramenta importante para o planejamento das operações de irrigação, as funções água-produção devem ser usadas com cuidado. Uma de suas limitações diz respeito à consideração somente da quantidade total de água aplicada ou consumida, conforme o modelo da FAP utilizado, desconsiderando a influência do comprimento do turno de rega na produção da cultura. Turnos de rega diferentes podem levar a diferentes níveis e variação de água no solo e, conseqüentemente, a estresses diferenciados para a cultura. Neste sentido, Bernardo(1989) menciona que uma maior produtividade pode ser geralmente obtida pelo aumento da freqüência de irrigação, gerada pela redução do turno de rega. Entretanto, considerando o caso de um sistema com manejo baseado em turno de rega diário, que mantém o teor de água do solo

próximo ao da capacidade de campo, ou o mesmo sistema sendo operado com turno de rega semanal, no qual ocorre um esgotamento, por exemplo, de até 60% da água facilmente disponível do solo, a produção final, utilizando-se simplesmente a mesma FAP, seria idêntica em ambos os casos se a quantidade total de água aplicada também o fosse, embora se esperasse, tecnicamente, que a cultura do primeiro caso produzisse mais que a do segundo. Por este motivo, a fim de minimizar os erros, deve-se sempre se ater ao turno de rega em que foi gerada a FAP utilizada.

4.2.4 Exemplo de Análise da Viabilidade Econômica do Plantio Irrigado

Uma situação relevante é definir o valor da receita bruta a partir do qual a irrigação se viabiliza. Com os dados do pivô central e considerações já mencionadas, executou-se o programa várias vezes, alterando-se apenas o valor de venda do feijão (receita bruta), e obteve-se o respectivo lucro ótimo, os quais são apresentados na Figura 11. Nesta, observa-se que o ponto de equivalência entre os custos e receitas (lucro nulo) é obtido para valores de R\$ 58,25/sc e R\$57,23/sc, quando se consideram, respectivamente, os limites ou não da FAP. Em outras palavras, no presente caso, somente com valores previstos a partir destes preços é que se deve proceder à irrigação.

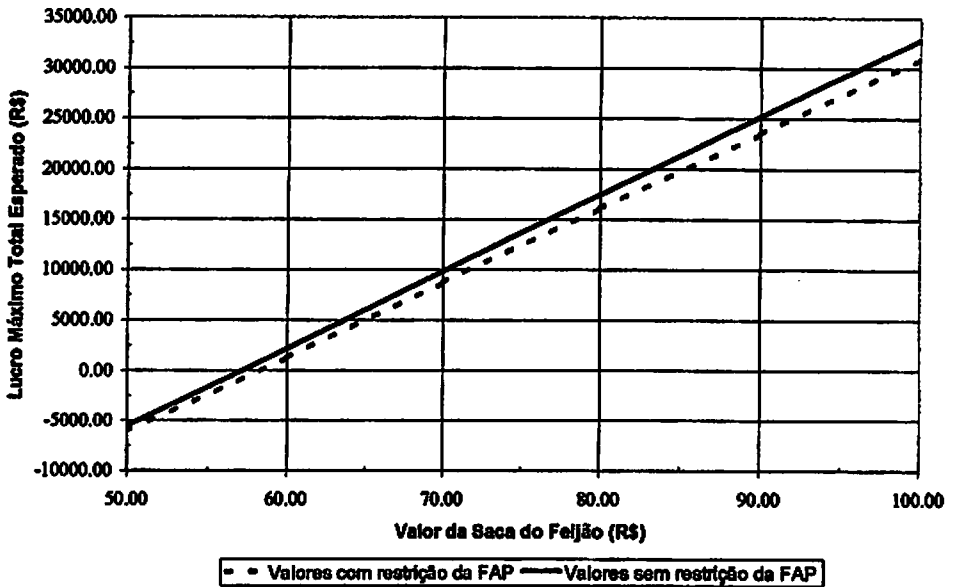


FIGURA 11 – Valores do Lucro Ótimo em Função do Preço da Saca do Feijão

Os valores de R\$ 58,25/sc e R\$ 57,23/sc referem-se, respectivamente, às lâminas de 282,99 mm e 302,34 mm, sendo que tais lâminas se mantêm inalteradas para valores variando entre R\$ 50,00/sc e R\$ 200,00/sc, conforme simulações efetuadas. Assim, nota-se que o valor da receita bruta (preço de venda do feijão) não tem influência sobre a determinação do valor da lâmina econômica ótima, para as considerações efetuadas. Isso se deve ao fato de que a lâmina ótima, na condição sem restrição da FAP, corresponde à lâmina máxima que o solo suporta, no volume de controle, com a reposição ótima sempre elevando o teor de umidade à capacidade de campo. Respeitando-se os limites da FAP, o valor encontrado da lâmina econômica ótima se mantém próximo ao limite superior desta restrição, para a mesma variação no preço da saca de feijão, indicando uma tendência a buscar o valor da lâmina sem a referida restrição.

A produtividade da cultura influencia diretamente a receita bruta obtida. No presente estudo, deve-se observar que a produtividade máxima da cultura cuja FAP foi utilizada nos exemplos, equação 52, é baixa quando comparada com a média das lavouras irrigadas de feijão, respectivamente de 1576 kg/ha e 2200 kg/ha, segundo Du Pont(2000). Com isso, é necessário ter um preço maior da saca do feijão para se obter um lucro nulo (ponto de equivalência entre custos e receita) com o uso da FAP ora utilizada, quando comparada com uma outra FAP que proporcione melhor produtividade, como, por exemplo, em torno do valor médio de 2200 kg/ha. Desta forma, pode-se dizer que a cultura utilizada no presente exemplo só é economicamente viável para valores de venda do feijão relativamente elevados, devendo ser substituída por outra de melhor produtividade no caso de menores valores de venda.

4.2.5 Exemplo de Determinação da Melhor Época de Plantio

A quantidade total de água consumida por uma cultura varia de acordo com a época de plantio, conforme demonstrou Costa(1991) para a obtenção da máxima produção.

Com base neste fato, pode-se procurar uma data de plantio que proporcione uma lâmina de irrigação tal que se obtenha um lucro maior que em outras datas. Para exemplificar esta operação, tomaram-se os dados do item 4.2.2 e a irrigação por pivô central. Como mencionado no item 4.2.3, a lâmina econômica ótima nestas condições é de 282,99 mm e refere-se à reposição de 93,03% da ETo do período, para uma data de semeadura em quatro de abril. A produção total assim obtida corresponde a 46237 kg. Com a utilização do programa desenvolvido, determinou-se a lâmina de irrigação e o respectivo lucro para plantios efetuados ao longo do mês de abril, conforme apresentado nas Figuras 12 e 13, estabelecendo a irrigação para reposição de 93,03% da ETo e a

produção total em 46237 kg. Convém mencionar que todos os resultados obtidos pelo programa, a partir dos dados fornecidos no item 4.2.2, referem-se exclusivamente à lâmina de irrigação, uma vez que a precipitação esperada durante todo o ciclo da cultura, plantada em qualquer data analisada ao longo do mês de abril, sempre foi nula.

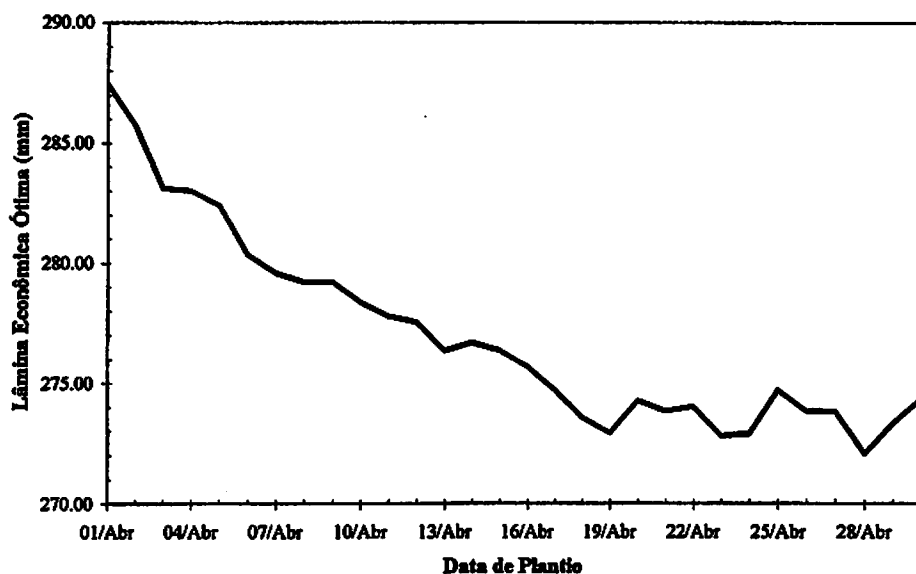


FIGURA 12 – Valores de Lâmina Econômica Ótima de Irrigação em Função da Data de Plantio do Feijoeiro Irrigado por Pivô Central

