

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ**

**SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**

**DEPARTAMENTO DE SOLOS E ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**AJUSTE E AVALIAÇÃO DE UM MODELO DE BALANÇO HÍDRICO  
DECENDIAL E ESTUDO DOS LIMITES DE SUA UTILIZAÇÃO EM  
ALGUMAS LOCALIDADES NO ESTADO DO PARANÁ**

**CURITIBA**

**2005**

**SIGUIFRID GOMES**

**AJUSTE E AVALIAÇÃO DE UM MODELO DE BALANÇO HÍDRICO  
DECENDIAL E ESTUDO DOS LIMITES DE SUA UTILIZAÇÃO EM  
ALGUMAS LOCALIDADES NO ESTADO DO PARANÁ**

Dissertação apresentada como requisito parcial à  
obtenção do grau de Mestre em Agronomia, curso de  
Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração  
em Ciência do Solo, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luiz Moretti de Souza

**CURITIBA**

**2005**

Gomes, Siguifrid

Ajuste e avaliação de um modelo de balanço hídrico decendial e estudo dos limites de sua utilização em algumas localidades no estado do Paraná / Siguifrid Gomes. - Curitiba, 2005.

xv, 103 f.

Orientador: Jorge Luiz Moretti de Souza.

Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

1. Balanço hidrológico – Métodos de simulação. 2. Irrigação agrícola - Métodos. 3. Hidrologia – Modelos. 4. Solos – Umidade. 5. Ciclo hidrológico. I. Título.

CDU 631.67.001.573(816.2)



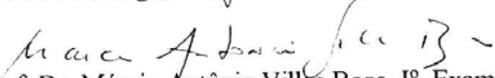
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
DEPARTAMENTO DE SOLOS E ENGENHARIA AGRÍCOLA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA: CIÊNCIA DO SOLO (MESTRADO)  
Rua dos Funcionários, 1540-Curitiba/PR-80035-050-Fone/Fax 41-350-5848  
Página: [www.pgcisolo.agrarias.ufpr.br/](http://www.pgcisolo.agrarias.ufpr.br/)  
E-mail: [pgcisolo@ufpr.br](mailto:pgcisolo@ufpr.br)

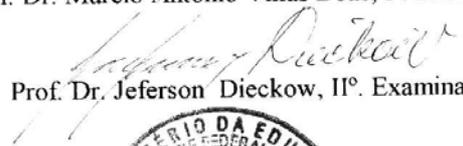
## PARECER

Os Membros da Comissão Examinadora, designados pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Agronomia-Área de Concentração "Ciência do Solo" para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado, apresentada pelo candidato **SIGUIFRID GOMES**, sob o título: "**Ajuste e avaliação de um modelo de balanço hídrico decendial e estudo dos limites de sua utilização em algumas localidades no Estado do Paraná**", requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Agronomia-Área de Concentração "Ciência do Solo" do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, após haverem analisado o referido trabalho e argüido o candidato, são de Parecer pela "**APROVAÇÃO**" da Dissertação, completando assim, os requisitos necessários para receber o diploma de **Mestre em Agronomia-Área de Concentração "Ciência do Solo"**.

Secretaria do Programa de Pós-Graduação em Agronomia-Área de Concentração "Ciência do Solo", em Curitiba, 29 de novembro de 2005.

  
Prof. Dr. Jorge Luiz Moretti de Souza, Presidente.

  
Prof. Dr. Márcio Antônio Villas Boas, Iº. Examinador.

  
Prof. Dr. Jeferson Dieckow, IIº. Examinador.



À minha família  
que nestes anos suportou a privação de tempo e atenção  
sem perder a ternura, a amizade e o companheirismo.  
Seu apoio, amor e a harmonia me conduziu aqui  
Dedico

## **AGRADECIMENTOS**

- A UFPR/Setor de Ciências Agrárias/Departamento de Solos e Engenharia Agrícola e ao Curso de pós-graduação em Ciência do Solo por ter me acolhido como aluno de mestrado.
- Especiais ao Departamento de Solos e Eng. Agrícola por ter considerado possível que eu conciliasse a docência e o curso de mestrado.
- Ao professor e orientador Dr. Jorge Luis Moretti de Souza, um agradecimento especial, pelo apoio, orientação, motivação e acompanhamento do trabalho.
- Agradeço ao SIMEPAR e ao IAPAR por disponibilizar prontamente dados climáticos essenciais para a realização deste trabalho.
- Agradeço aos meus familiares pela compreensão que tiveram comigo, principalmente nos momentos em que estive ausente do seu convívio estudando, lendo, pesquisando e escrevendo este trabalho.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>viii</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>x</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	<b>xii</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>xiv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xv</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVO GERAL</b> .....	<b>3</b>
<b>2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b> .....	<b>3</b>
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>4</b>
<b>3.1 USO DA ÁGUA NO MUNDO</b> .....	<b>4</b>
3.1.1 Uso da água no Brasil .....	5
<b>3.2 BALANÇO HÍDRICO</b> .....	<b>6</b>
3.2.1 Definição e caracterização .....	6
3.2.2 Balanço hídrico quanto à escala temporal .....	7
3.2.3 Procedimentos para determinar o balanço hídrico .....	8
3.2.4 Metodologias de determinação do balanço hídrico .....	10
3.2.5 Balanço hídrico de THORNTHWAITE & MATHER (1955) .....	11
<b>3.3 MODELOS COMPUTACIONAIS QUE CONSIDERAM A REALIZAÇÃO DE UM BALANÇO HÍDRICO PARA A AGRICULTURA IRRIGADA</b> .....	<b>13</b>
<b>3.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS COMPONENTES PRECIPITAÇÃO E EVAPO- TRANSPIRAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO</b> .....	<b>16</b>
3.4.1 Precipitação pluvial ou chuva.....	16
3.4.2 Evapotranspiração .....	17
3.4.3 Chuva e evapotranspiração prováveis .....	20
3.4.4 Armazenamento de água no solo .....	22
<b>3.5 PROCESSO DE SIMULAÇÃO</b> .....	<b>25</b>
3.5.1 Números aleatórios ou randômicos .....	25

<b>4 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>28</b>
<b>4.1 PRINCIPAIS ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO .....</b>	<b>28</b>
<b>4.2 BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO DECENDIAL .....</b>	<b>28</b>
4.2.1 Equações de armazenamento de água no solo.....	31
4.2.2 Verificação do processo de geração de Números Aleatórios do <i>Visual Basic (macro)</i> do programa <i>Microsoft Excel 2000</i> (primeira etapa).....	34
<b>4.3 VERIFICAÇÃO DO MÓDULO “BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO DECENDIAL” APÓS AS MODIFICAÇÕES (Segunda e Terceira etapas).....</b>	<b>38</b>
4.3.1 Descrição da área de estudo.....	38
4.3.2 Levantamento, organização e tratamento dos dados climáticos.....	40
4.3.3 Teste de aderência e determinação da chuva e <i>ET<sub>o</sub></i> provável .....	42
4.3.4 Parâmetros físico-hídricos do solo .....	46
4.3.5 Resumo das opções utilizadas para verificar o módulo “Balanço hídrico climatológico decendial” após as modificações, com os dados de Ponta Grossa-PR (Terceira etapa).....	48
<b>4.4 CENÁRIO PARA AVALIAR OS LIMITES DE UTILIZAÇÃO DO MÓDULO “BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO” DECENDIAL (Quarta etapa).....</b>	<b>49</b>
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>51</b>
<b>5.1 VERIFICAÇÃO DO PROCESSO DE GERAÇÃO DE NÚMEROS ALEATÓRIOS DO VISUAL BASIC (MACROS) DO MICROSOFT EXCEL 2000 (Primeira etapa).....</b>	<b>51</b>
5.1.1 Teste das séries para aleatoriedade.....	51
5.1.2 Avaliação do gráfico de dispersão das seqüências de <i>NA</i> .....	54
5.1.3 Teste do Chi-quadrado.....	55
<b>5.2 ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS DE ENTRADA PARA SIMULAR O “BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO DECENDIAL” (Segunda etapa) .....</b>	<b>58</b>
5.2.1 Estimativa da <i>ET<sub>o</sub></i> e probabilidade de sua ocorrência.....	58
5.2.2 Precipitação pluvial e probabilidade de sua ocorrência.....	61
5.2.3 Contraste entre precipitação e <i>ET<sub>o</sub></i> provável a 75%.....	65
5.2.4 Parâmetros físico-hídricos dos solos .....	68
<b>5.3 VERIFICAÇÃO DO MÓDULO “BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO DECENDIAL” APÓS AS MODIFICAÇÕES (Terceira etapa).....</b>	<b>69</b>
5.3.1 Verificação da <i>ET<sub>o</sub></i> Simulada.....	69
5.3.2 Resultados alcançados com as equações de armazenamento de água no solo .....	73
(a) Considerações sobre os resultados alcançados no balanço hídrico para o solo argiloso: ...	73
(b) Considerações sobre os resultados alcançados no balanço hídrico para o solo arenoso (CAD = 25 mm): .....	79

<b>5.4 CENÁRIO: AVALIAÇÃO DOS LIMITES DE UTILIZAÇÃO DO MÓDULO “BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO DECENDIAL” (Quarta etapa).....</b>	<b>82</b>
5.4.1 Estimativa dos parâmetros decendiais de chuva provável e <i>ET<sub>o</sub></i> .....	83
5.4.2 Avaliação do módulo “Balanço hídrico climatológico decendial” .....	86
<b>6 CONCLUSÃO.....</b>	<b>94</b>
<b>7 REFERÊNCIAS .....</b>	<b>96</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Consumo <i>per capita</i> mínimo e máximo diário, em litros por habitante por dia (lcd), verificado pela Organização Mundial de Saúde (OMS) em áreas rurais de países em desenvolvimento.....	5
Tabela 3.2. Disponibilidade percentual e <i>per capita</i> de água no Brasil, por bacia hidrográfica, com a respectiva área.....	6
Tabela 4.1. Composição granulométrica dos solos selecionados para as análises de simulação no módulo “Balanço Hídrico Climatológico Decendial”.....	47
Tabela 4.2. Manejo de irrigações suplementares utilizadas nas análises de simulação. ....	49
Tabela 5.1. Valores de <i>z</i> padronizado calculado e número total de séries ( <i>V</i> ) nas 30 seqüências de <i>NA</i> ( <i>S</i> ) gerados no módulo <i>Visual Basic</i> ( <i>macro</i> ).....	51
Tabela 5.2. Distribuição de freqüência dos valores de <i>z</i> padronizado das 30 seqüências de <i>NA</i> gerados no módulo <i>Visual Basic</i> ( <i>macros</i> ) do <i>Microsoft Excel</i> 2000. ....	52
Tabela 5.3. Resultado das análises do teste das séries para aleatoriedade considerando oito níveis de significância estatística e valores de <i>z</i> padronizado calculado.....	53
Tabela 5.4. Teste de Chi-quadrado para as 30 seqüências de <i>NA</i> considerando quatro níveis de probabilidade. ....	56
Tabela 5.5. Parâmetros estatísticos decendiais da <i>ET<sub>o</sub></i> , obtidos nas análises de teste de aderência, a 5% de significância, com as distribuições de probabilidade Normal ( <i>N</i> ), Triangular ( <i>T</i> ), Uniforme ( <i>U</i> ), Exponencial ( <i>E</i> ) e Gama ( <i>G</i> ), e cálculo da <i>ET<sub>o</sub></i> provável a 75% de probabilidade para Ponta Grossa. ....	59
Tabela 5.6. Parâmetros estatísticos decendiais da precipitação, obtidos nas análises de teste de aderência, a 5% de significância, com as distribuições de probabilidade Normal ( <i>N</i> ), Triangular ( <i>T</i> ), Uniforme ( <i>U</i> ), Exponencial ( <i>E</i> ) e Gama ( <i>G</i> ), e cálculo da precipitação provável a 75% de probabilidade para Ponta Grossa. ....	62
Tabela 5.7. Parâmetros físico-hídricos estimados pelo programa <i>SPLINTEX</i> e capacidade de água disponível ( <i>CAD</i> ) estimada para dois solos possuindo classes de textura argilosa e arenosa, considerando a densidade de solo de 1,3 g·cm <sup>-3</sup> , densidade de partícula de 2,65 g·cm <sup>-3</sup> e 50 cm de profundidade efetiva do sistema radicular. ....	68
Tabela 5.8. Área acumulada sob a curva de distribuição Normal teórica (SPIEGEL, 1993) e obtida com a distribuição de freqüência da <i>ET<sub>c</sub></i> decendial estimada no módulo balanço hídrico do modelo <i>MORETTI</i> com o algoritmo original e modificado. ....	70
Tabela 5.9. Parâmetros estatísticos para os 10.000 anos de <i>ET<sub>o</sub></i> decendial simulada empregando módulo “Balanço hídrico climatológico decendial” do modelo <i>MORETTI</i> original e considerando as modificações propostas neste trabalho. ....	72