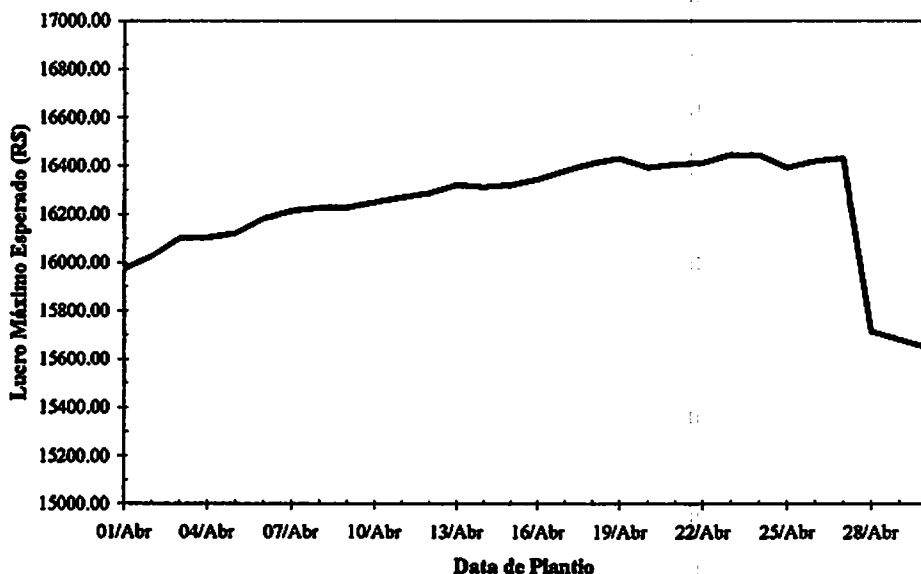


FIGURA 13 - Valores do Lucro Máximo Esperado em Função da Data de Plantio do Feijoeiro Irrigado por Pivô Central

Pela Figura 12, observa-se que a lâmina de irrigação tende a decrescer do início para o fim do mês. Considerando que a produção gerada pela cultura é a mesma em todas as datas de plantio mostradas na Figura 12, espera-se que, quanto menor for a lâmina de irrigação, menores sejam os custos que dependam diretamente dela, como energia e mão-de-obra, e, conseqüentemente, maior seja o lucro, como observado na Figura 13, com exceção dos três últimos dias do mês. Tal exceção se deve ao fato de que o plantio ocorrido até o dia 27 de abril, inclusive, leve a uma colheita em agosto, e posterior a esta data, em setembro. Com isso, como se considera um custo fixo mensal sempre presente durante o ciclo da cultura, avançando-se um mês a mais leva-se a um aumento dos custos de produção. Além disso, convém salientar que o programa considera que a receita bruta é obtida integralmente no final do mês de colheita em questão e que

ela é convertida, com taxa de juros mensal, para o valor presente da data de plantio. Assim, no presente caso, como se está considerando sempre uma mesma produção total, um mesmo preço da saca do feijão e um mesmo mês de plantio, uma colheita realizada em setembro propicia um valor presente da receita bruta menor que aquela realizada em agosto, e assim tem-se uma redução da receita bruta com plantio realizado nos três últimos dias do mês de abril. Estes dois fatos combinados, aumento dos custos e redução da receita bruta, explicam a queda saliente do lucro máximo esperado nos três últimos dias de abril, apresentado na Figura 13. Com relação à receita bruta, é uma prática relativamente comum o plantio precoce ou tardio buscando uma época de colheita em que se espera preços diferenciados de tal maneira que se eleve a receita bruta obtida, o que não está sendo considerado aqui por uma questão de simplificação. Com relação aos custos, poder-se-ia considerar uma redução nos mesmos nos períodos em que a cultura ocupa poucos dias no mês, a qual pode ser justificada por exemplo, com a exploração de uma outra cultura na mesma área dividindo com a primeira parte dos custos fixos de mão-de-obra, o que também não está sendo considerado aqui por uma questão de simplificação da análise.

Desta forma, de maneira geral, a melhor data de plantio refere-se àquela que apresenta a menor lâmina de irrigação comparada à econômica ótima da data de referência do dia 4. Assim, genericamente, para as condições arbitradas, espera-se que a receita seja maximizada com o plantio efetuado na segunda quinzena do mês de abril.

Embora o programa forneça subsídios para a estimativa da melhor época de plantio, resultados mais confiáveis deveriam ser obtidos a partir de funções água-produção, geradas por experimentos, que considerem a data de plantio como uma variável em sua expressão. Isto é necessário porque a duração do ciclo da cultura, e conseqüentemente o seu consumo de água, varia conforme a

data de plantio, como mencionado por Costa(1991), o que não é considerado neste tipo de análise pelo sistema computacional desenvolvido.

4.2.6 Exemplo de Seleção do Sistema de Irrigação de Melhor Retorno Econômico

Às vezes, tem-se a alternativa técnica de realizar a irrigação de uma mesma área com sistemas diferentes. No caso, é de particular interesse a escolha do sistema de irrigação mais adequado economicamente às condições específicas de produção da propriedade em questão. Uma maneira de efetuar esta análise é executar o sistema computacional com os dados dos sistemas de irrigação e escolher, então, aquele que fornece maior lucro com a lâmina econômica ótima de irrigação. Para exemplificar, considerou-se, para a área mencionada no item 4.2.2, a possibilidade de irrigação com o sistema autopropelido, tipo carretel enrolador, a fim de compará-lo, em termos de desempenho econômico, com o pivô central instalado e definir qual dos dois é atualmente o melhor para a área com as considerações assumidas.

Com os referidos dados, obteve-se, para o autopropelido irrigando o feijoeiro plantado em quatro de abril, a lâmina econômica ótima de 282,98 mm proporcionando um lucro de R\$ 11.291,94, para o valor considerado de R\$ 80,00/sc. Já para o pivô central, encontrou-se lucro ótimo de R\$ 16.103,32, para o mesmo valor de lâmina de irrigação, como apresentado no item 4.2.3. Em vista desses resultados, observa-se que o sistema de irrigação por pivô central apresenta melhor desempenho econômico que o autopropelido, sendo, portanto, economicamente mais adequado para a área, cultura, época e valores considerados.

5 CONCLUSÕES

Com base no presente trabalho, pode-se concluir que:

- 1) o sistema computacional desenvolvido é uma ferramenta que facilita a determinação da lâmina econômica ótima de sistemas de irrigação pressurizados, por parte de técnicos com noções básicas em agricultura irrigada, agilizando a obtenção de seu resultado;**
- 2) o sistema computacional pode ser utilizado para se obter rapidamente informações genéricas de como manejar o sistema de irrigação a fim de se obter o máximo lucro, bem como agilizar a obtenção de subsídios para a escolha econômica entre alternativas de datas de plantio, cultura a ser implantada e sistema de irrigação a ser instalado.**

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDULMUMIN, S. Irrigation Scheduling Model with Groundwater and Limited Rooting. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.115, n.6, 1989. p.938-953
- AGUIAR NETTO, A. O.; RODRIGUES, J. D.; PINHO, S. Z. de; NASCIMENTO JÚNIOR, N. A. do. Produtividade da Cultura da Batata (*solanum tuberosum ssp tuberosum*), Submetida a Diferentes Lâminas de Irrigação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27, 1998, Poços de Caldas. **Anais... Poços de Caldas: SBEA**, v.1, 1998. p.34-36
- ANDRADE, C. de L. T. de; COELHO, E. F.; COUTO, L.; LEMOS da SILVA, E. Parâmetros de Solo-Água para Engenharia de Irrigação e Ambiental. In: FARIA, M. A. de (coord). **Manejo de Irrigação**. Poços de Caldas: SBEA/UFLA, 1998. p.1-45
- ANDRADE JÚNIOR, A. S. de; RODRIGUES, B. H. N.; SOBRINHO, C. A. .; MELLO, F. B.; BASTOS, E. A.; CARDOSO, M. J.; RIBEIRO, V. Q. Manejo da Irrigação na Cultura da Melancia Através do Tanque Classe A. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 11, 1996, Campinas. **Anais... Campinas: ABID**, 1996. p.188-202
- ARAÚJO, W. F.; FERREIRA, L. G. Respostas do Amendoim a Diferentes Regimes Hídricos. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 11, 1996, Campinas. **Anais... Campinas: ABID**, 1996. p.232-243
- ARCE, R. A. B. **Otimização de um Projeto Hidroagrícola no Município de Guaiúba/SP Utilizando Programação Linear**. Piracicaba: ESALQ, 1990. 76p. (Dissertação - Mestrado em Agronomia)
- ARRUDA, F. B. Uso da Água na Produção Agrícola. In: SIMPÓSIO SOBRE O MANEJO DE ÁGUA NA AGRICULTURA, 1, 1987, Campinas. **Anais... Campinas: Fundação Cargill**, 1987. p.177-199
- AYRES, R. S.; WESTECOT, D. W. **A Qualidade da Água na Agricultura**. Tradução de H. R. Gheyi, J. F. de Medeiros, F. A. Damasceno. Capina

- Culturas à Água.** Botucatu: UNESP, 1994. 124p. (Dissertação - Doutorado em Agronomia)
- DACHS, J. N. W.** **Estatística Computacional: uma Introdução em Turbo Pascal.** Rio de Janeiro: LTC, 1988. 263p.
- DEAN, J. D.** Modeling Supplemental Irrigation Water Demand. **Journal of Irrigation and Drainage Division, New York**, v.106, n.1R4, p.285-297, 1980.
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O.** **Crop Water Requirements.** Rome: FAO, 1977. rev. 144p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 24)
- DOORENBOS, J; KASSAN, A. H.** **Efeitos da Água no Rendimento das Culturas.** Tradução de F. A. V. Damasceno e J. F. de Medeiros. Campina Grande: UFPB, 1994. 306p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 33)
- DORFMAN, R.** **Análise Econômica de Projetos de Irrigação e Drenagem: Curso.** In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 8, 1988, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ABID, 1988. p.219-302
- DU PONT** **Produtos Agrícolas. Dossiê Técnico sobre a Cultura do Feijão.** São Paulo, 2000. 60p.
- ENGLISH, M. J.** The Uncertainty of Crop Models in Irrigation Optimization. **Transactions of the ASAE, St. Joseph**, v.24, n.4, p.917-921, July/Aug. 1981.
- ENGLISH, M. J.** **Deficit Irrigation: Analytical Framework.** **Journal of Irrigation and Drainage Engineering, New York**, v.116, n.3, p.399-412, May/June 1990.
- FELIPE, M. de P.** **Efeitos de Diferentes Lâminas de Água e Épocas de Parcelamento da Adubação Nitrogenada na Cultura do Feijão (*Phaseolus vulgaris* L.).** Lavras: ESAL, 1991. 105p. (Dissertação – Mestrado em Agronomia)
- FERERES, E.** **Manejo del Riego en Finca.** In: **Curso Internacional de Ingeniería de Regados, 2**, Brasília: PRONI/ICI, 1988. 48p. (Curso Internacional de Especialização em Engenharia de Irrigação)

FOX JUNIOR, F. A.; SLACK, D. C. Irrigation Scheduling Decision Support. In: PROCEEDINGS OF INTERNATIONAL CONFERENCE, 5, 1994, Orlando. Anais... St. Joseph: ASAE, 1994. p.676-681.

FRIZZONE, J. A. Funções de Resposta do Feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) ao Uso de Nitrogênio e Lâmina de Irrigação. In: SIMPÓSIO SOBRE O MANEJO DE ÁGUA NA AGRICULTURA, 1, 1987, Campinas. Anais... Campinas: Fundação Cargill, 1987. p.123-133

FRIZZONE, J. A. Funções de Produção. In: FARIA, M. A. de (coord). Manejo de Irrigação. Poços de Caldas: SBEA/UFLA, 1998. p.86-116

GARRICK, J. C. Searching for Cheaper Water: Part I – The Cost of Water. Irrigation Journal, El Grove, v.48, n.5, p.32-34, Sept./Oct. 1998.

GONZAGA NETO, L. Produtividade e Competitividade Dependem do Aumento de Hectares Irrigados. Revista dos Agrônomos, São Paulo, v.3, n.1, p.14-20, mar. 2000

GUERRA, A. F. Manejo de Irrigação da Cevada sob Condições de Cerrado Visando o Potencial de Produção. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.29, n.7, p.1111-1118, Jul. 1994.

GUERRA, A. F. Manejo de Irrigação do Trigo para Obtenção de Máxima Produtividade na Região dos Cerrados. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.30, n.4, p.515-521, Abr. 1995.

GUERRA, H. O. C.; PINARE, A. G. V.; PIRES, E. L. et al. Irrigação por Pivô Central no Serviço de Produção de Sementes Básicas (Bebedouro II): Avaliação Econômica. In: Irrigação por Pivô Central no Serviço de Produção de Sementes Básicas (Bebedouro II): Avaliação Técnico-Econômica. Petrolina: EMBRAPA-CPATSA, 1988. 100p. (EMBRAPA-CPATSA, - Documento, 51)

HAAN, C. T. Statistical Methods in Hidrology. Ames: Iowa State University Press, 1977. 377p.

HECKEL, P. Software Amigável: técnicas de projeto de software para uma melhor interface com o usuário. Rio de Janeiro: Campus, 1993. 311p.

- HEERMANN, D. F.; SHULL, H. H. MCKELSON, R. H.** Center Pivot Design Capacities in Eastern Colorado. **Journal of Irrigation and Drainage Division**, New York, v.100, n.1R2, p.127-141, June 1974
- HEINEMANN, A. B.; SOUSA, S. A. V.; MEIRELES, E. J. L.; PERES, F. C.; DIAS, C. T. S.; FRIZZONE, J. A.** Modelo de Decisão para a Determinação da Lâmina Ótima de Água para a Cultura do Milho Doce na Região de Sete Lagoas. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**, 27, 1998, Poços de Caldas. Anais... Poços de Caldas: SBEA, 1998. v.2, p.4-8
- HOFFMANN, R.; SERRANO, O.; NEVES, E. M.; THAME, A. C. de M., ENGLER, J. J. de C.** Administração da Empresa Agrícola. 5.ed.ver.aum. São Paulo: Pioneira, 1987. 325p.
- HOWELL, T. A.; HILER, E. A.** Optimization of Water Use Efficiency under High Frequency Irrigation-I: Evapotranspiration and Yield Relationship. **Transactions of the ASAE**. St. Joseph, v.18, n.5, Sept./Oct. 1975. p.873-878
- HOWELL, T. A.; HILER, E. A.; REDDELL, D. L.** Optimization of Water Use Efficiency under High Frequency Irrigation – II. System Simulation and Dynamic Programming. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.18, n.5, p.879-887, Sept./Oct. 1975.
- IDIKE, F. I., LARSON, C. L.; SLACK, D.C.** Modeling Soil Moisture and Effects of Basin Tillage. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.25, n.5, p.1262-1267 Sept./Oct. 1982.
- JENSEN, M.E.; BURMAN, R.D.; ALLEN, R.G. (ed.)** Evapotranspiration and Irrigation Water Requiriments. New York : ASCE, 1990. 331p. (ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice, 70)
- JENSEN, M. E., WRIGHT, J. L.** Then Role of Evapotranspiration Models in Irrigation Scheduling. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.21, n.1, p.82-87, Jan./Feb.1978.
- KARMELI, D.; PERI, G.; TODES, M.** Irrigation Systems: Design and Operation. Cape Town: Oxford Univ. Press., 1985. 187p.
- KELLER, J.; BLIESNER, R. D.** Sprinkle and Trickle Irrigation. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990. 652p.

- KINCAID, D. C.; KRUSE, E. G.; DUKE, H. R.; CHAMPION, D. F. Evapotranspiration Computed to Estimate Leaching Fractions. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, v. 22, n. 2, p. 310-314, Mar/Apr. 1979.
- LEME, E. E. de A.; CHAUDHRY, F. H. Uso de Parâmetros Meteorológicos na Programação da Irrigação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 21, 1992, Santa Maria. *Anais...* Santa Maria: SBEA, v.2a, 1992. p.754-773
- LIMA, A da S. Programando em Visual Basic 4.0, Delphi 2.0 e SQL Windows 5.0. São Paulo: Érica, 1996. 402p.
- LOPES da SILVA, C. Modelagem da Precipitação Efetiva na Cultura do Milho. Viçosa: UFV, 1993. 82p. (Dissertação – Doutorado em Engenharia Agrícola)
- MAFFEO, B. Engenharia de Software e Especificação de Sistemas. Rio de Janeiro: Campus, 1992. 484p.
- MAROUELLI, W. A.; SILVA, L. C.; SILVA, H. E. R. Seleção de Sistemas de Irrigação para a Cultivo do Tomateiro Industrial. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27, 1998, Poços de Caldas. *Anais...* Poços de Caldas: SBEA, v.2, 1998. p.67-69
- MAROUELLI, W. A. Análise de Distribuição das Probabilidades de Chuva Visando o Manejo da Irrigação Suplementar. Viçosa: UFV, 1983. 123p. (Dissertação - Mestrado em Engenharia Agrícola)
- MARTIN, D. L.; WATTS, D.G.; GILLEY, J. R. Model and Production Function for Irrigation Management. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, New York, v.110, n.2, p.149-164, June 1984.
- MARTINS, D. P.; CARVALHO, A. J. C.; BERNARDO, S.; MONNERAT, P. H. Produtividade do Maracujazeiro Amarelo (*passiflora edulis sims* var. *flavicarpa deg.*) em Função das Lâminas Totais de Água. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27, 1998, Poços de Caldas. *Anais...* Poços de Caldas: SBEA, v.2, 1998. p.214-216
- MASSEY, F. J. The Kolmogorov-Smirnov Test for Goodness of Fit. *Journal of the American Statistical Association*. Washington, v.46, n.253, p.68-78, 1951.

- MATTOSO, M. J.; SILVA, W. L. C. **Modelo para Estimativa de Custos de Produção de Culturas Irrigadas: Caso do Milho por Pivô Central.** Parnaíba: EMBRAPA-CNPAL, 1989. 22p. (Circular Técnica, 1)
- MCGUINNESS, J. L.; PARMELE, L. H. **Maximum Potential Evapotranspiration Frequency-East Central U.S.** *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, New York, v.98, n.1R2, p.207-214, June 1972.
- MIYAMOTO, S. **A Model for Scheduling Pecan Irrigation with Microcomputers.** *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, v.27, n.2, p.456-463, Mar./Apr. 1984.
- MOTA, F. S. **Meteorologia Agrícola.** 7.ed. São Paulo: Nobel, 1989. 375p.
- NOGUEIRA, C. E. C. **Modelo Computacional para Dimensionamento de Sistemas de Irrigação por Aspersão Convencional.** Viçosa: UFV, 1993. 68p. (Dissertação – Mestrado em Engenharia Agrícola)
- OLIVEIRA, S. L.; SEDIYAMA, G. C.; BERNARDO, S.; SANS, L. M. A.; RESENDE, M. **Análise Econômica do Uso de Água e Nitrogênio em Milho Doce.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 22, 1993, Ilhéus. Anais... Ilhéus: SBEA, 1993. p.2249-2263
- OLIVEIRA, C. A. S.; MAROUELLI, W. A.; SANTOS, J. R. M.; BOITEUX, L. S. **Produção de Biomassa, Número de Escleróides e Severidade de Oídio em Cultivares de Ervilhas sob Diferentes Lâminas de Irrigação.** In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 11, 1996, Campinas. Anais... Campinas: ABID, 1996. p.217-231
- OMETTO, J. C. **Bioclimatologia Vegetal.** São Paulo: Agronômica Ceres, 1981. 440p.
- PEREIRA, L. S.; ALLEN, R. G. **Crop Water Requeriments.** In: LIER, N. V. (ed.) **CIGR: Handbook of Agricultural Engineering.** St. Joseph: ASAE, 1999. p.213-262. (Land and Water Engineering, 1)
- PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração.** Piracicaba: FEALQ, 1997. 183p.
- PEREIRA NETO, A. **Tarifa d'Água e Viabilidade de Projetos Públicos de Irrigação.** Viçosa: UFV, 1998. 143p. (Dissertação - Mestrado em Economia Rural)