Tabela 5.10. Valores médios de irrigação ( <i>I</i> ), evapotranspiração real ( <i>ER</i> ), deficiência ( <i>DEF</i> ), excedente ( <i>EXC</i> ) e frequência de irrigações no ano ( <i>Fi</i> ), obtidos de 10.000 simulações do “Balanço hídrico climatológico decendial” do modelo <i>MORETTI</i> , para as localidade de Ponta Grossa, considerando solo com textura ARGILOSA ( <i>CAD</i> = 65,0 mm), fração <i>p</i> igual 0,5, coeficiente de cultivo igual a 1,0, seis manejos de irrigação (Tabela 4.2), e cinco equações de armazenamento de água no solo: Co-senoidal; Exponencial de THORNTHWAITE & MATHER (1955); Potencial de primeira ordem de RIJTEMA & ABOUKHALED (1975); BRAGA (1982) e Potencial de segunda ordem.....	74
Tabela 5.11. Valores médios de irrigação ( <i>I</i> ), evapotranspiração real ( <i>ER</i> ), deficiência ( <i>DEF</i> ), excedente ( <i>EXC</i> ) e frequência de irrigações no ano ( <i>Fi</i> ), obtidos de 10.000 simulações do “Balanço hídrico climatológico decendial” do modelo <i>MORETTI</i> , para as localidade de Ponta Grossa, considerando solo com textura ARENOSA ( <i>CAD</i> = 25,0 mm), fração <i>p</i> igual 0,5, coeficiente de cultivo igual a 1,0, seis manejos de irrigação (Tabela 4.2), e cinco equações de armazenamento de água no solo: Co-senoidal; Exponencial de THORNTHWAITE & MATHER (1955); Potencial de primeira ordem de RIJTEMA & ABOUKHALED (1975); BRAGA (1982) e Potencial de segunda ordem.....	80
Tabela 5.12. Parâmetros estatísticos, média e desvio padrão da <i>ET<sub>o</sub></i> estimada, e chuva a 75% de probabilidade para quatro localidades no estado do Paraná. ....	84
Tabela 5.13. Média e desvio padrão dos valores anuais de <i>DEF</i> , <i>ER</i> e <i>I</i> simulados para a região de Apucarana-PR considerando solo argiloso com <i>CAD</i> de 20 a 100 mm, manejo de irrigação 1 e equação Co-senoidal de estimativa do armazenamento e negativo acumulado. .	87
Tabela 5.14. Média e desvio padrão dos valores anuais de <i>DEF</i> , <i>ER</i> e <i>I</i> simulados para a região de Cascavel-PR considerando solo argiloso com <i>CAD</i> de 20 a 100 mm, manejo de irrigação 1 e equação Co-senoidal de estimativa do armazenamento e negativo acumulado. .	87
Tabela 5.15. Média e desvio padrão dos valores anuais de <i>DEF</i> , <i>ER</i> e <i>I</i> simulados para a região de Morretes-PR considerando solo argiloso com <i>CAD</i> de 20 a 100 mm, , manejo de irrigação 1 e equação Co-senoidal de estimativa do armazenamento e negativo acumulado. .	88
Tabela 5.16. Média e desvio padrão dos valores anuais de <i>DEF</i> , <i>ER</i> e <i>I</i> simulados para a região de Ponta Grossa-PR considerando solo argiloso com <i>CAD</i> de 20 a 100 mm, , manejo de irrigação 1 e equação Co-senoidal de estimativa do armazenamento e negativo acumulado. ....	88
Tabela 5.17. Deficiência decendial média ( <i>DEF<sub>m</sub></i> – mm/decêndio) e variação percentual dos valores de <i>DEF</i> , <i>ER</i> e <i>I</i> (%) entre os incrementos de <i>AD</i> no solo, obtidos com os dados das Tabela 5.13 a 5.16 para as regiões de Apucarana, Cascavel, Morretes e Ponta Grossa.....	92

## LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 – Fluxograma contendo a estrutura lógica de algumas partes do módulo “Balanço hídrico climatológico decendial” do modelo MORETTI.....	30
Figura 4.2 – Mapa contendo a localização da cidade de Ponta Grossa-PR.....	39
Figura 5.1 – (a) Frequência relativa e (b) frequência relativa acumulada dos valores de $z$ padronizado calculado para 30 seqüências de $NA$ , seguindo a metodologia proposta por SPIEGEL(1993). .....	52
Figura 5.2 – Gráficos de dispersão da (a) melhor e (b) pior seqüência de $NA$ identificadas por intermédio do Teste das Séries para Aleatoriedade.....	54
Figura 5.3 – Gráfico de distribuição de frequência para a (a) melhor e (b) pior seqüência de $NA$ identificada por meio do Teste das Séries para Aleatoriedade.....	55
Figura 5.4 – (a) Frequência relativa e (b) frequência relativa acumulada dos valores de Chi-quadrado obtidos para as 30 seqüências de $NA$ gerados no módulo <i>Visual Basic</i> do <i>Microsoft Excel 2000</i> . .....	56
Figura 5.5 – Curva de tendência do menor valor, maior valor e média da $ETo$ estimada com o método THORNTHWAITE (1948) e valores de $ETo$ a 75% de probabilidade, obtidos com a distribuição de melhor ajuste para Ponta Grossa-PR. ....	60
Figura 5.6 – Probabilidade de ocorrer um valor maior ou igual à $ETo$ média de Ponta Grossa-PR, baseando-se em uma série de 50 anos de dados (1954–2004), considerando a distribuição de probabilidade de melhor ajuste.....	60
Figura 5.8 – Chuva decendial provável (75%) e probabilidade de ausência de precipitação ( $P = 0$ ) para uma série climática média de 44 anos em Ponta Grossa-PR.....	63
Figura 5.9 – Probabilidade de ocorrência da precipitação média para a região de Ponta Grossa, considerando a distribuição de probabilidade de melhor ajuste pelo teste de Kolmogorov-Smirnov. ....	65
Figura 5.10 – Valores médios decendiais de $ETo$ e chuva para a região de Ponta Grossa-PR.....	65
Figura 5.11 – Valores decendiais de chuva provável e evapotranspiração de referência ( $ETo$ ) média e provável a 75%, para a região de Ponta Grossa-PR.....	66
Figura 5.12 – Distribuição de frequência da $ETc$ decendial simulada pelo processo original de geração de $NA$ do modelo <i>MORETTI</i> , para os decêndios 18 (a) e 29 (b), e sugerido por este trabalho para o decêndio 18 (c) e 29 (d).....	69
Figura 5.13 – Valores médios de irrigação ( $I$ ), evapotranspiração real ( $ER$ ) e deficiência ( $DEF$ ), obtidos de 10.000 simulações do “Balanço hídrico climatológico decendial” do modelo <i>MORETTI</i> , para as localidade de Ponta Grossa, considerando solo com textura ARGILOSA ( $CAD = 65,0$ mm), fração $p$ igual 0,5, coeficiente de cultivo igual a 1,0, seis manejos de irrigação (Tabela 4.2), e cinco equações de armazenamento de água no solo. ....	75

Figura 5.14 – Valores médios de irrigação ( $I$ ), evapotranspiração real ( $ER$ ) e deficiência ( $DEF$ ), obtidos de 10.000 simulações do “Balanço hídrico climatológico decendial” do modelo *MORETTI*, para as localidades de Ponta Grossa, considerando solo com textura ARENOSA ( $CAD = 25,0$  mm), fração  $p$  igual 0,5, coeficiente de cultivo igual a 1,0, seis manejos de irrigação (Tabela 4.2), e cinco equações de armazenamento de água no solo. .... 81

Figura 5.15 – Valores decendiais de  $ET_0$  média estimada pelo método de THORNTHWAITE (1948) e chuva provável (75%) estimada com a distribuição de probabilidade de melhor ajuste, para as localidades: (a) Apucarana, (b) Cascavel, (c) Morretes e (d) Ponta Grossa. .... 85

Figura 5.16 – Valores médios anuais de (a)  $DEF$ , (b)  $ER$  e (c)  $I$ , obtidos em 10.000 simulações com o módulo “Balanço hídrico climatológico decendial” do *MORETTI*, para quatro localidades no Paraná, considerando valores de  $AD$  de 10 mm a 50 mm, manejo de irrigação 1 e equação Co-senoidal de estimativa do armazenamento e negativo acumulado. .... 89

## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Umidade
$CAD$	Capacidade de água disponível .....	mm
$U_{CC}$	Umidade do solo na capacidade de campo com base em peso .....	%
$U_{PMP}$	Umidade do solo no ponto de murcha permanente com base em peso .....	%
$d_a$	Densidade aparente do solo .....	$g.cm^{-3}$
$z$	Profundidade efetiva do sistema radicular ou profundidade alcançada por 80% das raízes da cultura .....	mm
$AD$	Água disponível no $d$ -ésimo decêndio .....	mm
$p_d$	Fração de $AD$ no solo para a cultura no $d$ -ésimo decêndio .....	adimensional
$p$	Fração de água disponível no solo para a cultura .....	adimensional
$ET_p$	Evapotranspiração potencial .....	mm
$ET_o$	Evapotranspiração de referência .....	mm
$ET_m$	Evapotranspiração máxima .....	mm
$ER$	Evapotranspiração real .....	mm
$ARM$	Armazenamento de água no solo .....	mm
$L$	Negativo acumulado .....	mm
$e$	Base dos logaritmos naturais .....	2,718281828
$K_c$	Coefficiente de cultivo .....	adimensional
$IAF$	Índice de área foliar .....	adimensional
$NA$	Números Aleatórios .....	adimensional
<b>Teste das séries para aleatoriedade</b>		
$V$	Total de séries da seqüência .....	adimensional
$N_1$	Número de séries formado por valores maiores que a mediana .....	adimensional
$N_2$	Número de séries com valores abaixo da mediana .....	adimensional
$\mu_v$	Média de $V$ .....	adimensional
$\sigma_v$	Desvio padrão de $V$ .....	adimensional
$z$	Valor para distribuição normal padronizado .....	adimensional
<b>Teste de Chi-quadrado</b>		
$k$	Número de classes .....	adimensional
$N$	Número total de $NA$ da seqüência (10.000) .....	adimensional
$FO_i$	Frequência observada em cada $i$ -ésima classe .....	adimensional
$n_i$	Número de $NA$ em cada $i$ -ésima classe .....	adimensional
$Fe_i$	Frequência esperada em cada $i$ -ésima classe .....	adimensional
$Fo_i$	Frequência observada em cada $i$ -ésima classe .....	adimensional
$\chi^2$	Valor de Qui-quadrado calculado .....	adimensional
$GL$	Número de grau de liberdade .....	adimensional
$p$	Número de parâmetros da distribuição uniforme sob teste .....	adimensional
<b>Procedimento de tabulação dos dados climáticos</b>		
$T_d$	Temperatura média no $d$ -ésimo decêndio .....	°C
$T_{id}$	Temperatura média do $i$ -ésimo dia do $d$ -ésimo decêndio .....	°C
$P_d$	Precipitação acumulada no $d$ -ésimo decêndio .....	mm/decêndio
$P_{id}$	Precipitação do $i$ -ésimo dia do $d$ -ésimo decêndio .....	mm/dia
$n_d$	Número de dias do $d$ -ésimo decêndio .....	adimensional
$ET_{o_d}$	Evapotranspiração de referência no $d$ -ésimo decêndio .....	mm/decêndio
$n_d$	Número de dias do $d$ -ésimo decêndio .....	adimensional
$T_d$	Temperatura média do ar do $d$ -ésimo decêndio .....	°C
$N_d$	Fotoperíodo no último dia do $d$ -ésimo decêndio .....	h
$I$	Índice de calor da região .....	adimensional

$a$	Função cúbica do índice de calor da região .....	adimensional
$T_i$	Temperatura média normal do $i$ -ésimo mês do ano .....	°C
$H_d$	Ângulo horário de nascimento do sol no último dia do $d$ -ésimo decêndio ....	graus
$\delta_d$	Declinação do sol no último dia do $d$ -ésimo decêndio .....	graus
$\phi$	Latitude da estação climatológica onde os dados foram coletados .....	graus
$Dj_d$	Dia juliano .....	dias
<b>Teste de aderência e determinação da chuva e <math>ET_o</math> provável</b>		
$D_{max}$	Valor crítico para a estatística de Kolmogorov-Smirnov .....	adimensional
$F'(x)$	Função de distribuição de probabilidade teórica .....	adimensional
$F(x)$	Função de distribuição de probabilidade observada .....	adimensional
$D_{max}$	Valor crítico $D_{max}$ da estatística de Kolmogorov-Smirnov .....	adimensional
$N$	Número total de anos da série histórica .....	adimensional
$P_o$	Probabilidade de ocorrência de ausência de precipitação nos $d$ -ésimos decêndios da série histórica .....	%
$D(x)$	Distribuição cumulativa teórica, onde os parâmetros são estimados na ausência de zeros .....	%
$N_{zeros}$	Número total de $d$ -ésimos decêndios com valores nulos na série histórica ....	adimensional
<b>Funções de distribuição cumulativa de probabilidade <math>F(x)</math></b>		
$F(x)$	Função distribuição de probabilidade .....	adimensional
$x$	Altura de chuva ou $ET_o$ no decêndio considerado .....	mm
<b>Função distribuição de probabilidade Normal</b>		
$\mu$	Média da população .....	mm
$\sigma$	Desvio padrão da população .....	mm
$\pi$	Constante numérica “ $\pi$ ” .....	3,141592654
<b>Função distribuição de probabilidade Gama</b>		
$\alpha$	Parâmetro de forma .....	adimensional
$\beta$	Parâmetro de escala. ....	adimensional
$\Gamma(\alpha)$	Função Gama .....	adimensional
$\bar{x}$	Altura média de chuva ou $ET_o$ maior que 1 mm .....	mm
<b>Função distribuição de probabilidade Triangular</b>		
$a$	Menor valor da série de dados .....	mm
$b$	Maior valor da série de dados .....	mm
$m$	Valor modal da série de dados .....	mm
<b>Função distribuição de probabilidade uniforme</b>		
$a$	Menor valor da série de dados .....	mm
$b$	Maior valor da série de dados .....	mm
<b>Parâmetros físico-hídricos do solo</b>		
$\theta$	Umidade do solo .....	cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>
$ \Phi_m $	Potencial mátrico da água no solo .....	cm
$\theta_r$	Umidade residual .....	cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>
$\theta_s$	Umidade de saturação .....	cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>
$\alpha, m, n$	Parâmetros de ajuste da curva de retenção de água no solo .....	adimensional