- PRAJAMWONG, S.; MERKLEY, G. P.; ALLEN, R. G.** Decision Support Model for Irrigation Water Management. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, New York, v.123, n.2, p.106-113, 1997.
- PRUITT, W. O.; OETTINGEN, S. V.; MORGAN, D. L.** Central California Evapotranspiration Frequencies. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, New York, v.98, n.IR2 p.177-184, June 1972.
- REDDY, S. J.** Irrigation Scheduling Using ICSWAB Model. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.18, n.10, p.1121-1126, 1983.
- RENEDO, J. J. M.** Análise dos Perfis de Extração de Água pelo Tomateiro: Experimentação e Simulação. Viçosa: UFV, 1996. 84p. (Dissertação-Mestrado em Engenharia Agrícola)
- RUBENKING, N. J.** Programação em Delphi 3.0 para Leigos. São Paulo: Berkeley, 1998. 450p.
- SCALOPPI, E. J.** Metodologia para a Determinação de Funções de Produção da Água. *REVISTA ITEM - Irrigação e Tecnologia Moderna*. Brasília: ABID, 1983. p.31-33
- SCALOPPI, E. J.; COLOMBO, A.** Tendências Atuais em Tecnologia de Irrigação. In: **CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM**, 8, 1988, Florianópolis. Anais... Florianópolis: ABID, 1988. p.943-971
- SEDIYAMA, G. C.; CHANCELLOR, W. J.; BURKHART, T. H.; GROSS, J. R.** Simulação de Parâmetros Climáticos para a Época de Crescimento das Plantas. *Revista Ceres*, Viçosa: UFV, v. 25, n. 141, p. 455-466, 1978.
- SEDIYAMA, G. C.; PRUITT, W. O.; COSTA, J. M. da; BERNARDO, S.** Modelo para Computação da Irrigação Suplementar e do Número de Dias Trabalháveis com Máquinas Agrícolas na Produção da Soja. *Revista Ceres*. Viçosa: UFV, v.26, n.145, p.238-250, 1979.
- SOUSA, E. F. de** Modelo Computacional Aplicado ao Manejo e Planejamento de Irrigação. Viçosa: UFV, 1993. 64p. (Dissertação - Mestrado em Engenharia Agrícola)

- SOUSA, S. A. V.; FRIZZONE, J. A.; PERES, F. C.** Otimização da Irrigação para Diferentes Défices nas Lâminas de Água Aplicada às Culturas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 25, 1996, Bauru. Anais... Bauru: SBEA, 1996. CD-ROM
- SOUSA, V. F. de; COELHO, E. F.; FRIZZONE, J. A.; FOLEGATTI, M. V.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; OLIVEIRA, F. C.** Frequência de Irrigação por Gotejamento na Eficiência do Uso da Água no Meloeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27, 1998, Poços de Caldas. Anais... Poços de Caldas: SBEA, v.1, 1998: p.214-216.
- TEODORO, R. E. F.; FRIZZONE, J. A.; PEREIRA, G. T.** Níveis Ótimos de Irrigação e Adubação Nitrogenada para a Produção de forragem de Aveia (*Avena sativa L.*). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 21, 1992, Santa Maria. Anais... Santa Maria/RS: SBEA, 1992. p.929-937
- THOM, H. C. S.** A Note on the Gamma Distribution. *Monthly Weather Review*, Boston, v.86, n. 4, p.117-122, 1958.
- TOMAZELA, C.; SCALOPPI, E. J.** Considerações Técnicas e Econômicas dos Principais Sistemas Mecanizados de Irrigação por Aspersão. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 8, 1988, Florianópolis. Anais... Florianópolis: ABID, 1988. p.1233-1249
- TRACY, J. C.; MARINO, M. A.** Management Model for Control of On-Farm Irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, New York, v.115, n.6, p.954-972, 1989.
- TUBELIS, A.** A Chuva e a Produção Agrícola. São Paulo: Nobel, 1988. 85p.
- VAREJÃO SILVA, M. A.; REIS, A. C. S.** Agrometeorologia e Climatologia Tropicais. Brasília: ABEAS, 1988. 90p. (Curso de Especialização por Tutoria a Distância)
- VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R.** Meteorologia Básica e Aplicações. Viçosa: UFV, 1991. 449p.
- VILLALOBOS, F. J.; FERERES, E.** A Simulation Model for Irrigation Scheduling under Variable Rainfall. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, v.32, n.1, p.181-188, Jan./Feb.1989.

WINDSOR, J. S.; CHOW, V. T. Model for Farm Irrigation in Humid Areas. Journal of the Irrigation and Drainage Division, New York, v.97, n.IR3, p.369-385, Sept. 1971.

YARON, D. Estimation and Use of Water Production Functions in Crop. Journal of the Irrigation and Drainage Division, New York, v.97, n.IR2, p.291-303, June 1971.

YEVJEVICH, V. Probability and Statistics in Hidrology. Littleton: Water Resources Publications, 1982. 302p.

ZOCOLER, J. L.; FRIZZONE, J. A.; HERNANDEZ, F. B. T.; PEREIRA, A. S. Estimativa do Custo Anual de um Sistema de Irrigação por Aspersão Convencional em Diversas Configurações. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 25, 1996, Bauru. Anais... Bauru: SBEA, 1996. CD-ROM

ANEXOS

ANEXO A

| | Página |
|---|---------------|
| Manual de Utilização do Programa | 110 |

MANUAL DE UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA

1 ORIENTAÇÃO GERAL PARA O USUÁRIO

Recomenda-se, para uma melhor exibição do programa, que a tela do computador seja configurada para resolução de 800 x 600 pixels.

Na entrada dos dados, o usuário deverá separar a parte decimal da inteira por meio de ponto e não por vírgula, não devendo, entretanto, proceder a qualquer separação de milhar, seja por ponto ou por vírgula.

Ao mostrar os resultados, o programa considera que a separação da parte decimal é feita com ponto e que a separação de milhar é feita com vírgula. Caso a configuração atual do Windows® não siga este padrão, o programa o estabelecerá automaticamente durante a sua execução.

Caso o usuário tenha dúvidas sobre a utilização do programa no decorrer de seu uso, ele pode ativar a ajuda on-line, a qualquer momento, pressionando a tecla F1.

Em termos gerais, deve-se seguir os quatro passos abaixo ao se usar o programa, os quais serão detalhados posteriormente.

1º) Obtenha os dados de precipitação relativos ao local de instalação do sistema de irrigação e gere um arquivo com os mesmos, de tal forma que o programa seja capaz de compreendê-lo;

2º) Obtenha os dados relacionados à evapotranspiração da cultura de referência (ET_o) para a área do sistema de irrigação em questão e agrupe-os em um arquivo de forma que o programa seja capaz de compreendê-lo;

3º) Estabeleça as configurações de interesse para o cálculo da lâmina econômica ótima por meio do menu ou botão de atalho Configurações;

4º) Proceda à determinação da lâmina econômica ótima propriamente dita, seja pela entrada de novos dados técnico-econômicos (sistema de irrigação e/ou cultura novos), seja pela edição de alguma análise previamente gravada.

2 DADOS NECESSÁRIOS AO PROGRAMA

2.1 Dados de Precipitação

Necessita-se dos dados de uma série histórica da precipitação local, em forma mensal ou diária, dispostos em um arquivo texto, segundo padrões preestabelecidos apresentados no item 3. O formato deste arquivo pode ser criado a partir do editor existente no próprio programa ou por meio de outro editor qualquer capaz de gerar arquivos do tipo texto como o bloco de notas do Windows®.

2.2 Dados de Evapotranspiração

Para a determinação da lâmina econômica ótima, o usuário precisa fornecer dados relativos a evapotranspiração da cultura de referência (ET_o) do local irrigado. Para isso, o programa apresenta várias alternativas. A primeira é fornecer diretamente os dados de ET_o, já calculados, ao programa. Para as outras, necessita-se de informações climáticas locais que possibilite o cálculo da ET_o por algum método apresentado na Tabela 10. O arquivo que contém tais dados pode ser elaborado a partir do programa ou por outro editor qualquer de arquivos do tipo texto desde que siga a formatação apresentada no item 3.

2.3 Dados da Cultura

Basicamente, devem ser fornecidos ao programa a data de plantio, data de emergência, data que ocorre a máxima profundidade efetiva das raízes, profundidade de plantio, valores dos coeficientes da cultura (k_c) com a respectiva duração, fator de esgotamento de água no solo (fator f) e função água-produção na forma quadrática.

2.4 Dados do Local da Irrigação

O usuário deve fornecer os seguintes dados do solo: capacidade de campo, ponto de murcha permanente e massa específica global. Deve-se informar ainda o valor da umidade do solo na data de plantio.

Caso se disponha de dados sobre a condutividade elétrica da água de irrigação e do extrato saturado, o usuário poderá fornecê-los ao programa.

2.5 Dados do Sistema de Irrigação

Devem ser fornecidas informações que caracterizam o sistema de irrigação, a saber: tipo do sistema, lâmina bruta de projeto, eficiência de irrigação, tempo disponível para o trabalho diário e número médio de dias de trabalho por ano.

No caso de irrigação localizada, deve-se fornecer ainda os valores do diâmetro do bulbo molhado, coeficiente de uniformidade, espaçamento e área sombreada pela cultura adulta. Caso se disponha do coeficiente de variação de fabricação dos emissores, número de emissores por planta e vazão média e mínima dos mesmos no sistema, pode-se fornecer tais informações ao programa.

Em sistemas de irrigação por aspersão, facultativamente, pode-se fornecer ao programa a pressão média de operação do aspersor, eficiência de condução de água, coeficiente de uniformidade do sistema e velocidade média do vento.

2.6 Dados Econômicos

Deve-se fornecer ao programa dados econômicos relativos ao sistema de irrigação e à cultura. Estes dizem respeito ao custo de aquisição atualizado dos componentes do sistema de irrigação, valor de venda da produção, taxa de juros anual, custos da mão de obra, de fertilizantes e defensivos, da água, de colheita, secagem e transporte e da energia de bombeamento.

Pode-se fornecer ainda, ao programa, informações relativas à vida útil, ao custo médio de manutenção e valor de resgate dos componentes do sistema de irrigação e ao custo de aplicação dos fertilizantes e defensivos com a respectiva data de aplicação.

3 FORMATAÇÃO DO ARQUIVO DE DADOS NECESSÁRIOS

3.1 Informações Gerais Sobre os Arquivos de Dados

Os dados de precipitação e evapotranspiração devem ser fornecidos em arquivos que possuem uma estrutura predefinida para sua devida identificação pelo programa.

Todos os arquivos de dados deverão ser do tipo texto. Para isso, poderá ser usado qualquer editor de texto ou planilha eletrônica para a editoração dos dados, tomando-se o cuidado de salvá-lo com o formato tipo texto. Aconselha-se

o uso do bloco de notas do Windows®, uma vez que seus arquivos são do formato tipo texto ('.txt'). Caso se exportem dados do Excel®, por exemplo, o arquivo deverá ser salvo como tipo texto com tabulações e não tipo texto com espaços.

Em todos os arquivos, os valores que não forem unidades inteiras deverão ter a vírgula substituída pelo ponto para a separação da parte fracionária da inteira. Assim, por exemplo, uma temperatura de vinte e três graus e meio deverá ser representada por 23.5 e não por 23,5. Os dados também não deverão conter a sua unidade. No exemplo anterior, deverá ser colocado somente o número 23.5, e não 23.5C ou 23.5°C. Como já mencionado para a entrada de dados, não deverá haver qualquer separação de milhar nos dados dos arquivos. Dentro do arquivo, os dados deverão ser separados somente com espaços, e não com vírgulas ou qualquer outro símbolo gráfico.

Em todos os arquivos de dados diários, é necessário fornecer o dia juliano (DJ) do respectivo dado, o qual se refere aos dias do ano numerados ordenadamente, sendo DJ = 1 para 1º de janeiro e DJ = 365 para 31 de dezembro. Os dados de 29 de fevereiro dos anos bissextos devem ser desconsiderados.

Na confecção do arquivo, não deve haver separação de quaisquer dados com linhas em branco, ou seja, os dados devem ser dispostos continuamente. Assim, por exemplo, após DJ = 365, começa-se um novo ano com DJ = 1 na linha seguinte. O número do DJ deverá ser do tipo inteiro, sem casas decimais. Nos arquivos de dados, deve-se fornecer os valores sempre ordenados de 1º de janeiro a 31 de dezembro, sendo que, se ao longo de um ano houver alguma falha (ausência de dado), o mesmo deverá ter seu respectivo dado omitido da seqüência.

Para evitar erros de processamento, não deverão existir linhas em branco após as linhas de dados meteorológicos. Ou seja, o arquivo não deverá finalizar

com linhas em branco e sim com dados meteorológicos. Se isso não for observado, o programa será interrompido abruptamente durante a leitura deste arquivo e se fechará.

Caso o usuário utilize o programa para a confecção dos arquivos de dados meteorológicos, os mesmos já ficam com formato específico para uso pelo próprio programa, dispensando maiores cuidados. Apenas na elaboração destes arquivos fora do programa é que o usuário deve se ater às estruturas apresentadas nos itens 3.2 e 3.3.

3.2 Formatação do Arquivo de Dados de Precipitação

O programa admite dados de precipitação na forma diária ou mensal. Em cada caso, tem-se um formato específico de arquivo descrito a seguir.

Caso o arquivo seja com dados DIÁRIOS, deverá ter a seguinte formatação:

- 1ª linha: identificação do processo: [chuva];
- 2ª linha: identificação do tipo de dados: [diária];
- 3ª linha: observações gerais;
- 4ª linha: identificação (local e data, por exemplo);
- 5ª linha: observações diversas;
- 6ª linha: identificação dos anos das séries de dados;
- 7ª linha: cabeçalho: DJ precipitação(mm) e
- 8ª linha e seguintes: dia juliano e seu respectivo valor de precipitação.

Caso o arquivo seja com dados MENSAIS, deverá ter a seguinte formatação:

- 1ª linha: identificação do processo: [chuva];
- 2ª linha: identificação do tipo de dados: [mensal];

3ª linha: observações gerais;

4ª linha: identificação (local e data, por exemplo);

5ª linha: observações diversas;

6ª linha: cabeçalho: ANO JAN FEV MAR ABR MAI JUN ... DEZ e

7ª linha e seguintes: ano e o respectivo dado mensal de precipitação.

Exemplo: Arquivo de nome RAIN.txt com formato:

[chuva]

[mensal]

Dados de precipitação mensal

Fazenda Terra Seca, Município de São Pedro da Misericórdia/CE, 10/02/99

Exemplo de arquivo de dados de precipitação mensal

| ANO | JAN | FEV | MAR | ABR | MAI | JUN | JUL | AGO | SET | OUT | NOV | DEZ |
|------|------|-----|------|-----|-----|------|------|------|------|------|-----|-----|
| 1984 | 12.3 | 6.2 | 0 | 2.2 | 3.5 | 51.5 | 85.2 | 54.2 | 28.1 | 2.1 | 0.5 | 0 |
| 1985 | 5.2 | 0 | 12.3 | 2.9 | 8.6 | 32.5 | 51.2 | 29.6 | 71.2 | 5.3 | 1.5 | 0 |
| ... | | | | | | | | | | | | |
| 1996 | 0 | 0 | 0 | 5.6 | 9.5 | 62.3 | 87.3 | 16.3 | 57.9 | 12.6 | 0 | 0 |

3.3 Formatação do Arquivo de Dados de Evapotranspiração

3.3.1 Considerações Gerais

Na formatação do arquivo de dados de ETo, é necessário saber qual método de cálculo será empregado, o qual, muitas vezes, é função dos dados disponíveis.

Independente do método de cálculo, apresentado na Tabela 10, as quatro primeiras linhas não serão consideradas nos cálculos propriamente ditos, devendo ser preenchidas com dados de identificação (local e data, por exemplo). Com exceção da primeira linha, que serve para identificar o processo de cálculo

escolhido, as outras três não são de preenchimento obrigatório, podendo ser deixadas em branco.

Quando for necessária a velocidade do vento a dois metros de altura do solo (métodos FAO-24 da Radiação, Penman e Penman-Monteith) e os dados originais se referirem a outro valor de altura, os mesmos devem ser convertidos por meio da equação:

$$V_2 = V_z \left(\frac{2}{Z} \right)^{0.2} \quad (A1)$$

em que: V_2 = velocidade do vento a 2 metros de altura;

V_z = velocidade do vento a uma altura de Z metros.

3.3.2 Arquivo Padrão de Thornthwaite

Para o processamento dos dados pelo método de Thornthwaite, necessita-se da latitude do local e dos dados de temperatura média mensal dispostos no arquivo da seguinte forma:

1ª linha: identificação do processo de cálculo: [Thornthwaite]

2ª linha: observações gerais

3ª linha: identificação (local e data, por exemplo)

4ª linha: outras observações

5ª linha: latitude do local (em grau, minuto e segundo)

6ª linha: cabeçalho: ANO Jan Feb Mar Abr Mai Jun Jul Ago Set Out Nov Dez

7ª linha e seguintes: dados do ano com temperaturas médias mensais na respectiva ordem.

Exemplo:

[Thornthwaite]

Dados Climáticos para Cálculo da ETo por Thornthwaite

Fazenda Iguaporé, Município de São Sebastião do Paraíso/MG, 10/02/1999

Exemplo de arquivo

20.5400

| ANO | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1994 | 23.1 | 22.1 | 19.5 | 22.5 | 21.3 | 19.5 | 18.6 | 20.3 | 22.3 | 25.2 | 24.6 | 24.1 |
| 1995 | 22.9 | 23.4 | 20.6 | 21.9 | 22.1 | 20.4 | 18.9 | 20.1 | 21.9 | 24.5 | 24.3 | 24.2 |
| 1996 | 22.8 | 22.9 | 20.5 | 22.2 | 22.3 | 19.9 | 18.5 | 20.1 | 21.8 | 24.9 | 23.9 | 23.8 |
| 1997 | 23.2 | 22.9 | 20.2 | 22.3 | 22.2 | 19.8 | 18.8 | 20.0 | 21.9 | 24.8 | 23.8 | 23.9 |

3.3.3 Arquivo Padrão do Método FAO-24 da Radiação

Para o processamento dos dados para o cálculo da evapotranspiração por este método, necessita-se dos seguintes dados: latitude e altitude do local, dados diários de temperatura média, em °C, duração da insolação real, em h/dia, umidade relativa média, em %, e velocidade média do vento diurno a dois metros de altura, em m/s. Os dados devem ser dispostos no arquivo da seguinte forma:

1ª linha: identificação do método de cálculo: [FAO]

2ª linha: observações gerais

3ª linha: identificação (local e data, por exemplo)

4ª linha: outras observações

5ª linha: latitude do local (em grau, minuto e segundo)

6ª linha: altitude do local (em metros)

7ª linha: identificação dos anos das séries de dados

8ª linha: cabeçalho: DJ TM n UR V2

9ª linha e seguintes: dados diários, separados por espaço, do dia juliano, temperatura média diária em °C (TM), número de horas de insolação real diária (n), umidade relativa média diária em porcentagem (UR) e velocidade média do vento diurno a dois metros de altura, em m/s, (V2).