# **AJUSTE E AVALIAÇÃO DE UM MODELO DE BALANÇO HÍDRICO DECENDIAL E ESTUDO DOS LIMITES DE SUA UTILIZAÇÃO EM ALGUMAS LOCALIDADES NO ESTADO DO PARANÁ**

AUTOR: SIGUIFRID GOMES

ORIENTADOR: Prof. Dr. JORGE LUIZ MORETTI DE SOUZA

## **RESUMO**

O desenvolvimento e a validação de um modelo para a simulação de balanço hídrico geralmente envolvem atividades complexas que demandam um tempo considerável entre a sua idealização e o cumprimento de sua função. Portanto, a adaptação de modelos já desenvolvidos constitui uma alternativa interessante. O objetivo principal deste trabalho foi ajustar e analisar o módulo “Balanço hídrico climatológico decendial” (SOUZA, 2001) para o planejamento da irrigação de culturas agrícolas. A dinâmica das principais componentes do balanço hídrico foi estudada para a região de Ponta Grossa-PR considerando cinco equações de estimativa do armazenamento de água no solo, duas classes de textura do solo e seis manejos de irrigação. Os valores médios das componentes simuladas para o solo argiloso com as equações Potenciais de Primeira e Segunda Ordem apresentaram melhor ajuste aos valores simulados com a equação Co-Senoidal, considerada como padrão (DOURADO NETO & JONG VAN LIER, 1993). As equações Exponencial e BRAGA (1982) não apresentaram bons resultados quando foi prevista a irrigação ao longo do ano para a mesma região e solo. O solo arenoso não retornou resultados satisfatórios devido à periodicidade do balanço hídrico e ao baixo valor de água disponível (*AD*). A qualidade das seqüências de números aleatórios do *Microsoft Excel (macros)* também foi avaliada aplicando testes estatísticos paramétricos e não paramétricos. Os resultados mostraram que as seqüências geradas podem ser consideradas aleatórias para fins de modelagem agrícola. Dois algoritmos, original e modificado (proposto), foram comparados e mostraram que as alterações no algoritmo original refletiram um avanço. Os limites de utilização do módulo balanço hídrico foram estudados para um solo argiloso em Apucarana, Cascavel, Morretes e Ponta Grossa sob 17 condições de *AD*. As análises mostraram que os valores simulados de irrigação, evapotranspiração real e deficiência para Apucarana, Cascavel e Ponta Grossa foram consistentes quando a fração de *AD* foi numericamente maior ou igual à evapotranspiração de referência decendial (*ET<sub>o</sub>*). Essa correlação não foi observada para Morretes-PR.

**Palavras-chave:** Modelagem, Simulação, Balanço Hídrico Climatológico, Irrigação, Equações de Armazenamento

# ADJUSTMENT AND EVALUATION OF DECADE WATER BALANCE MODEL AND THE STUDY OF THE LIMITS FOR IT UTILIZATION IN SOME LOCALITIES IN PARANÁ STATE.

AUTHOR: SIGUIFRID GOMES

SUPERVISER: Prof. Dr. JORGE LUIZ MORETTI DE SOUZA

## ABSTRACT

The development and the validation of a new simulated water balance model frequently composed for complex activities that demand a considerable time between idealization and compliment of its function. Therefore, the adaptation of models already developed constitutes an interesting alternative. The main objective of this work was to adjust and analyze the Module “Decade Climatologic Water Balance” (SOUZA, 2001) to the planning of irrigation on agricultural crops. The dynamic of main components of water balance was studied in Ponta Grossa-PR region considering five equations to estimate the soil water storage, two soil texture classes and six irrigation managements. The average values of the components simulated with first and second-rate equations considering the clayey soil showed to be adequate to the values simulated with the Co-senoidal equation, considered as pattern (DOURADO NETO & JONG VAN LIER, 1993). The exponential and BRAGA (1982) equations did not present good results when were expected decade irrigations alongside of the year to the same region and soil. The sandy soil did not return satisfactory results due to the periodicity of the water balance and little value of able water ( $AW$ ) in the soil profile. The quality of the random number sequences of the *Microsoft Excel* (*macros*) was evaluated through parametric and no-parametric statistic tests. The results showed that the sequences produced can to be considered randomic to agricultural modeling. The original and modified (proposed) algorithm were compared and showed that the changes in the original algorithm reflect an advance. The limit of utilization of the water balance model was studied for clayed soil to Apucarana, Cascavel, Ponta Grossa and Morretes under 17 conditions of  $AW$ . The analyses showed that the simulated values of irrigation, crop evapotranspiration and deficiency to Apucarana, Cascavel and Ponta Grossa were coherent when the fraction of  $AW$  was numerically equal or bigger than reference evapotranspiration ( $ET_o$ ). This correlation wasn't observed to Morretes-PR.

**Key-words:** modeling, simulation, climatologic water balance, irrigation, storage equations.

## 1 INTRODUÇÃO

A condição da disponibilidade de água no mundo é preocupante, estima-se que em 30 anos cerca de 5,5 bilhões de pessoas estarão vivendo em áreas com moderada ou séria falta de água (POPULATION REFERENCE BUREAU, 1997). Tal afirmativa torna-se ainda mais preocupante, quando verifica-se na literatura a projeção de um incremento de 45% na população no período entre 2004 a 2050 (POPULATION REFERENCE BUREAU, 2004), enquanto que o volume de água disponível permanecerá inalterado.

A condição privilegiada do Brasil quanto à disponibilidade hídrica serviu por muito tempo como base para o desperdício. No entanto, a disponibilidade hídrica efetiva é intimamente dependente da distribuição da água no território. O território brasileiro apresenta mais de 73% da água doce concentrada na região amazônica, que é habitada por menos de 5% da população do país. As concentrações populacional, industrial e agrícola, determinam os locais de maior demanda hídrica (SETTI, 2001).

Dentre os principais consumidores, o meio agrícola apresenta-se como o maior usuário de água, especialmente a irrigação de culturas agrícolas (SETTI, 2001). A adoção de lâminas de irrigação e turnos de rega pré-determinados pelos agricultores é parcialmente responsável pela diminuição na eficiência do uso da água nos campos irrigados. Por outro lado, a irrigação é um fator importante para minimizar os riscos de deficiência hídrica no solo e elevar a produtividade das culturas. Sendo assim, é fundamental planejar e tornar mais eficiente o uso da água para a irrigação (RASSINI, 2002).

O planejamento do uso da água de irrigação por balanço hídrico, empregando evapotranspiração e chuva provável, pode reduzir os erros de estimativa dos parâmetros hídricos do solo (armazenamento, deficiência e excesso) para níveis tecnicamente aceitáveis. O acompanhamento das condições de armazenamento de água no solo associado ao entendimento das necessidades da cultura, podem ser uma alternativa para o estabelecimento de estratégias de manejo do uso eficiente das reservas de água do solo (SEDIYAMA, 1987; CINTRA *et al*, 2000; SOUZA, 2001; FRIZZONE *et al.*, 2005). Segundo DOURADO NETO

& JONG VAN LIER (1993), o monitoramento do armazenamento e das entradas e saídas de água no solo, assim como a definição dos períodos com provável deficiência hídrica, podem ser realizados de forma eficiente aplicando a metodologia proposta por THORNTHWAITE & MATHER (1955).

A adoção de equações de estimativa do armazenamento de água no solo aplicadas a um balanço hídrico THORNTHWAITE & MATHER (1955) é uma opção barata para estimar a condição de umidade do solo e retorna valores com precisão aceitável para o planejamento das atividades agrícolas. O monitoramento do armazenamento, estimado por modelos matemático-estatísticos, dá subsídios para a avaliação dos excessos e deficiências de água no solo (LIBARDI, 1995). A intensidade e o período de ocorrência de deficiências hídricas no solo são elementos importantes também para a definição das áreas e épocas mais indicadas para a semeadura das culturas (WREGE, 1999).

O desenvolvimento e a utilização de modelos de simulação do balanço hídrico para o planejamento das atividades agrícolas têm se intensificado nos últimos anos. Com o advento da informática as dificuldades operacionais, principalmente para a solução de equações complexas e para o tratamento, associação e utilização de grandes seqüências de dados, vêm sendo desconsideradas como obstáculos. A evolução das técnicas de programação e o surgimento de linguagens de programação mais acessíveis, associadas a grande capacidade de processamento dos computadores pessoais, estão permitindo a evolução da modelagem.

No entanto, apesar das facilidades criadas, o desenvolvimento e validação de um novo modelo de simulação ainda é algo complexo e demanda um tempo considerável entre a sua idealização e o cumprimento da função a que se destina. Por outro lado, a utilização de modelos de simulação já desenvolvidos muitas vezes é dificultada, pois cada modelo geralmente é desenvolvido direcionado para uma finalidade particular, apresentando especificidades que geralmente inviabilizam sua utilização. Quando o modelo permite a sua adaptação, seja pelo arranjo dos seus dados e opções ou pela inserção de novos módulos ou procedimentos, a utilização de modelos já desenvolvidos constitui uma alternativa interessante.

## **2 OBJETIVO GERAL**

O presente trabalho tem como objetivo geral ajustar e analisar um modelo de simulação de “balanço hídrico climatológico decendial” voltado ao planejamento da irrigação de culturas agrícolas e estudar os limites de sua utilização para diferentes condições climáticas e de armazenamento da água no solo, em algumas localidades situadas em regiões distintas no Estado do Paraná.

### **2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Avaliar o gerador de números aleatórios do módulo *Visual Basic (macros)* do programa *Microsoft Excel 2000* para fins de modelagem agrícola;
- Identificar a função densidade de probabilidade que melhor se ajusta aos dados decendiais normais de evapotranspiração potencial e precipitação pluvial (chuva) determinando suas respectivas alturas prováveis, para servir de entrada no “Balanço hídrico climatológico decendial”;
- Comparar a dinâmica do armazenamento e deficiência de água em dois tipos de solo (argiloso e arenoso), na região de Ponta Grossa, utilizando cinco equações de estimativa do armazenamento de água no solo em um balanço hídrico climatológico para fins agrícolas;
- Avaliar os limites de utilização do modelo “Balanço hídrico climatológico decendial” para as localidades de Apucarana, Cascavel, Morretes e Ponta Grossa sob diferentes condições de armazenamento da água no solo.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 USO DA ÁGUA NO MUNDO**

O conhecimento dos parâmetros do ciclo hidrológico é importante para o gerenciamento dos diversos usos da água, independente da escala geográfica. Da mesma forma, a delimitação das vazões requeridas aos usuários, nos diferentes setores da economia, auxilia na tomada de decisão quanto à exploração da água.

No mundo, o maior usuário de água é o setor agrícola, seguido pela indústria e pelo abastecimento público. A agricultura utiliza 70,1% do volume total captado e o setor industrial, em torno de 20%. Os diversos usos da água podem ser classificados em consuntivo ou não consuntivo. Considera-se que uma atividade é consuntiva quando parte da água captada é consumida no processo, ou seja, quando o volume de efluentes for menor que o volume total captado (SETTI, 2001).

Ao se considerar o volume efetivamente consumido, a agricultura desponta como o mais consuntivo dos usos, consumindo 93,4% do volume total captado de rios, lagos e aquíferos (SHIKLOMANOV, 1997; SETTI, 2001).

É sabido que o consumo *per capita* de água é diretamente proporcional ao grau de desenvolvimento do país. A situação do Brasil, incluído na região da América Latina e Caribe, é considerada privilegiada dentre os países em desenvolvimento. Na África o consumo diário de água é de 15 a 35 litros para cada habitante, enquanto que na América Latina e Caribe este valor fica em torno de 70 a 190 litros. A Tabela 3.1 apresenta o consumo *per capita* diário de água, em litros por habitante por dia, descrito pela Organização Mundial de Saúde (OMS) para áreas rurais de países em desenvolvimento.

Tabela 3.1. Consumo *per capita* mínimo e máximo diário, em litros por habitante por dia (lcd), verificado pela Organização Mundial de Saúde (OMS) em áreas rurais de países em desenvolvimento.

Região da OMS	Mínimo (L·habitante <sup>-1</sup> ·dia <sup>-1</sup> )	Máximo (L·habitante <sup>-1</sup> ·dia <sup>-1</sup> )
África	15	35
Sudeste da Ásia	30	70
Pacífico Ocidental	30	95
Mediterrâneo Oriental	40	85
Argélia, Marrocos e Turquia	20	65
América Latina e Caribe	70	190
Média anual nos países em desenvolvimento	35	90

Fonte: SETTI (2001)

### 3.1.1 Uso da água no Brasil

Os principais usuários de água no país são os setores agrícola, industrial e abastecimento público. Do volume total de água captada, o setor agrícola responde por 72,5% (33,8 km<sup>3</sup>·ano<sup>-1</sup>) do consumo total (CHRISTOFIDIS, 1999). Os setores de abastecimento público e industrial captam, respectivamente, 18% e 9,5% da água doce no Brasil (SRH, 1998; LIMA, 2000).

O território brasileiro possui um cenário diverso quanto à disponibilidade hídrica. Tal diversidade é resultante das suas dimensões continentais.

A partir de 1950 houve um aumento desordenado da urbanização, industrialização e expansão agrícola no país, interferindo na demanda por recursos hídricos. A migração da população do campo para os grandes centros urbanos tem aumentado a pressão sobre os cursos de água em determinadas regiões do território brasileiro. O incremento na demanda hídrica localizada, especialmente nos grandes centros, associada à degradação da qualidade da água, decorrente da falta de coleta e tratamento dos efluentes, tem elevado progressivamente a pressão sobre alguns corpos de água.