Exemplo:

[FAO]

Dados climáticos para cálculo da ETo pelo método da radiação

Fazenda Bom Verde, Município de São Sebastião do Paraíso/MG, 22/01/2001

Exemplo de arquivo

20.5400

900.0

1994 1995 1996 1997 1998

| ND | TM | n | UR | V2 |
|-----|------|-------|------|-----|
| 1 | 20.1 | 10.32 | 73.2 | 4.1 |
| 2 | 20.9 | 8.40 | 80.1 | 3.1 |
| ... | | | | |
| 365 | 19.9 | 10.22 | 75.8 | 2.8 |
| 1 | 19.8 | 9.42 | 76.4 | 2.3 |
| ... | | | | |

3.3.4 Arquivo Padrão de Penman

Para o processamento dos dados para o cálculo da evapotranspiração por este método, necessita-se dos seguintes dados: latitude e altitude do local, dados diários de temperatura média, em °C, duração da insolação real, em h/dia, umidade relativa média, em %, e velocidade média do vento a dois metros de altura, em m/s. Os dados devem ser dispostos no arquivo da seguinte forma:

1ª linha: identificação do método de cálculo: [Penman]

- 2ª linha: observações gerais
- 3ª linha: identificação (local e data, por exemplo)
- 4ª linha: outras observações
- 5ª linha: latitude do local (em grau, minuto e segundo)
- 6ª linha: altitude do local (em metros)
- 7ª linha: identificação dos anos das séries de dados
- 8ª linha: cabeçalho: DJ TM n UR V2
- 9ª linha e seguintes: dados diários separados por espaço do dia juliano, temperatura média diária em °C (TM), número de horas de insolação real diária (n), umidade relativa média diária em percentagem (UR) e velocidade média do vento a dois metros de altura, em m/s, (V2).

3.3.5 Arquivo Padrão de Penman-Monteith

Para o processamento dos dados para o cálculo da evapotranspiração por este método, necessita-se dos seguintes dados: latitude e altitude do local, dados diários de temperatura máxima, mínima e média, em °C, duração da insolação real, em h/dia, umidade relativa média, em %, e velocidade média do vento a dois metros de altura, em m/s. Os dados devem ser dispostos no arquivo da seguinte forma:

- 1ª linha: identificação do método de cálculo: [Monteith]
- 2ª linha: observações gerais
- 3ª linha: identificação (local e data, por exemplo)
- 4ª linha: outras observações
- 5ª linha: latitude do local (em grau, minuto e segundo)
- 6ª linha: altitude do local (em metros)

7ª linha: identificação dos anos das séries de dados

8ª linha: cabeçalho: DJ TMN TMX TMD n UR V2

9ª linha e seguintes: dados diários separados por espaço do dia juliano, temperatura mínima (TMN), máxima (TMX) e média (TMD) diária em °C, número de horas de insolação real diária (n), umidade relativa média diária em porcentagem (UR) e velocidade média do vento a dois metros de altura, em m/s, (V2).

3.3.6 Arquivo Padrão do Tanque Classe A

Para o processamento dos dados pelo método do Tanque Classe A, necessita-se dos seguintes dados: umidade relativa média do período, em porcentagem; velocidade média do vento a 2m de altura, em km/dia ou m/s; informações sobre o meio em que está instalado o tanque; e dados diários sobre a evaporação média do tanque, em mm/dia.

Os dados sobre o meio que circunda o tanque dizem respeito ao tipo de bordadura, se gramado ou solo nu, bem como a menor distância do centro do tanque a este limite de bordadura.

Para a elaboração do arquivo de entrada, os dados devem ser dispostos da seguinte maneira:

1ª linha: identificação: [tanque]

2ª linha: observações gerais

3ª linha: identificação (local e data, por exemplo)

4ª linha: outras observações

5ª linha: informações sobre o tipo de bordadura, com a expressão entre colchetes e sem acento: [grama] ou [solo_nu]

6ª linha: distância mínima do centro do tanque ao limite de bordadura, em metros

7ª linha: unidade de leitura da velocidade do vento: 1 (para km/dia) ou 2 (para m/s)

8ª linha: identificação dos anos das séries de dados

9ª linha: cabeçalho: DJ EVT UR V

10ª linha e seguintes: dados seqüenciais diários separados por espaço de dia juliano; evaporação do tanque (EVT), em mm/dia; umidade relativa (UR), em %; e velocidade média do vento no período (V), em km/dia ou m/s, conforme especificado na 7ª linha.

3.3.7 Arquivo Padrão de Blaney-Criddle

Para o processamento dos dados pelo método de Blaney-Criddle, necessita-se da latitude do local e dos dados de temperatura média mensal, dispostos em arquivo da seguinte forma:

1ª linha: identificação do processo de cálculo: [Criddle]

2ª linha: observações gerais

3ª linha: identificação (local e data, por exemplo)

4ª linha: outras observações

5ª linha: latitude do local (em grau, minuto e segundo)

6ª linha: cabeçalho: ANO Jan Fev Mar Abr Mai Jun Jul Ago Set Out Nov Dez

7ª linha e seguintes: dados do ano com temperaturas médias mensais na respectiva ordem.

3.3.8 Arquivo Padrão Final

Pode-se fornecer ao programa valores de evapotranspiração diária da cultura de referência calculados por algum outro processo não apresentado na Tabela 10, os quais devem ser agrupados seguindo a formatação:

1ª linha: identificação do processo: [Final]

2ª linha: observações gerais

3ª linha: identificação (local e data, por exemplo)

4ª linha: outras observações

5ª linha: primeiro cabeçalho: ND ANOS

6ª linha: segundo cabeçalho: seqüência dos anos da série

7ª linha e seguintes: dados do dia juliano numerados de 1 a 365 e ETo em mm/dia

4 ORGANIZAÇÃO DAS TELAS PARA DETERMINAÇÃO DA LÂMINA ECONÔMICA

O programa é formado por uma série de telas, dispostas seqüencialmente, que visa facilitar o fornecimento de dados e a compreensão dos resultados.

A principal seqüência de telas diz respeito à entrada de dados para a determinação da lâmina ótima e obedece à disposição mostrada na Figura 1A. Seu acesso é efetuado por meio da opção Projeto do menu Arquivo ou botão de atalho Nova Análise ou Análise Existente.

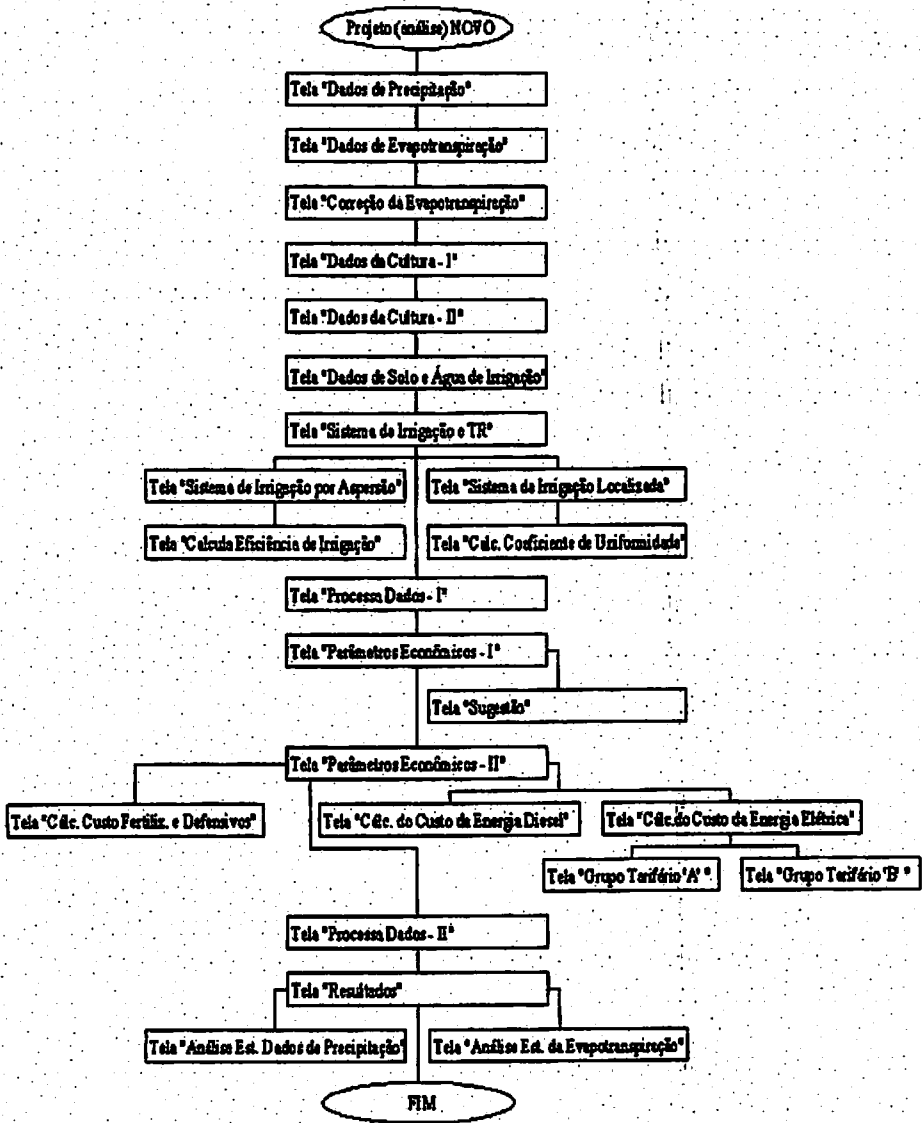


FIGURA 1A - Organização da Sequência de Telas da Determinação da Lâmina Econômica

5 DESCRIÇÃO DOS MENUS E TELAS PRINCIPAIS

5.1 Menu Arquivo, Opção Projeto Novo

Como já mencionado, esta opção tem como entrada dados técnico-econômicos do sistema de irrigação e cultura irrigada, sendo seu objetivo a obtenção do valor da lâmina econômica ótima de irrigação. Para isso, utilizam-se as telas apresentadas no item anterior e descritas a seguir.