A agricultura irrigada constitui-se no principal usuário de água no Brasil. A água é, em termos agronômicos, insumo de importância capital na elevação da produtividade de sistemas agrícolas e pecuários. O aumento da população e a melhoria da condição econômica da mesma exigem uma agricultura mais eficiente e menos alheia às variações climáticas. Neste ponto, o incremento na área irrigada no país, “*implementado por um intenso programa de irrigação em várias áreas do seu território* (MARTINS JÚNIOR & BARRETO, 2003)”, pode resultar desses dois fatores.

O Brasil apresenta 29,6 milhões de hectares de terras com potencial de irrigação, excluindo as bacias hidrográficas do Amazonas e do Tocantins, na região norte. Em 1998, apenas 2,87 milhões de hectares eram irrigados no território nacional (CHRISTOFIDIS, 1999; LOIOLA & SOUZA, 2001). Conforme a Tabela 3.2, cerca de 80% da disponibilidade hídrica do Brasil concentra-se nas bacias hidrográficas do Tocantins e Amazônia, que cobrem perto de 55% do território. Assim, um quinto da água disponível no Brasil deverá suprir a demanda de mais de 29 milhões de hectares irrigáveis e, concomitantemente, todos os outros usos supracitados.

Tabela 3.2. Disponibilidade percentual e *per capita* de água no Brasil, por bacia hidrográfica, com a respectiva área.

Bacia hidrográfica	Área (%)	Disponibilidade hídrica (Km <sup>3</sup> · ano <sup>-1</sup> )	Disponibilidade (%)	Disponibilidade <i>Per capita</i> (m <sup>3</sup> · habitante <sup>-1</sup> · ano <sup>-1</sup> )
Amazônica	45,8	4206	73,2	628.940
Tocantins	8,9	372	6,5	106.220
Atlântico norte/nordeste	12,1	285	5,0	9.130
São Francisco	7,4	90	1,6	7.660
Atlântico Leste	6,4	137	2,4	3.820
Paraguai	4,3	41	0,7	22.340
Paraná	10,3	347	6,0	6.950
Uruguai	2,1	131	2,3	34.100
Atlântico sudeste	2,6	136	2,4	10.910
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>5.745</b>	<b>100</b>	—

Fonte: SETTI (2001).

Neste contexto é interessante observar a importância do desenvolvimento e aprimoramento de técnicas que visem racionalizar e planejar o uso dos recursos hídricos, como é o caso do balanço hídrico, destinadas a diversas atividades agrícolas, principalmente para a irrigação, que representa a maior parcela de uso consuntivo.

## 3.2 BALANÇO HÍDRICO

### 3.2.1 Definição e caracterização

Balanço hídrico é um sistema contábil de monitoramento da água no solo (TUCCI, 1997) e resulta da aplicação do princípio da conservação de massa para a água em um volume de solo (PEREIRA *et al.*, 1997). Permite observar a dinâmica da água no solo a partir do armazenamento, deficiência e excedentes hídricos (THORNTHWAITE, 1946; THORNTHWAITE, 1948; CAMARGO & CAMARGO, 2000).

O balanço hídrico é o método mais eficiente para quantificar o potencial hídrico de uma região, pois considera a interação entre os fatores edáfico e climático. O fator edáfico interfere no armazenamento de água do solo e o climático, por sua vez, é representado pela precipitação pluvial e evapotranspiração (AMORIM NETO, 1989; MOSTER *et al.*, 2003).

O balanço hídrico é uma ferramenta utilizada em diversas áreas do conhecimento tais como a agrícola (PEREIRA *et al.*, 1997; CINTRA *et al.*, 2000), florestal (MOSTER *et al.*, 2003) e hidrológica (TUCCI, 1997; CÂMARA, 1999; RODRÍGUES ANIDO, 2002). Na atividade agrícola, algumas práticas estão diretamente relacionadas com o balanço hídrico. Entre elas pode-se mencionar o manejo e mobilização do solo, irrigação, práticas fitosanitárias, colheita, entre outros (OMETTO, 1981; PEREIRA *et al.*, 1997; TUCCI 1997; SOUZA, 2001;).

Além da atividade agrícola, a exploração florestal também utiliza a contabilidade hídrica, especialmente nas práticas de manejo do solo e para zoneamento de espécies. Em estudos de hidrologia, o balanço hídrico é um indicador da influencia do uso do solo sobre o funcionamento hidrológico de uma bacia hidrográfica (CÂMARA, 1999; RODRÍGUES ANIDO, 2002).

De acordo com TUCCI (1997), o balanço hídrico de bacias hidrográficas geralmente visa estimar a evapotranspiração baseando-se em dados de precipitação, evaporação e escoamento superficial e profundo. É considerado teoricamente preciso para estimativa da evapotranspiração de lagos ou represas, relacionando as dimensões do reservatório, vazão e precipitação pluvial em uma equação de continuidade.

Na área geográfica, o balanço hídrico foi utilizado por WILLMOTT *et al.* (1985) como ferramenta para fundamentar seus trabalhos. Produziram-se cartas de armazenamento de água no solo, cobertura de neve e evapotranspiração real.

### **3.2.2 Balanço hídrico quanto à escala temporal**

Quanto a escala, os balanços hídricos podem ser classificados em seqüencial (contínuo) e cíclicos (PEREIRA *et al.*, 1997). Ambos os balanços apresentam particularidades matemáticas para a sua determinação, no entanto, de forma geral, são bastante semelhantes.

O balanço hídrico cíclico utiliza normalmente dados médios da região, ou seja, dados climatológicos normais (OMETTO, 1981). Ele reflete a condição normal do local e despreza

as eventualidades do tempo atmosférico. Sua utilização é mais intensa em estudos climatológicos onde, evidentemente, a finalidade é a descrição do clima e não do tempo meteorológico.

O balanço hídrico seqüencial ou contínuo normalmente é realizado para períodos pequenos de tempo e demonstra a variação da condição hídrica do local. Quanto menor for o período de estudo, maior será a interferência das variações do tempo meteorológico. Esta contabilidade permite verificar a flutuação hídrica em solo agrícola e, conseqüentemente, possibilita o manejo da irrigação.

O balanço hídrico pode ser realizado para diversos períodos de tempo, variando de horas a anos. As escalas de tempo mais utilizadas estão entre a diária e a anual. A escolha de uma ou outra escala temporal depende especialmente da finalidade da contabilidade hídrica. Estudos geológicos e climáticos utilizam com freqüência as escalas anual e mensal, respectivamente. O monitoramento do armazenamento de água no solo para fins irrigacionistas, considera normalmente períodos de 1 a 10 dias, dependendo das condições climáticas e capacidade de armazenamento de água dos solos da região. Inúmeros são os autores que consideram períodos de 1, 5, 7 e 10 dias em trabalhos científicos na área agrícola (BRAGA, 1982; SANTOS & ANDRE, 1992; CINTRA *et al*, 2000; SOUZA, 2001; SOUZA & FRIZZONE, 2003; PACHECHENICK, 2004; PACHECHENICK *et al.* (2004). TRENTIN, 2005; MARQUES, 2005). A sensibilidade da cultura ao estresse hídrico interfere na escolha da periodicidade do balanço. A disponibilidade de dados climáticos em escala igual ou mais detalhada que a do balanço hídrico, também pode limitar a escolha de uma ou outra periodicidade (OMETTO, 1981; TUBELLIS, 1986; PEREIRA *et al.*, 1997).

### **3.2.3 Procedimentos para determinar o balanço hídrico**

O balanço hídrico pondera as componentes: precipitação, evaporação, evapotranspiração, escoamento superficial e subterrâneo (TUCCI, 1997). Baseando-se nos componentes citados, diferentes procedimentos podem ser realizados para determinar o balanço hídrico, que pode ser classificado em superficial, aerológico, isotópico, balanços energéticos, balanços hídricos de superfícies líquidas, modelos matemáticos, balanços hídrico agrícola e climatológico. As principais características de cada modelo são explicitadas a baixo:

- (a) **Balço hídrico superficial:** Utiliza-se da relação de continuidade entre os termos precipitação, evapotranspiração e escoamento;
- (b) **Balço hídrico aerológico:** Utiliza dados climatológicos para estabelecer a conservação de massa na atmosfera. Calcula a diferença efetiva entre a precipitação e a evaporação. Este tipo de método apresenta limitação quanto á disponibilidade de dados;
- (c) **Balço hídrico isotópico:** Utiliza-se das propriedades químicas da água para determinar a sua fonte e quantificar cada componente do sistema. A água apresenta um tipo particular de isótopos para cada fonte específica (TUCCI, 1997), o que ajuda a compreender os processos hídricos em sub-superfície. Os isótopos de um elemento químico possuem mesmo número atômico e massa diferente. A diferença de massa é provocada pela variação do número de nêutrons do elemento (SILVEIRA & SILVA JÚNIOR, 1998). O processo de evaporação, metabolismo das plantas, mudanças climáticas e reações com o solo e as rochas, na atmosfera (chuva) e, ou, em sub-superfície (lençol freático), modificam a composição atômica da água (CLARK & FRITZ, 1997). Os isótopos mais utilizados em estudos hidrológicos no Brasil são  $^{18}\text{O}$ ,  $^2\text{H}$  e  $^3\text{H}$ , especialmente porque são os principais constituintes da água. (SILVEIRA & SIVA JÚNIOR, 1998);
- (d) **Balços energéticos:** Através do balanço de calor disponível na superfície considerada, determina-se a evaporação ou a evapotranspiração, componentes essenciais do balanço hídrico. É empregado principalmente em lagos, reservatórios ou trechos de rios;
- (e) **Balço hídrico por modelos matemáticos:** Os modelos matemáticos destinados ao balanço hídrico utilizam equações para estimar, no tempo e no espaço, os principais fenômenos envolvidos na dinâmica hídrica do sistema;
- (f) **Balço hídrico agrícola:** É direcionado à determinação da necessidade ou disponibilidade hídrica real aos cultivos agrícolas (TEIXEIRA & LAGES, 1996). O objetivo mais comum do balanço hídrico agrícola é quantificar o volume a ser irrigado para manutenção da umidade do solo cultivado próximo da capacidade de campo;
- (g) **Balço hídrico climatológico:** O balanço hídrico climatológico é a contabilidade hídrica no solo (THORNTHWAITE, 1948) para fins climatológicos, ou seja, para classificação climática (THORNTHWAITE & MATHER, 1955; OMETTO, 1981; PEREIRA *et al.*, 1997). Com ele delimitam-se intervalos de deficiências e excedentes hídricos para a região em estudo.

### 3.2.4 Metodologias de determinação do balanço hídrico

Para CAMARGO & PEREIRA (1990) e SOUZA (2001), uma outra classificação de modelos de balanços hídricos pode ser obtida, quando o objetivo do monitoramento for quantificar as necessidades de água das culturas nos seus estágios de desenvolvimento. Assim, são eles:

- (a) **Modelos pedológicos:** A condição hídrica do solo é monitorada baseando-se no teor de umidade, determinada por diferentes métodos;
- (b) **Modelos físicos:** Baseia-se na relação entre teor de umidade e tensão de água no solo. Assim, a umidade pode ser acompanhada indiretamente, através da tensão de água no solo. Um dos instrumentos mais utilizados para a avaliação da umidade em solos agrícolas é o tensiômetro. Os tensiômetros são os únicos instrumentos que fornecem medidas diretas de tensão;
- (c) **Modelos fisiológicos:** Os modelos fisiológicos relacionam a deficiência de água no solo com as reações da planta. Desta forma, a planta se torna instrumento de monitoramento da condição hídrica do solo;
- (d) **Modelos irrigacionistas:** Utiliza valores de  $ET_0$  determinados por meio de algum método de estimativa (Tanque Classe A, Thornthwaite, Penman, entre outros) e coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) da cultura para determinar a lâmina de água a ser aplicada no solo ( $ET_c$ ). O objetivo principal consiste na manutenção da condição hídrica ideal para a planta, ou seja, a umidade da capacidade de campo ( $CC$ );
- (e) **Modelos climatológicos:** Os modelos climatológicos de realização do balanço hídrico consideram a precipitação e a evapotranspiração da cultura para determinar potenciais deficiências hídricas e realizar a suplementação de forma racional.

A escolha do modelo de balanço hídrico mais adequado é determinada principalmente pelo grau de conhecimento do sistema solo/planta/atmosfera (SOUZA, 2001). Modelos mais complexos são mais exigentes em dados do solo, cultura e atmosfera, o que pode inviabilizar a sua utilização.

O balanço hídrico climatológico é utilizado em inúmeros trabalhos científicos, sendo adaptado às necessidades de cada área do conhecimento. THORNTHWAITE (1948) classifica

o balanço hídrico climatológico como uma ferramenta para obtenção de dados indispensáveis em trabalhos e pesquisas agrometeorológicas (CAMARGO & CAMARGO, 2000).

Em geral, o balanço hídrico climatológico é realizado com os dados climáticos normais da região, as normais climatológicas que estabelecem a condição do clima local. No entanto, nada impede que o mesmo seja determinado a partir de dados instantâneos. A metodologia mais freqüente de balanço hídrico é a de THORNTHWAITE & MATHER (1955). Autores como FONTANA *et al.* (1998), FRANKE (1997), MARIN *et al.* (2000) e SOUZA (2001) adotaram essa metodologia de balanço hídrico climatológico em diversas modalidades de monitoramento.

As normais climatológicas de um local correspondem aos dados climáticos médios, obtidos a partir de uma série histórica. Recomenda-se, para dados de precipitação pluvial, uma série histórica maior que 30 anos, para obtenção de normais confiáveis (PEREIRA *et al.*, 2002).

### **3.2.5 Balanço hídrico de THORNTHWAITE & MATHER (1955)**

O processo mais utilizado de contabilidade hídrica no solo para fins agrícolas é o de THORNTHWAITE & MATHER (1955) (WILLMOTT *et al.*, 1985; DOURADO NETO & VAN LIER, 1993; CAMARGO & CAMARGO, 2000). De acordo com PEREIRA & CAMARGO (1989), o método tem se mostrado eficiente para programar e definir diversas atividades agrícolas.

O balanço hídrico proposto por THORNTHWAITE & MATHER (1955) é um método que permite a estimativa da evapotranspiração, sendo que o volume de água armazenada no solo determina a taxa de evapotranspiração real. Quanto mais seco estiver o solo, mais difícil será a evapotranspiração.

#### **3.2.5.1 Processo de cálculo do balanço hídrico de THORNTHWAITE & MATHER (1955)**

O balanço hídrico proposto por THORNTHWAITE & MATHER (1955) consiste em um quadro com colunas, onde são dispostos valores de precipitação ( $P$ ) e evapotranspiração ( $ET$ ), podendo variar da escala diária até mensal. A partir destas duas colunas e com o valor da capacidade de água disponível ( $CAD$ ) apropriada ao tipo de planta cultivada e solo, o balanço hídrico climatológico fornece as estimativas, em milímetros, da evapotranspiração

real ( $ER$ ), deficiência hídrica ( $DEF$ ), excedente hídrico ( $EXC$ ) e armazenamento de água no solo ( $ARM$ ). Maiores informações sobre o preenchimento da planilha de cálculo do balanço hídrico climatológico poderá ser encontrada em OMETTO (1981), TUBELLIS (1986) e PEREIRA *et al.* (1997).

### 3.2.5.2 Componentes do balanço hídrico

O balanço hídrico contabiliza entradas e saídas de água num dado volume de solo vegetado. A entrada da água no sistema pode ser subdividida em irrigação ( $I$ ), precipitação pluvial ou chuva ( $P$ ), orvalho ( $O$ ), ascensão capilar ( $AC$ ), escoamento superficial ( $ES_E$ ) e drenagem lateral ( $DL_E$ ). A saída, por sua vez, ocorre por evapotranspiração ( $ET$ ), drenagem lateral ( $DL_S$ ) e profunda ( $DP$ ), e escoamento superficial ( $ES_S$ ) (OMETTO, 1981; PEREIRA *et al.*, 1997). O balanço hídrico segue o princípio de conservação de massa, assim, o somatório de todas as suas componentes deverá ser nulo.

$$I + P + O + AC + ES_E + DL_E - ET - DL_S - DP - ES_S = \pm ARM$$

Em sistemas agrícolas, uma componente do balanço hídrico deve ser considerada na contabilidade quando interferir no armazenamento ( $ARM$ ) da água no solo, ou ainda, quando puder ser aproveitada pelas plantas (OMETTO, 1981). Assim, pode-se encontrar na literatura a relação das seguintes afirmações a respeito de algumas componentes do balanço hídrico:

- O orvalho, por exemplo, representa uma contribuição pequena, com um máximo de  $0,5 \text{ mm}\cdot\text{dia}^{-1}$  em locais úmidos;
- O escoamento superficial de entrada ( $ES_E$ ) e de saída ( $ES_S$ ), bem como a drenagem lateral de entrada ( $DL_E$ ) e de saída ( $DL_S$ ), geralmente tendem a se anular (PEREIRA *et al.*, 1997);
- Como a variação de armazenamento de água ocorre na camada onde se encontra aproximadamente 80% do sistema radicular da planta (profundidade efetiva) em questão, a drenagem profunda é contabilizada como excesso (OMETTO, 1981);
- A ascensão capilar pode ser desprezível em solos profundos (PEREIRA *et al.*, 1997).
- A chuva e a evapotranspiração são as componentes de entrada e saída mais importantes de água do solo. A irrigação representa uma prática de manejo que pode ser adotada ou suprimida do sistema conforme a necessidade e não é considerada uma componente de natureza climática.

### 3.3 MODELOS COMPUTACIONAIS QUE CONSIDERAM A REALIZAÇÃO DE UM BALANÇO HÍDRICO PARA A AGRICULTURA IRRIGADA

De acordo com CASTRO *et al.* (2002) os programas direcionados ao planejamento operacional de sistemas de irrigação diferem entre si basicamente pela linguagem de programação, grau de complexidade do algoritmo, dados requeridos e precisão dos resultados. D'ANGIOLELLA & VASCONCELLOS (2001) acrescentam que o avanço da informática permitiu a geração de diversos programas para estimativa da evapotranspiração e para o cálculo do Balanço Hídrico. CASTRO *et al.* (2002) citam como exemplo de programas direcionados ao planejamento operacional da irrigação, aqueles desenvolvidos por WINDSOR & CHOW (1971), DEAN (1980), TRACY & MARINO (1989), LEME & CHAUDHRY (1992), PRAJAMWONG *et al.* (1997) e CASTRO (2001).

Os parágrafos a seguir apresentam uma série de modelos computacionais que foram desenvolvidos visando auxiliar a realização de projetos, planejamento e, ou, manejo da agricultura irrigada, e que de alguma forma consideram a realização de um balanço hídrico em seu interior.

O Modelo *Tobruk* desenvolvido por CASTRO (2001), contraria a maioria dos programas de planejamento da irrigação, pois determina iterativamente a lâmina de irrigação que proporciona o maior retorno econômico e não a máxima produção física. O programa foi desenvolvido em ambiente *Windows* na linguagem de programação *DELPHI* 5.0. Os dados necessários para o processamento são aqueles relacionados à cultura (informações sobre plantio, coeficiente de cultivo, função água-produção), ao local de irrigação (características físicas do solo, precipitação e evapotranspiração), ao sistema de irrigação (tipo, lâmina de projeto, eficiência de irrigação, turno de rega e jornada de trabalho) e as informações sobre custos e receitas da cultura irrigada.

O programa de balanço hídrico desenvolvido por BARBIERI *et al.* (1991) foi empregado por PICINI *et al.* (1999) na estimativa da disponibilidade hídrica do solo. A estrutura do modelo desenvolvido pelos autores segue a metodologia de THORNTHWAITE & MATHER (1955) para dados normais e seqüenciais agrupados em períodos mensais ou decendiais. Os dados de entrada para o programa são: a capacidade de água disponível (*CAD*), dada em função das características físico-hídricas do solo (umidade de capacidade de campo, ponto de murcha permanente, densidade global do solo), precipitação e a evapotranspiração.

D'ANGIOLELLA & VASCONCELLOS (2001) elaboraram planilhas de cálculo do balanço hídrico climatológico conforme a metodologia de THORNTHWAITE & MATHER (1955). Essa ferramenta foi desenvolvida em ambiente *Microsoft Excel* 2000 e possibilita estimar a evapotranspiração potencial por cinco diferentes métodos, a citar: THORNTHWAITE (1948), Tanque Classe A, Penman-Monteith, Hargreaves & Samani, Blaney & Criddle. Além da precipitação, os dados de entrada para a realização do Balanço Hídrico variam conforme o método de estimativa da evapotranspiração potencial. A estimativa da evapotranspiração e o cálculo do balanço hídrico também podem ser realizados com o Modelo *Cropwat 7.0* da *FAO* (D'ANGIOLELLA & VASCONCELLOS, 2001).

O Modelo *SARRA-Br* (Sistema de Análise Regional do Risco Agroclimático-Brasil) foi baseado no *SARRA* proposto por FOREST & CLOPES (1994) e possui um módulo para simulação do balanço hídrico diário denominado *BRASDHC* (Brasil – Diagnóstico Hídrico das Culturas). O *BRASDHC* é derivado do modelo *BIP* ou *BIPODE* desenvolvido por FOREST (1984), testado por ASSAD (1986) e modificado por FRÉTEAUD *et al.* (1987), VAKSMANN (1990) e AFFHOLDER (1995). As principais variáveis e dados de entrada são: *CAD* (capacidade de água disponível), profundidade máxima do sistema radicular e do solo, lâmina infiltrada, evapotranspiração de referência e índice de área foliar (*IAF*). O modelo apresenta como resultados os dados diários de evapotranspiração real e evapotranspiração sem restrição de água no solo, profundidade da frente de umedecimento do solo, armazenamento e a percolação (AFFHOLDER *et al.*, 1997)

SARMA *et al.* (1980) desenvolveram um programa que calcula a evapotranspiração diária como resíduo da equação do balanço hídrico. O perfil de umidade do solo, obtido com valores tensiométricos medidos no campo, bem como a curva característica do solo (tensão vs. conteúdo de água), são utilizados como entrada para o modelo. O programa avalia o efeito da precipitação e da irrigação durante os períodos de observação e também calcula a perda de água por drenagem profunda. O programa é capaz de calcular a umidade potencial, o conteúdo de umidade e a condutividade hidráulica do solo para a profundidade que os tensiômetros foram instalados e para a camada entre dois pontos de medida. A infiltração por chuva ou irrigação, juntamente com a retenção superficial e o escoamento superficial também podem ser determinados pelo *software*.

MARQUES (2005) desenvolveu um modelo computacional em *DELPHI 7.0* que possibilita determinar o risco econômico em culturas irrigadas, simulando situações de implantação e manejo da irrigação e suas conseqüências econômicas. Além de uma série de características econômicas, o modelo também considera as características da cultura e realiza o balanço hídrico, onde são estimadas as lâminas brutas mensais de irrigação mediante o cálculo diário das irrigações necessárias. A autora destaca também a importância da informática na agricultura e relaciona alguns programas que se destacam na área de irrigação. Dentre eles estão os desenvolvidos por VAN LIER & DOURADO NETO (1991), MOREIRA & TORRES FILHO (1993), HERNANDEZ *et al.* (1995), MARQUES *et al.* (2002), SRIVASTAVA *et al.* (2003).

SOUZA (2001) desenvolveu, em linguagem *Visual Basic (macros)*, um modelo denominado “Modelo para a análise de risco econômico aplicado ao planejamento de projetos de irrigação para a cultura do cafeeiro (*MORETTI*)”, que possibilita a composição de cenários a partir da seleção de sistemas de irrigação, criação de manejos de irrigação, seleção de fontes de energia (diesel e elétrica), escolha entre tipos de tarifação da energia elétrica e realização da estimativa de um custo de produção para a irrigação de culturas perenes entre outras opções. O Modelo é constituído por módulos, dentre eles o módulo “Balanço hídrico climatológico decenal” possibilita a simulação de 10.000 anos de balanço hídrico com base em dados edafo-climáticos inseridos pelo usuário. Os principais dados de entrada no módulo são as umidades de capacidade de campo e ponto de murcha permanente, o fator  $p$  de água disponível no solo, a profundidade do sistema radicular, os parâmetros estatísticos da chuva e  $ETo$  e o coeficiente de cultivo. A evapotranspiração é simulada por diferentes distribuições de probabilidade baseando-se na metodologia de Monte Carlo. Também possibilita a escolha de modelos estatísticos de estimativa do armazenamento em função do negativo acumulado. Considerando o modelo como um todo, a realização do balanço hídrico tem a finalidade de quantificar: a irrigação necessária em função do manejo da irrigação; o custo com energia para bombear a quantidade de água a ser irrigada; o custo com água para irrigação; e a produtividade alcançada com a cultura, simulada por meio de uma função de produção que leva em consideração a deficiência hídrica.

### **3.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS COMPONENTES PRECIPITAÇÃO E EVAPO-TRANSPIRAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO**

As formas de entrada e saída de água mais representativas da dinâmica da água do solo agrícola são a precipitação, especialmente na forma de chuva ou precipitação pluvial, e a evapotranspiração. Estas duas componentes são fundamentais para a realização do balanço hídrico na maioria dos modelos relacionados no item anterior. Algumas considerações e particularidades destas duas componentes, além de considerações sobre armazenamento da água no solo, estão relacionadas nos próximos subitens.

#### **3.4.1 Precipitação pluvial ou chuva**

A precipitação pluvial, mais conhecida como chuva, representa o retorno da água, na forma líquida, da atmosfera para o solo. A condensação do vapor de água, evaporado e transpirado para a atmosfera, inicia na presença de núcleos de condensação devido à saturação do ar por resfriamento ou descompressão adiabática (TUBELIS & NASCIMENTO, 1986; PEREIRA *et al.*, 2002).

A ocorrência da chuva varia, conforme o clima, de região para região. É um fenômeno aleatório, pois apresenta quantidade e distribuição variáveis de uma região para outra. A disponibilidade de séries históricas locais possibilita a representação da precipitação por modelos, em termos probabilísticos. Estes modelos apresentam-se úteis em diversas atividades agrícolas, tais como: semeadura, preparo do solo, irrigação, colheita, proteção e conservação de solos, dimensionamento de reservatórios, entre outros (OLIVEIRA *et al.*, 1997; RIBEIRO & LUNARDI, 1997a, RIBEIRO & LUNARDI, 1997b; SOUZA, 2001).

Dentre as formas de precipitação atmosférica, a chuva é a mais importante, sendo o principal suprimento de água em cultivos agrícolas. Para SILVA *et al.* (1998), a chuva, juntamente com a evapotranspiração, são elementos agroclimáticos que definem a produtividade das culturas. CAMARGO & CAMARGO (2000) classificam a chuva e a evapotranspiração potencial como elementos meteorológicos de sentidos opostos. Para QUEIROZ (2001), o suprimento das exigências hídricas é essencial para a obtenção de altas produtividades e estabilidade no rendimento das espécies cultivadas.