5.1.1 Tela Dados de Precipitação

Esta tela solicita o nome do arquivo que contém os dados de precipitação a serem considerados nos cálculos, permitindo também editar o arquivo selecionado para eventual correção ou verificação.

5.1.2 Tela Dados de Evapotranspiração

Similar à tela Dados de Precipitação, permite a seleção do arquivo de dados relativos à evapotranspiração a ser usado no cálculo da evapotranspiração.

5.1.3 Tela Correção da Evapotranspiração

Permite proceder a uma eventual correção dos valores calculados de evapotranspiração por equações elementares do tipo linear, logarítmica, exponencial ou potencial. É uma forma simples de ajustar o método de cálculo da evapotranspiração às condições locais.

5.1.4 Tela Dados da Cultura I

Por esta tela, o programa solicita informações básicas sobre a cultura, a saber: nome, data de plantio, número de dias decorridos do plantio até a emergência e até a máxima profundidade das raízes, valores do coeficiente da cultura (kc) com a respectiva duração, e ainda a área plantada a ser irrigada.

Pela seleção de uma cultura na caixa adequada desta tela, o programa disponibiliza as informações relativas aos seus valores de kc e respectiva duração sugeridas por Doorenbos e Kassan(1994).

5.1.5 Tela Dados da Cultura II

Esta tela solicita informações complementares que auxiliarão no cálculo da lâmina econômica ótima de irrigação, consistindo, basicamente, nos dados da cultura relacionados ao solo e a sua produtividade, a saber: profundidade de plantio, profundidade efetiva do sistema radicular da cultura adulta, fator de esgotamento de água do solo e função água-produção.

5.1.6 Tela Dados de Solo e Água de Irrigação

As informações a serem fornecidas por esta tela dizem respeito às características físicas do solo e à qualidade da água de irrigação, a saber: capacidade de campo, ponto de murcha permanente, massa específica global, umidade do solo na data de plantio e condutividade elétrica da água.

5.1.7 Tela Sistema de Irrigação e Turno de Rega

Através desta tela, o usuário deve informar ao programa o tipo de sistema de irrigação pressurizada e suas características de operação. Inicialmente, define-se se a irrigação é por aspersão ou localizada. A lâmina bruta de projeto deve ser também informada ao programa, bem como o tempo de operação máximo diário e o número médio de dias de trabalho por ano. Com relação à definição do turno de rega, o usuário pode optar entre estabelecê-lo ou deixar que o programa o faça.

5.1.8 Tela Sistema de Irrigação por Aspersão

Por meio desta tela, o usuário deve informar o tipo do sistema de irrigação por aspersão instalado, se convencional, pivô central ou autopropelido. Deve-se fornecer ainda a eficiência de irrigação, podendo, para isso, solicitar sugestão de valor ou calculá-la com o auxílio do programa.

Caso o usuário opte pelo cálculo da eficiência de irrigação, o programa apresenta nova tela, através da qual são solicitadas informações de pressão de operação e diâmetro do bocal do aspersor utilizado, bem como informações sobre o valor da eficiência de condução de água, coeficiente de uniformidade e velocidade média do vento. No caso do coeficiente de uniformidade, o usuário pode obter um valor sugestivo informando ao programa se o valor econômico da cultura é baixo ou alto.

5.1.9 Tela Sistema de Irrigação Localizada

Esta tela solicita informações técnicas básicas sobre o sistema de irrigação localizada. Deve-se informar o espaçamento da cultura, a área média

sombreada por planta adulta e o diâmetro do bulbo molhado, bem como definir as equações a serem usadas no cálculo do coeficiente de localização e a forma de considerá-las neste cálculo. Deve-se definir ainda o porte da cultura, a eficiência de aplicação de água e o coeficiente de uniformidade do sistema. No caso da eficiência de aplicação de água e do coeficiente de uniformidade, o programa pode auxiliar o usuário mostrando valores sugestivos. Além disso, para o coeficiente de uniformidade, o programa também oferece a opção de calculá-lo. Neste caso, uma nova tela é apresentada para que o usuário forneça os dados do coeficiente de variação de fabricação, número de emissores por planta, vazão média e a mínima observadas nos emissores do sistema de irrigação em questão. No caso do coeficiente de variação de fabricação, o usuário tem a seu dispor valores sugeridos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)¹.

5.1.10 Tela Processa Dados I

Por esta tela, efetua-se a análise estatística dos dados de precipitação e evapotranspiração. O acompanhamento destas operações pode ser feito alterando-se as configurações da aba Acompanhamento no menu ou botão de atalho Configurações.

Ao apresentar esta tela, o programa mostra o valor do turno de rega calculado e compara-o com aquele estabelecido pelo usuário, se for o caso. Desta forma, caso o primeiro seja menor que o segundo, o programa alerta o usuário do ocorrido e pergunta a ele se deseja manter sua proposição inicial.

¹ ABNT(Associação Brasileira de Normas Técnicas). Requisitos Mínimos para a Elaboração de Projetos de Sistemas de Irrigação Localizada: Projeto de Norma 12:02.08-022. Rio de Janeiro, maio 1986. 8p.

5.1.11 Tela Parâmetros Econômicos I

Esta tela solicita a entrada dos parâmetros básicos para a determinação do custo fixo do equipamento de irrigação.

Para cada grupo de componentes do sistema, são solicitados seu valor de aquisição atualizado, vida útil e valores de resgate e de manutenção, sendo que estes últimos devem ser informados em termos do percentual do custo de aquisição do equipamento novo.

O programa pode mostrar valores sugestivos dos itens relativos à vida útil e valor de resgate ou de manutenção, por meio do botão Sugerir, o qual ativa uma tela específica para esta operação.

Pode-se estabelecer ainda valores para a administração direta e mão-de-obra fixa, seguro do equipamento de irrigação e custos fixos diversos, referentes a valores do custo fixo que não foram considerados anteriormente.

O único campo de preenchimento obrigatório da tela Parâmetros Econômicos I é aquele referente a Motor e Acessórios, em que se define o tipo de energia, se elétrica ou a óleo diesel.

5.1.12 Tela Parâmetros Econômicos II

5.1.12.1 Características Principais

Por esta tela são solicitadas informações sobre a receita e outros custos que vêm complementar a tela Parâmetros Econômicos I.

Assim, deve-se fornecer o custo de implantação da cultura, receita unitária bruta, taxa de juros anual, custo diário da mão-de-obra temporária, eventualmente necessária para realizar a irrigação, custo de fertilizantes e defensivos por unidade de produção ou área, custo da água, custo de colheita,

secagem e transporte, e ainda o custo da energia por unidade de volume de água bombeada. O programa também permite a inclusão de outros custos, não previstos acima, que podem ser informados nos campos Custo Mensal e Custos Despendidos ao Longo do Ciclo da Cultura.

Para auxiliar a determinação do custo de fertilizantes e defensivos, o programa disponibiliza uma nova tela, por meio do botão **Calcula**, a qual solicita informações técnico-econômicas e executa o cálculo deste custo. Tais informações envolvem os custos unitários destes insumos e o de suas aplicações, bem como suas respectivas datas de aplicação.

Para a cobrança da água, o programa permite configurar se a mesma é feita anualmente ou mensalmente. A opção padrão assume cobrança anual, que pode ser, entretanto, alterada no menu ou botão de atalho **Configurações**.

Para auxiliar o cálculo do custo da energia por volume unitário bombeado, o programa apresenta um outro botão **Calcula** que solicita, por meio de outras telas, dados que são utilizados para determinação automática do mesmo. Caso o usuário entre diretamente com este valor, o programa pedirá a vazão do sistema de irrigação.

5.1.12.2 Tela Cálculo do Custo da Energia Diesel

Esta tela é auxiliar à **Parâmetros Econômicos II**. Seu objetivo é o cálculo do custo da energia por unidade de volume recalado quando o bombeamento é feito com motor diesel. Para tal, deve-se fornecer, pelo menos, os dados de vazão do sistema, potência do motor e custo unitário do óleo diesel.

5.1.12.3 Tela Cálculo do Custo da Energia Elétrica

Esta tela é auxiliar à tela Parâmetros Econômicos II e seu objetivo é a determinação do custo unitário da energia elétrica por unidade de volume de água bombeado. Para tal, deve-se fornecer, pelo menos, os dados de vazão do sistema, tipo e potência do motor e grupo tarifário de cobrança, se A ou B. Após o preenchimento de todos os campos, abre-se nova tela solicitando dados específicos conforme o grupo tarifário escolhido.

5.1.12.3.1 Tela Grupo Tarifário A

Esta tela é complementar à tela Cálculo do Custo de Energia Elétrica e solicita informações sobre o custo da energia elétrica no grupo tarifário A. O usuário deve definir, inicialmente, se trabalha com a tarifa convencional ou horo-sazonal, informando os valores para cada caso.