Em geral, na agricultura, além da quantidade e intensidade, o mais importante é a frequência de ocorrência do fenômeno, ou seja, o número de eventos no intervalo de tempo

(ASSIS, 1991). A avaliação quantitativa da precipitação regional é importante para a produção vegetal, manejo dos recursos hídricos e avaliação ambiental.

O padrão pluviométrico de uma região pode ser descrito, com certo grau de precisão, a partir de séries históricas consistentes, ou seja, com um número mínimo de dados (CASTRO, 1994). Para ASSIS *et al.* (1996), uma série consistente de dados pluviométricos deve ter mais de 30 anos.

Estatisticamente, a precipitação pluviométrica não se distribui em torno da precipitação média, mas sim de forma irregular (BARGER & THOM, 1949; KREPPER *et al.*, 1989; RIBEIRO & LUNARDI, 1997b). Estudos probabilísticos têm sido realizados a fim de prever a tendência da precipitação. Utilizam-se para isso as frequências observadas obtidas das séries históricas ou de modelos teóricos (ASSIS, 1991).

### **3.4.2 Evapotranspiração**

O termo *Evapotranspiração* corresponde ao somatório dos fenômenos de evaporação e transpiração em superfícies naturais.

A evaporação consiste num processo físico, diretamente relacionado à disponibilidade de energia na superfície considerada. A principal fonte de energia para suprir a demanda da evapotranspiração é a radiação solar (OMETTO, 1981). A energia advectiva também é uma importante fonte de energia para a evapotranspiração, pois transfere calor sensível e energia latente da área seca para o campo de estudo (CAMARGO & CAMARGO, 2000).

A transpiração é um fenômeno biológico, determinado não somente pelas condições energéticas do sistema, mas também por características do próprio vegetal. A transpiração é diretamente proporcional ao armazenamento de água no solo. Em condições de atmosfera deficiente em água, um vegetal transpira potencialmente quando houver umidade suficiente no solo (OMETTO, 1981; MOTA, 1989; PEREIRA *et al.*, 1997; PEREIRA *et al.*, 2002).

Para MATHER (1958), a introdução do conceito de evapotranspiração potencial por THORNTHWAITE & WILM (1944) foi o mais significativo avanço no entendimento da umidade como elemento do clima. THORNTHWAITE & WILM (1944) pretendiam representar com a evapotranspiração potencial, a necessidade de água da vegetação, de forma similar a precipitação pluvial. (CAMARGO & CAMARGO, 2000)

A *evapotranspiração potencial (ETp)* é definida como a perda de água para a atmosfera, por uma superfície natural, sem restrição hídrica para transpiração e evaporação no solo (OMETTO, 1981; TUBELLIS & NASCIMENTO, 1986; PEREIRA *et al.*, 1997; CAMARGO & CAMARGO, 2000). Para PENMAN (1956), a expressão *Evaporação natural* representa melhor o elemento meteorológico *ETp*. DOOREMBOS & PRUITT (1975), estabeleceram a grama batatais (*Paspalum notatum Flugge*) como cobertura vegetal padronizada para o solo, e denominaram a *ETp* sob esta condição de *evapotranspiração de referência (ETo)*.

Quanto menor o armazenamento de água no solo, maior será a limitação imposta pela planta e pelo solo à evapotranspiração, que será menor que a potencial. A evapotranspiração real (*ER*) é a perda de água de uma superfície natural, em qualquer condição de umidade e de cobertura vegetal (PEREIRA *et al.*, 1997; CAMARGO & CAMARGO, 2000). A evapotranspiração real é um caso especial da evapotranspiração potencial. A evapotranspiração em sistemas agrícolas normalmente não é potencial, devido a variações de umidade e cobertura do solo. Os campos agrícolas não promovem também uma cobertura homogênea ao solo durante todo o ciclo de cultivo, ou seja, há variação no índice de área foliar (*IAF*) e no coeficiente de cultivo (*Kc*).

O índice de área foliar (*IAF*) expressa a relação entre as áreas foliar e a área ocupada pela planta e tem relação direta com a evapotranspiração. O coeficiente de cultivo (*Kc*) é a relação entre a evapotranspiração da cultura (*ETc*) sem deficiência hídrica, em qualquer estágio de desenvolvimento e a evapotranspiração de referência (*ETo*) correspondente (DOORENBOS & PRUITT, 1977; CAMARGO & PEREIRA, 1990).

A condição de umidade de solos com cobertura natural ou sob cultivos agrícolas, normalmente é determinada pelo regime pluviométrico da região. Desta forma, há uma variação do armazenamento de água, tanto maior quanto mais energia estiver disponível no dossel das plantas. Este somatório de características faz com que não sejam satisfeitas as condições padrão, determinadas para a expressão da evapotranspiração potencial. Assim, denomina-se *evapotranspiração da cultura* ou *evapotranspiração máxima de cultura (ETc)*, a quantidade de água utilizada por uma cultura, em qualquer fase de desenvolvimento, sem restrição hídrica. Nos cultivos agrícolas, quando a condição hídrica não é satisfeita, ocorre a *evapotranspiração real da cultura* (PEREIRA *et al.*, 2002).

### 3.4.2.1 Determinação da Evapotranspiração de referência ou potencial

A evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) pode ser medida com lisímetros ou evapotranspirômetros, ou ainda estimada, por modelos teóricos embasados no clima, solo e planta. A coleta de dados diários de evapotranspiração é onerosa e trabalhosa, no entanto é essencial para suprir as necessidades de dados para aferição dos modelos de estimativa, e determinar o consumo de água das culturas de interesse. A coleta destes dados normalmente é feita em estações meteorológicas de institutos de pesquisa (CAMARGO, 1966; OMETTO, 1981; SOUZA, 2001).

Diversos métodos de estimativa da evapotranspiração potencial para fins climatológicos são citados na literatura. DOORENBOS & PRUITT (1977) relacionaram 31 modelos de estimativa da  $ET_o$ . SEDIYAMA (1987) apontou a existência de mais de 50 métodos de cálculo, descrevendo os 10 mais utilizados na época. PEREIRA *et al.* (1997) detalharam 17 métodos de estimativa da evapotranspiração de referência e os distribuiu nas categorias: empírico, aerodinâmico, balanço de energia, combinado e correlação dos turbilhões.

Mediante a apreciação de inúmeros trabalhos de pesquisa envolvendo a estimativa da  $ET_o$ , SOUZA (2001) destaca que é interessante observar o número de vezes em que os métodos de Thornthwaite, Tanque Classe A, Penman e Penman-Monteith foram utilizados. Os métodos de Thornthwaite e Tanque Classe A são utilizados com frequência devido à simplicidade e rapidez nos cálculos, no entanto, a precisão e exatidão das suas estimativas dependem muito do local e da época do ano em que foram realizados os trabalhos. Os métodos de Penman e Penman-Monteith são utilizados por serem mais consistentes e terem condições de estimar melhor a  $ET_o$  na escala diária. No entanto, o grande número de informações climáticas necessárias mostra-se como o principal empecilho para o emprego generalizado dos mesmos, já que em algumas regiões brasileiras não é possível encontrar nem dados de temperatura.

O método de Thornthwaite tem sido bastante criticado por utilizar apenas a temperatura do ar como variável independente, no entanto, PEREIRA *et al.* (1997) comenta que a crítica é injusta, pois inúmeros outros métodos utilizam apenas a temperatura como condicionante da  $ET_o$ .

### 3.4.3 Chuva e evapotranspiração prováveis

A chuva ou precipitação provável é a lâmina mínima de precipitação atmosférica, principalmente na forma de chuva ou precipitação pluvial, estimada por meio de uma função densidade de probabilidade, que ocorre a um determinado nível de probabilidade estatística (FRIZZONE, 1979; ARAUJO *et al.*, 2001; SOUZA, 2001; OLIVEIRA & CARVALHO, 2003;). Segundo CASTRO *et al.* (1994) a utilização da precipitação média no dimensionamento de projetos agrícolas no Brasil é comum e este fato constitui-se em um risco para o produtor.

A adoção da chuva provável é recomendada para proporcionar um planejamento e dimensionamento mais adequado dos sistemas de irrigação, pois os valores médios apresentam coeficientes de variação maiores que 100%, não constituindo uma boa referência para essa componente climática (DOOREMBOS & PRUITT, 1977; BERNARDO, 1989; SAMPAIO *et al.*, 1999; SAMPAIO *et al.*, 2000; OLIVEIRA & CARVALHO, 2003). Para VILLELA & MATTOS (1975) e ARAUJO *et al.* (2001) os valores de chuva provável também são de extrema importância para o dimensionamento de vertedouros de barragens, canais, galerias pluviais, bueiros e barragens de abastecimento de água.

A evapotranspiração provável é a lâmina máxima de evapotranspiração, estimada por uma função densidade de probabilidade, que pode ser igualada ou superada para um determinado nível de probabilidade estatística (SOUZA, 2001). Os valores prováveis de evapotranspiração são normalmente maiores que as médias.

BASTOS *et al.* (1994) exemplificam que o conhecimento de diferentes níveis de probabilidade de um evento meteorológico, como a *ET<sub>o</sub>* de um determinado local, possibilita ao projetista quantificar a vazão necessária para irrigar uma determinada área, escolhendo para tal valores representativos e confiáveis de *ET<sub>o</sub>*, de acordo com o retorno econômico e social preconizado para o projeto em questão.

#### 3.4.3.1 Distribuições de probabilidade

##### (a) Chuva

A precipitação pluvial decendial normalmente segue a distribuição de probabilidade gama. A bibliografia é contundente em apontar essa distribuição de probabilidade para a chuva em períodos curtos de tempo. THOM (1958), SILVA (1987) e ASSIS *et al.* (1996)

comentam que a função gama possui bom ajuste para a chuva mensal ou agrupada em períodos menores. De acordo com CASTRO (1994) a tendência da precipitação pluvial pode ser adequadamente representada pela distribuição gama incompleta, pois pode ocorrer a ausência de chuva (precipitação zero). SAAD (1990) também verificou que a distribuição gama foi adequada para explicar a distribuição da precipitação da região de Piracicaba-SP para períodos de cinco, dez, quinze e trinta dias.

#### **(b) Evapotranspiração**

Para SILVA (1987) a distribuição Gumbel de frequência é a que melhor representa a tendência da evapotranspiração máxima de referência, temperatura máxima e mínima. Por outro lado, para esse mesmo autor, a temperatura média mensal segue a função densidade de probabilidade normal. A distribuição Gumbel é frequentemente adotada para valores climáticos extremos (BACK, 1996). BASTOS *et al* (1994) também ajustaram a distribuição Gumbel a dados diários e acumulados de 2 a 7 dias de evapotranspiração potencial máxima para Teresina-PI. FIETZ & URCHEI (2002), estudando a distribuição de frequência da evapotranspiração de referência em períodos de 5, 10, 15, 20, 25 e 30 dias para a região de Dourados-MS, encontraram bom ajuste a distribuição normal pelo teste de Kolmogorov-Smirnov a 5% de significância estatística.

#### **3.4.3.2 Nível de probabilidade para chuva e *ET<sub>o</sub>***

Para JENSEN (1983), os valores de probabilidade são variáveis e podem ser adotados considerando o risco econômico de redução na qualidade e quantidade de produção decorrente da deficiência hídrica causada pela supervalorização das alturas de precipitação. Esse princípio também pode ser adotado para valores de evapotranspiração provável, considerando-se um nível de probabilidade equivalente ao selecionado para a precipitação provável.

CASTRO *et al.* (2002) visando determinar a lâmina ótima de irrigação com o programa *Tobruk* utilizou o nível de 80% de probabilidade para estimar a precipitação e evapotranspiração prováveis. BERNARDO (1989) destaca que o nível de probabilidade mais adequado para trabalhos com precipitação provável em meio agrícola não deve ser inferior a 75% ou 80%, ou seja, uma lâmina mínima de água que pode ocorrer em 3 anos, de uma seqüência de 4 anos. Diversos outros autores, como FRIZZONE *et al.* (1985), CUNHA *et al.* (1997), RIBEIRO & LUNARDI (1997a) e FRIZZONE *et al.* (2005) destacam o nível de probabilidade de 75 % para estimar a chuva provável ou de projeto.

### 3.4.4 Armazenamento de água no solo

A quantidade de água retida no perfil do solo é importante para o desenvolvimento dos vegetais. A água fica retida na superfície das partículas do solo. Solos com textura arenosa apresentam menor capacidade de retenção de água, quando comparado a solos argilosos e siltosos. Esta propriedade é função da superfície específica dos constituintes do solo.

A lâmina de água armazenada no solo também é função da profundidade do perfil ( $z$ ), que por sua vez determina a dimensão do volume de controle. Quanto mais profundo o solo, mais água será retida. Em cultivos agrícolas, normalmente as culturas exploram diferentes horizontes, em função do seu sistema radicular, conferindo uma variação contínua ao armazenamento (OMETTO, 1981; TUBELIS & NASCIMENTO, 1986; PEREIRA *et al.*, 1997).

Do volume total de água armazenada no solo, a porção de água capilar compreendida entre as umidades de capacidade de campo e ponto de murcha permanente é denominada *CAD* (BERNARDO, 1989). Entretanto, devido à variação no poder de extração de água do solo pelos vegetais, apenas uma fração ( $p$ ) (RIJTEMA & ABOUKHALED, 1975; DOURADO NETO & JONG VAN LIER, 1993) da *CAD* é prontamente disponível para as plantas absorverem sem prejuízo no crescimento. Esta porção é denominada água disponível (*AD*) (PEREIRA *et al.*, 1997).

Para a determinação da capacidade de água disponível (*CAD*), num dado volume de solo, é necessário conhecer a densidade aparente do solo, a profundidade do perfil explorado pelas raízes, bem como a umidade na capacidade de campo e ponto de murcha permanente (PEREIRA *et al.*, 1997).

A umidade da capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ) representa o máximo teor de água retido no solo contra a força da gravidade. Na prática, a  $\theta_{cc}$  é alcançada com a saturação e drenagem do excesso de água do perfil do solo. Em solos permeáveis de textura média, a condição de capacidade de campo ocorre aproximadamente 2 a 3 dias após uma chuva ou irrigação (REICHARDT, 1988; SOUZA, 2001).

Ponto de murcha permanente ( $\theta_{pmp}$ ) é o limite mínimo de umidade do solo em que as plantas se mantêm murchas e não retomam a turgidez quando restabelecida a condição hídrica favorável à sobrevivência das mesmas (VEIHMEYER & HENDRICKSON, 1949).

O armazenamento de água em um determinado tipo de solo ao longo do tempo pode ser estimado por meio da realização de um balanço hídrico, tendo-se as medidas de evapotranspiração e precipitação pluvial. Desta forma, a água disponível (*AD*) será uma função da quantidade e distribuição da chuva ao longo do ciclo da cultura, da taxa de infiltração, *CAD* e do tipo de cultura. A infiltração e a *CAD* relacionam-se com a porosidade do solo. A infiltração é favorecida pelos macroporos e a retenção pelos microporos (SANTANA & NAIME, 1978; SOUZA, 2001).

#### **3.4.4.1 Medida e estimativa do armazenamento**

O armazenamento da água no solo pode ser medido diretamente no campo ou estimado a partir de dados meteorológicos. A estimativa do conteúdo de água no solo pode ser feita por meio de vários métodos (tensiométrico, elétrico, dispersão de nêutrons e secagem).

A estimativa do armazenamento da água no solo pode ser realizada também a partir de uma série de modelos (equações) que são apresentados na bibliografia. Dentre eles, certamente a equação de THORNTHWAITE & MATHER (1955) é a mais utilizada para a estimativa do conteúdo de água armazenada no solo. Inúmeros são os trabalhos que utilizaram este método para monitoramento da água no solo.

Outro modelo estatístico para estimativa do armazenamento e negativo acumulado é o desenvolvido e aplicado por BRAGA (1982) em um balanço hídrico modificado, quando caracterizou a seca agrônômica para a região de Laguna-SC. Esse autor, seguindo as considerações de RIJITEMA & ABOUKHALED (1975), também propôs que a perda de água ocorre linearmente durante a retirada da água disponível (*AD*) do solo, ou seja, na zona úmida; e exponencial, conforme THORNTHWAITE & MATHER (1955), para a zona seca, ou seja, para armazenamentos menores que  $(1 - AD) \cdot CAD$ .

DOURADO NETO & VAN LIER (1993) visando identificar os melhores modelos de estimativa do armazenamento em função do negativo acumulado e vice-versa, realizaram um estudo envolvendo a comparação de 11 modelos estatísticos – funções matemáticas. São eles: THORNTHWAITE & MATHER (1955); BRAGA (1982); Potencial de primeira ordem (RIJITEMA & ABOUKHALED, 1975); Potencial de segunda ordem; Potencial de terceira ordem; Cúbico; Logarítmico; Co-senoidal; Potencial de primeira ordem-senoidal; Potencial de segunda ordem-senoidal; Senoidal-quadrático e Senoidal-logarítmico. Baseando-se em 14 condições formuladas a partir do conhecimento empírico do processo de evapotranspiração na

camada compreendida pelo sistema radicular, os autores concluíram que o método mais eficiente na estimativa do armazenamento foi o Co-senoidal, sendo recomendado para cálculos de balanço hídrico.

SOUZA (2001) contempla em seu modelo a equação exponencial (THORNTHWAITE & MATHER, 1955) e Potencial de primeira ordem (RIJITEMA & ABOUKHALED, 1975), a qual denomina de linear-exponencial.

#### 3.4.4.2 Modelo *SPLINTEX*

A estimativa do volume total de água armazenada no solo nos modelos de balanço hídrico necessita das umidades de capacidade de campo e ponto de murcha permanente, além da profundidade efetiva do sistema radicular e densidade do solo. Estes dados são fundamentais para calcular a capacidade de água disponível (*CAD*) de um determinado solo.

A estimativa das propriedades hidráulicas de um solo por funções de pedotransferência para o cálculo da capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ) e ponto de murcha permanente ( $\theta_{pmp}$ ), não tem a mesma precisão dos resultados medidos, porém é uma alternativa simplificada, rápida e barata para a resolução de problemas hidrológicos (SIQUEIRA & PREVEDELLO, 2005<sup>1</sup>).

O programa numérico de pedotransferência *SPLINTEX* (PREVEDELLO, 2002<sup>2</sup>) determina, para a curva de retenção de água no solo, os parâmetros independentes alfa ( $\alpha$ ), umidade residual ( $\theta_r$ ), umidade de saturação ( $\theta_s$ ), “eme” ( $m$ ) e “ene” ( $n$ ) do modelo de VAN GENUCHTEN (1980). A obtenção destes parâmetros possibilita a estimativa dos valores de  $\theta_{cc}$  e  $\theta_{pmp}$  com o referido modelo. O programa *SPLINTEX* assume que a curva de distribuição acumulada das classes de textura tem a mesma forma da curva de retenção de água no solo. Com isso, é possível transladar uma curva na outra utilizando a função *spline* cúbica e o algoritmo de ARYA & PARIS (1981).

Ao considerar o tamanho e a distribuição de partículas e não de poros, o modelo pode assumir desvios na curva de retenção de água no solo. Esses desvios são minimizados quando o usuário possui um ponto experimental da curva de retenção. Em caso negativo, o programa

<sup>1</sup> SIQUEIRA A.B.C.; PREVEDELLO, C.L. **Estimativa das propriedades hidráulicas de solos brasileiros por funções de pedotransferência: uma análise comparativa.** Comunicação pessoal, 2005.

<sup>2</sup> PREVEDELLO, C.L. **Programa SPLINTEX para estimar a curva de retenção de água a partir da granulometria (composição) do solo – Versão 1.0.** Publicação em meio magnético. Comunicação pessoal, 2002.

assume uma correção automática baseada na relação da umidade retida na tensão de 330 cm de coluna de água com os teores de silte + argila, conforme ARRUDA *et al.* (1987).

Os dados mínimos para a utilização do programa são as porcentagens acumuladas das classes de textura, densidade do solo e de partícula. Para uma melhor qualidade dos parâmetros obtidos pode ser inserida a umidade de saturação medida e um ponto experimental da curva de saturação.

### **3.5 PROCESSO DE SIMULAÇÃO**

Em modelos de balanço hídrico, como o desenvolvido por SOUZA (2001), é comum a utilização do processo de simulação visando a estimativa dos componentes do balanço hídrico sequencial a partir de uma pequena série de dados edafo-climáticos de entrada. As simulações são importantes para permitir a realização de estudos de casos e cenários de interesse. No entanto, para ser confiável o processo de simulação necessita a princípio de um bom processo de geração de números aleatórios ou randômicos.

#### **3.5.1 Números aleatórios ou randômicos**

A importância dos números aleatórios (*NA*) para a modelagem em diversas áreas do conhecimento é indiscutível. Para o processo de simulação de Monte Carlo, um dos mais empregados, a qualidade dos *NA* é fundamental independente do objeto de estudo.

Inúmeras pesquisas utilizam tabelas específicas ou softwares simples para obter *NA*. No entanto, as tabelas de números aleatórios estão caindo em desuso pelo fácil acesso ao processamento eletrônico e pela necessidade de seqüências cada vez mais extensas de dados.

Qualquer sistema de simulação em computador que envolva aleatoriedade necessitará da geração de números aleatórios em grande número. A avaliação do gerador de números aleatórios é importante porque muitos procedimentos estatísticos fazem uso de números randômicos (McCULLOUGH & WILSON, 1999).

Tipicamente, todo o aleatório requerido por um modelo é simulado por um gerador de número aleatório (*GNA*). Um *GNA* produz como saída uma seqüência de variáveis aleatórias independentes e distribuídas uniformemente no intervalo contínuo de 0 a 1. (L'ECUYER, 1998).

Os números aleatórios podem ser transformados, conforme a necessidade, em variáveis aleatórias de diferentes distribuições de probabilidade, tais como a normal, exponencial, poisson, binomial, geométrica, uniforme discreta, entre outras (L'ECUYER, 1998; RODRIGUES ANIDO, 2002).

A validade do método de transformação é fortemente dependente da qualidade das seqüências de números aleatórios utilizada. Normalmente, a suposição de qualidade dos dados é falsa, pois em geral, os geradores de números aleatórios são programas determinísticos que retornam seqüências determinísticas que apenas aparentam ser aleatórias (L'ECUYER, 1998).

A forma mais conveniente de gerar números aleatórios para simulação estocástica parece ser via algoritmos determinísticos com base matemática sólida. Estes algoritmos produzem seqüências de números que não podem ser considerados aleatórios por completo, mas parecem comportar-se como tais em um determinado intervalo. Assim, a seqüência gerada é chamada pseudo-aleatória e o programa que a produz o gerador de números pseudo-aleatórios (L'ECUYER, 1998).

Para CODDINGTON (1997) pode-se enumerar nove condições que deveriam ser observadas nas seqüências obtidas por geradores de números pseudo-randômicos ideais. São elas: apresentar  $NA$  distribuídos de forma homogênea dentro do intervalo considerado; não apresentarem correlação entre os valores; nunca se repetirem; satisfazer algum teste estatístico para números aleatórios; ser reproduzível; ser o mesmo em outro computador; possibilitar mudança ou ajuste para um determinado valor inicial (semente); ser dividido facilmente em seqüências menores; ser construída rapidamente usando a menor memória computacional possível. O exato cumprimento de todos os requisitos é impossível, no entanto, para fins práticos, buscam-se seqüências com período de repetição maior que o tamanho da série requerida e correlações pequenas o bastante para que não afetem os dados gerados.

McCULLOUGH & WILSON (1999) considerou em seu trabalho que o gerador de números aleatórios do *Excel* não é adequado frente aos testes *DIEHARD*. No entanto, a bateria de testes *DIEHARD* é considerada criteriosa, ou seja, analisa os dados com grau aprofundado de detalhamento. Por outro lado, o gerador de números aleatórios do *Microsoft Excel 2000* foi aprovado na bateria de testes de *KNUTH* que apresenta característica menos restritiva quanto às qualidades da série de  $NA$  gerada. Maiores detalhes sobre os testes empregados nas baterias de testes de *KNUTH* e *DIEHARD* podem ser obtidos no trabalho de McCULLOUGH & WILSON (1999).

Várias metodologias são empregadas de acordo com a literatura para a avaliação da aleatoriedade de amostras e série de dados. Dentre elas a teoria das séries (teste não paramétrico) e o teste  $\chi^2$  (paramétrico).

Para SPIEGEL (1993) o teste não paramétrico baseado na teoria das séries é capaz de avaliar uma seqüência de números e inferir se a mesma pode ser considerada aleatória ou não para um determinado nível de significância estatística. RODRIGUES ANIDO (2002) empregando o teste  $\chi^2$  na comparação de quatro métodos de geração de números aleatórios com distribuição uniforme, verificou que a função *Rand* (aleatório) da biblioteca da linguagem *C* é superior a do *Matlab*, resíduo e resíduo alterado. Nesse mesmo trabalho, o autor emprega a análise visual dos dados em gráfico de dispersão e histograma de frequência. Com estas análises empíricas o autor buscou identificar concentração e periodicidade nos valores gerados.

RODRIGUES ANIDO (2002) salienta que é importante considerar no método do resíduo a escolha da semente (*seed*) e dos parâmetros  $\alpha$  e  $M$ , pois os números aleatórios gerados dependem principalmente destas condições. A semente corresponde ao valor inicial do gerador de números aleatórios e o valor  $M - 1$  o valor final. O parâmetro  $M$  deverá ser extremamente longo para que a seqüência não se repita no decorrer da simulação (L'ECUYER, 1998). O parâmetro  $\alpha$  é um número entre 0 e  $M$ .

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 PRINCIPAIS ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Após desvincular o módulo “Balanço hídrico climatológico decendial” de outros módulos existentes no modelo *MORETTI* e incrementá-lo com a introdução de mais três equações de armazenamento de água no solo, o presente trabalho foi desenvolvido seguindo as seguintes etapas:

- **Primeira etapa:** Avaliar a qualidade das seqüências de números aleatórios produzidas pelo gerador de números aleatórios do *Visual Basic (Macro)* do *Microsoft Excel 2000* (função *Rnd* e a instrução *Randomize*), empregando três testes estatísticos;
- **Segunda etapa:** Estimar os parâmetros climáticos e físico-hídricos de entrada para simular o “Balanço hídrico climatológico decendial”, ou seja: (a) levantar e organizar dados climáticos de Ponta Grossa; (b) estimar a evapotranspiração de referência decendial (*ET<sub>o</sub>*); (c) determinar os parâmetros estatísticos, ajustar curvas e estimar os valores de *ET<sub>o</sub>* e chuva a 75% de probabilidade; (d) compor e caracterizar os parâmetros físico-hídricos do solo que irão determinar o armazenamento da água no solo;
- **Terceira etapa:** Verificar o módulo “Balanço hídrico climatológico decendial” após as modificações, observando-se a dinâmica do armazenamento e deficiência de água em dois tipos de solo (arenoso e argiloso) na região de Ponta Grossa;
- **Quarta etapa:** Mediante algumas constatações sobre a dinâmica do armazenamento (Terceira etapa), foram compostos cenários visando estudar os limites de utilização do modelo “Balanço hídrico climatológico decendial” para diferentes condições climáticas (quatro localidades no Estado do Paraná) e de armazenamento de água em um solo argiloso (*CAD* variando de 20 mm a 100 mm).