Para a tarifa horo-sazonal, têm-se os valores relativos ao período seco e úmido, respectivamente compreendidos entre os meses de maio a novembro e dezembro a abril. Ao longo de um mesmo dia, ainda, tem-se tarifação conforme o horário de ponta, entre 18:00h e 21:00h, ou fora de ponta, entre 21:00h e 18:00h. Para os cálculos com este tipo de tarifa, o programa considera o uso do horário de ponta só em último caso, quando o sistema tem que trabalhar mais de 21 horas por dia.

Pode-se ainda estabelecer o percentual de cobrança do Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviço (ICMS), se o mesmo não estiver incluso no valor fornecido da energia.

5.1.12.3.2 Tela Grupo Tarifário B

Esta tela é complementar à tela Cálculo do Custo de Energia Elétrica e solicita informações sobre o custo da energia elétrica no grupo tarifário B. O usuário deve informar se trabalha com a tarifa diferenciada noturna ou não, pela seleção da opção adequada. Caso utilize tarifa noturna reduzida, o usuário deve definir a forma de sua utilização, isto é, se usa o sistema preferencialmente de dia e complementa o tempo necessário à irrigação no horário reduzido, ou se irriga preferencialmente à noite e complementa a irrigação durante o dia. Neste último caso, deve-se informar ainda quanto tempo, em média, utiliza-se diariamente a tarifa reduzida noturna.

Pode-se ainda estabelecer o percentual de cobrança do ICMS, caso este não esteja incluído no valor fornecido da energia.

5.1.13 Tela Processa Dados II

A finalidade desta tela é efetuar a análise econômica do balanço de água no solo, para várias lâminas de irrigação, objetivando encontrar a lâmina econômica ótima. Isso é feito de forma iterativa, simulando-se uma reposição de água no solo, para atender a uma determinada condição de evapotranspiração, calculando-se simultaneamente os custos e receitas oriundos da irrigação.

O programa considera três alternativas para o cálculo da lâmina a ser repostada pela irrigação: baseada na evapotranspiração potencial da cultura, na evapotranspiração da cultura de referência ou na evapotranspiração real da cultura.

Pode-se ainda simular uma condição específica de reposição de irrigação definindo-se o valor de tal reposição e obtendo-se a lâmina de irrigação, relativa a esta reposição, bem como o lucro por ela gerada. Este procedimento é útil, por

exemplo, para se estimar a melhor época de plantio. Neste caso, toma-se como base o valor de reposição relativo à lâmina econômica ótima e a produção total com ela alcançada, para a data de plantio na qual foi gerada a função água-produção utilizada na análise.

5.1.14 Tela Resultados

Esta tela apresenta os resultados da análise técnico-econômica dos dados. Dois grupos principais de resultados são mostrados por abas no topo da tela: **Resultados Técnicos** e **Resultados Econômicos**.

Na aba **Resultados Econômicos** encontram-se 3 sub-abas. Na primeira, apresenta-se o resumo dos resultados de toda a análise econômica fornecendo o valor da lâmina econômica ótima procurada e possibilitando, ainda, o ajuste de uma função polinomial correlacionando as lâminas de irrigação com seus respectivos lucros. Na segunda, mostra-se uma planilha com os dados econômicos da análise, em termos de lâminas simuladas com os respectivos custos e receitas. Na terceira, são exibidos gráficos que mostram relações da lâmina bruta total, constituídas pela irrigação e precipitação, com diversos parâmetros, a saber: custo e receita totais, custos variáveis e fixos, lucro e produtividade da cultura.

Na aba **Resultados Técnicos** encontram-se duas sub-abas. A primeira contém planilha e gráfico de precipitação e evapotranspiração determinados na análise estatística. A segunda apresenta planilha e gráfico do balanço de água no solo para a condição econômica ótima. Quando o intervalo de agrupamento dos dados de precipitação e/ou evapotranspiração forem diferentes do turno de rega, o programa permite o acesso a outras telas que mostram os resultados da análise estatística destes dados no intervalo considerado.

O programa permite o salvamento e impressão das informações fornecidas e geradas por ele. Na operação de salvamento dos gráficos, abre-se uma nova tela solicitando a definição do formato do gráfico a ser salvo, se bitmap (*.BMP), metafile (*.WMF) ou enhanced metafile (*.EMF). Ao ativar os botões de impressão ou salvamento, localizados nas sub-abas das planilhas, abre-se uma nova tela na qual se deve definir o conteúdo a ser impresso ou salvo, o qual pode ser composto dos dados de entrada e/ou resumo dos resultados e/ou planilha atual mostrada.

O programa possibilita ainda o salvamento de todos os dados fornecidos pelo usuário na análise atual a fim de permitir sua posterior edição. Para que o salvamento seja executado, uma nova tela solicita informações do local, como nome da propriedade e município, assim como observações que auxiliem na futura identificação do registro. Obrigatoriamente, deve-se fornecer alguma frase ou palavra chave para a identificação rápida do registro em seu arquivo.

5.2 Menu Arquivo, Opção Projeto Existente

Por esta opção, o programa abre uma tela em que lista todos os registros existentes, sendo que cada um refere-se a uma análise de determinação da lâmina econômica ótima anteriormente executada e gravada. Efetuada a escolha do registro, o programa permite a visualização do resumo de seus resultados e sua edição ou exclusão do arquivo de dados. Caso se proceda à edição, o programa preenche as telas da opção Projeto Novo do menu Arquivo com os dados armazenados e abre-as seqüencialmente, permitindo a alteração dos mesmos.

5.3 Menu Arquivo, Opção Precipitação

Esta opção admite as alternativas de criação e edição de um arquivo de dados de precipitação, utilizando-se em ambos os casos duas telas.

Na primeira tela apresentada para a criação de um arquivo novo de precipitação, deve-se fornecer informações que caracterizam os dados de precipitação, como o tipo dos mesmos, se diário ou mensal, e local a que se referem. O usuário pode ainda fornecer informações auxiliares que o ajudarão a identificar o arquivo futuramente. Somente na segunda tela é que se procede à entrada dos dados de precipitação propriamente ditos, permitindo-se o salvamento e a impressão dos mesmos.

Para a edição de um arquivo de precipitação, o programa solicita o nome do mesmo e preenche as telas anteriormente mencionadas com os seus dados.

5.4 Menu Arquivo, Opção Evapotranspiração

Similar à anterior, esta opção permite a criação ou edição de um arquivo de dados relacionados à evapotranspiração, em duas telas distintas.

Para a criação de um arquivo, o usuário deverá, na primeira tela, caracterizar os dados e informar obrigatoriamente o método de cálculo da evapotranspiração e seus parâmetros apropriados, como altitude, latitude e raio de bordadura, conforme o caso, bem como fornecer informações auxiliares para facilitar a futura identificação do arquivo. Na segunda tela, o usuário deverá proceder à entrada dos valores relacionados à evapotranspiração, segundo a opção de cálculo definido na tela anterior. Esta tela permite ainda a impressão e salvamento dos dados.

Para a edição de um arquivo de evapotranspiração, o programa solicita o nome do mesmo e preenche as telas anteriormente mencionadas com os seus dados.

5.5 Menu Configurações

Este menu abre uma tela com o mesmo nome seu e permite interferir em certos cálculos da determinação da lâmina econômica ótima e acompanhar o desenvolvimento dos mesmos. Para tal, compõem de quatro abas, contendo vários parâmetros que podem ser modificados.

Na aba Acompanhamento, permite-se ao usuário verificar a evolução dos cálculos estatísticos, referentes à obtenção da precipitação e evapotranspiração prováveis, por meio de mensagens na tela e/ou gravação em disco. Neste último caso, todas as mensagens são gravadas seqüencialmente em um único arquivo de nome preestabelecido, TEMP_ACOMP.txt, o qual deverá ser posteriormente aberto em um editor adequado, como o bloco de notas do Windows®.

Na aba Água, permite-se preestabelecer valores de cobrança da água, bem como definir a forma de sua cobrança, se anual ou mensal. Permite-se ainda preestabelecer o limite máximo de esgotamento da água no solo a ser observado nas simulações de determinação da lâmina econômica ótima. Este limite pode ser definido pelo ponto de murcha permanente, pelo fator f do solo a ser estabelecido para a cultura, ou mesmo por um valor fixo de umidade mínima.

Na aba Dados Meteorológicos, permite-se ao usuário definir o valor do intervalo de agrupamento dos dados de precipitação e evapotranspiração, para fins de cálculos estatísticos de probabilidade, bem como proceder ou não a estimativa da precipitação efetiva.

Na aba Diversos, permite-se o acompanhamento, via monitor e/ou arquivo em disco, das situações em que ocorre incapacidade do sistema em repor a lâmina simulada durante o processo iterativo de determinação da lâmina econômica ótima. Permite-se ainda incluir o custo da tarifa mínima de energia elétrica, referente às épocas em que o sistema não opera por ausência de cultivo, nos cálculos da lâmina econômica ótima. Pode-se ainda alterar os parâmetros locais da equação do cálculo da radiação solar de ondas curtas, definidos pelos coeficientes a e b da equação 84. Uma outra configuração passível de modificação é a função da tecla ENTER e a presença ou não de um sinal sonoro (beep) nas planilhas de edição de dados de precipitação e evapotranspiração. Nestas, a tecla ENTER pode funcionar como a de seta para baixo, seta para o lado direito ou permanecer desativada. Pode-se estabelecer ou não um beep quando se tenta ultrapassar a extensão permitida da linha ou coluna nas planilhas de edição de arquivos de dados meteorológicos.