### 4.2 BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO DECENDIAL

O programa utilizado para fazer as análises de balanço hídrico consistiu em uma adaptação do módulo “Balanço hídrico climatológico decendial”, extraído do “Modelo para a análise de risco econômico aplicado ao planejamento de projetos de irrigação para a cultura do cafeeiro (*MORETTI*)”.

O *MORETTI* foi desenvolvido por SOUZA (2001) e a sua utilização justificou-se no presente trabalho pelos seguintes motivos:

- Os bons resultados obtidos por alguns autores (SOUZA, 2001; SOUZA & FRIZZONE, 2003; COSTA, 2004; PACHECHENIK, 2004; PACHECHENIK *et al.*, 2004; TRENTIN, 2005) que já o utilizaram em seus trabalhos para realizar uma série de análises;
- Linguagem de programação acessível: *Visual Basic (Macros)* aplicada à planilha eletrônica *Microsoft Excel 2000*;
- Disponibilidade de acesso ao código fonte do módulo “Balanço hídrico climatológico decendial” do *MORETTI*;
- Facilidade de acesso ao autor, o que se traduz no maior entendimento a cerca do funcionamento do programa;
- O programa adaptou uma metodologia consagrada, proposta por THORNTHWAITE & MATHER (1955), e permite a realização de um balanço hídrico decendial irrigacionista ao longo de todo o ano para qualquer tipo de cultura;
- O módulo “Balanço hídrico climatológico decendial” permite: trabalhar com dados agrupados em decêndios; entrar com valores de precipitação provável; simular evapotranspiração de referência (*ET<sub>o</sub>*); considerar a realização de irrigação nas análises; e determinar o armazenamento (*ARM*) de um solo específico em função da fração (*p*) de água disponível, dos parâmetros físico-hídricos e equações de armazenamento de água no solo.

A Figura 4.1 apresenta um fluxograma simplificado contendo a estrutura lógica de algumas partes do módulo “Balanço hídrico climatológico decendial” do modelo *MORETTI*.

Referente ao armazenamento de água no solo, a capacidade de água disponível (*CAD*) no módulo é determinada com a Equação 4.1,

$$CAD = 0,01 \cdot (U_{CC} - U_{PMP}) \cdot z \cdot da \quad (4.1)$$

sendo, *CAD* é a capacidade de água disponível (mm); *U<sub>CC</sub>* a umidade do solo na capacidade de campo com base em peso (%); *U<sub>PMP</sub>* a umidade do solo no ponto de murcha permanente com base em peso (%); *da* densidade aparente do solo (g.cm<sup>-3</sup>); *z* a profundidade efetiva do sistema radicular ou profundidade alcançada por 80% das raízes (BERNARDO, 1989) da cultura (mm).

Os valores de água disponível (*AD*) no solo foram determinados com a Equação 4.2. A fração *p* corresponde à capacidade de água disponível do solo que a planta pode consumir antes que se configure um déficit hídrico na mesma (RIJTEMA & ABOUKHALED, 1975).

$$AD_d = CAD \cdot p_d \quad (4.2)$$

sendo,  $AD_d$  a água disponível no  $d$ -ésimo decêndio (mm);  $p_d$  a fração de água disponível no solo para a cultura no  $d$ -ésimo decêndio (adimensional);  $CAD$  a capacidade de água disponível no solo (mm).

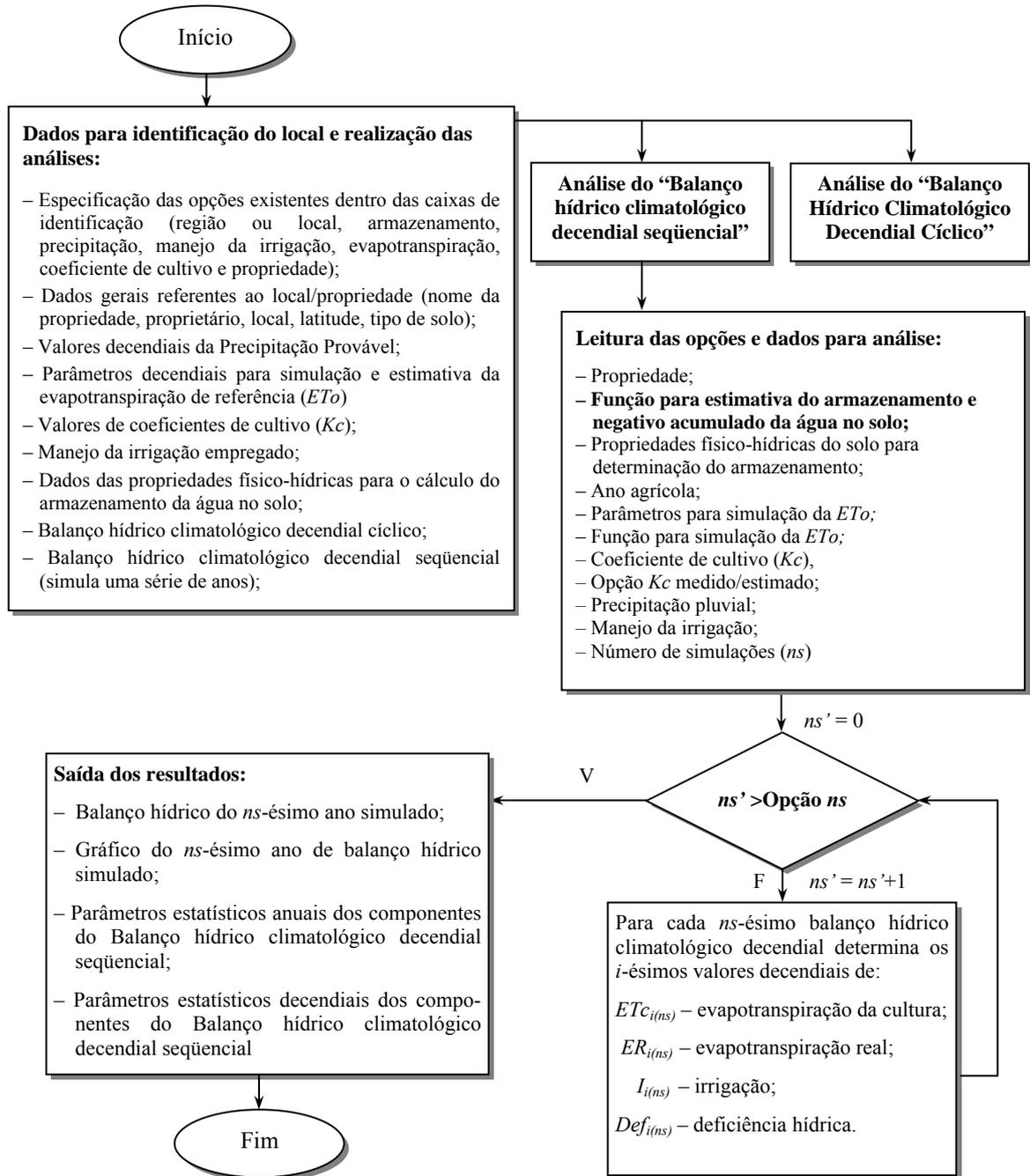


Figura 4.1 – Fluxograma contendo a estrutura lógica de algumas partes do módulo “Balço hídrico climatológico decencial” do modelo MORETTI

Na adaptação do módulo “Balanço hídrico climatológico decendial”, os formulários e códigos fonte foram desvinculados do programa original, possibilitando que o mesmo ficasse independente. O módulo original contempla somente as equações Exponencial (THORNTHWAITE & MATHER, 1948) e Potencial de primeira ordem (RIJTEMA & ABOUKHALED, 1975), para estimar o armazenamento e negativo acumulado. As adaptações realizadas no código fonte consistiram basicamente na inclusão de mais três equações de armazenamento de água no solo (BRAGA, 1982; Potencial de segunda ordem; Co-senoidal), verificação do processo de geração de números aleatórios e composição de rotinas para a determinação dos parâmetros estatísticos decendiais dos componentes do balanço hídrico.

#### 4.2.1 Equações de armazenamento de água no solo

As equações de armazenamento de água no solo podem ser classificadas em dois grupos, em função do conceito de fração  $p$  e água disponível ( $AD$ ) introduzido por RIJTEMA & ABOUKHALED (1975):

- Nos modelos que não adotam o conceito de fração  $p$ , qualquer retirada de água no solo constitui déficit, como é o caso da equação de THORNTHWAITE & MATHER (1955);
- Para os modelos que consideram a fração  $p$  e água disponível ( $AD$ ), somente ocorre o déficit quando o armazenamento da água no solo for menor que  $CAD \cdot (1 - p)$ . Desta forma, observa-se a ocorrência de déficit quando a evapotranspiração real ( $ER$ ) for menor que a da cultura ( $ETc$ ), indicando restrição à retirada de água do solo. Nestes modelos verificam-se duas situações a cerca da condição hídrica do solo, uma úmida e outra seca, como é o caso das equações de RIJTEMA & ABOUKHALED (1975), BRAGA (1982), Potencial de segunda ordem e Co-senoidal.

A zona úmida compreende a condição na qual o armazenamento é superior a  $CAD \cdot (1 - p)$  que, conceitualmente, não constitui restrição hídrica para a cultura. As estimativas do armazenamento ( $ARM$ ) e negativo acumulado ( $L$ ) na região úmida são obtidas com as Equações 4.3 e 4.4, sendo:

para a condição  $CAD \cdot (1 - p) < ARM \leq CAD$  ou  $0 \leq L < (CAD \cdot p)$ , tem-se:

$$L = CAD - ARM \quad (4.3)$$

$$ARM = CAD - L \quad (4.4)$$

sendo,  $L$  o negativo acumulado (mm);  $CAD$  a capacidade de água disponível (mm);  $ARM$  o armazenamento de água no solo (mm) no decêndio; e  $p$  a fração de água disponível no solo.

Para a zona seca, ou seja, quando o armazenamento de água no solo é menor que  $CAD \cdot (1 - p)$  consideram-se os modelos apresentados nos Itens 4.2.1.1 a 4.2.1.2.

#### 4.2.1.1 Equação Exponencial de THORNTHWAITE & MATHER (1955)

As equações para a estimativa do armazenamento e negativo acumulado apresentadas por THORNTHWAITE & MATHER (1955) são aplicadas independentemente da condição hídrica do solo. São elas,

$$L = -CAD \cdot \ln\left(\frac{ARM}{CAD}\right) \quad (4.5)$$

$$ARM = CAD \cdot e^{\left(-\frac{L}{CAD}\right)} \quad (4.6)$$

sendo,  $CAD$  a capacidade de água disponível (mm);  $ARM$  o armazenamento de água do solo (mm);  $L$  o valor do negativo acumulado no decêndio (mm);

#### 4.2.1.2 Equações de BRAGA (1982)

Para  $ARM \leq CAD \cdot (1 - p)$ ,

$$L = CAD \cdot \left[ p - \ln\left(\frac{ARM}{CAD \cdot (1 - p)}\right) \right] \quad (4.7)$$

ou quando  $L \geq CAD \cdot p$ ,

$$ARM = CAD \cdot (1 - p) \cdot e^{\left(p - \frac{L}{CAD}\right)} \quad (4.8)$$

sendo,  $L$  o negativo acumulado (mm);  $CAD$  a capacidade de água disponível (mm);  $ARM$  o armazenamento de água no solo (mm) no decêndio;  $p$  a fração de água disponível no solo no decêndio.

#### 4.2.1.3 Equação Potencial de primeira ordem de RIJTEMA & ABOUKHALED (1975)

A equação Potencial de primeira ordem (DOURADO NETO & JONG VAN LIER, 1993) é uma adaptação da equação exponencial de THORNTHWAITE & MATHER (1948) para considerar a fração de água disponível no solo (fração  $p$ ) e melhor estimar e representar as condições de armazenamento de água no solo para as culturas.

Para  $ARM \leq CAD \cdot (1 - p)$ ,

$$L = CAD \left[ p - (1 - p) \cdot \ln \left( \frac{ARM}{CAD \cdot (1 - p)} \right) \right] \quad (4.9)$$

ou quando  $L \geq CAD \cdot p$ ,

$$ARM = CAD \cdot (1 - p) \cdot e^{\left[ \left( p - \frac{L}{CAD} \right) \left( \frac{1}{1 - p} \right) \right]} \quad (4.10)$$

sendo,  $L$  é o negativo acumulado (mm);  $CAD$  a capacidade de água disponível (mm);  $ARM$  o armazenamento de água no solo (mm) no decêndio;  $p$  a fração de água disponível no solo.

#### 4.2.1.4 Equação Potencial de segunda ordem

$$L = CAD \cdot \left[ \frac{(1 - p)}{-2} \cdot \ln \left( \frac{ARM}{2 \cdot (1 - p) \cdot CAD - ARM} \right) + p \right] \quad (4.11)$$

$$ARM = \frac{2 \cdot (1 - p) \cdot CAD \cdot e^Y}{(1 + e^Y)} \quad (4.12)$$

$$Y = \left( \frac{|L|}{CAD} - p \right) \cdot \left( \frac{-2}{1 - p} \right) \quad (4.13)$$

sendo,  $L$  é o negativo acumulado (mm);  $CAD$  a capacidade de água disponível (mm);  $ARM$  o armazenamento de água no solo (mm) no decêndio;  $p$  a fração de água disponível no solo.

#### 4.2.1.5 Equação “Co-senoidal”

$$L = CAD \cdot \left\{ p + \frac{2}{\pi} \cdot (1 - p) \cdot \operatorname{tg} \left[ \frac{\pi}{2} \cdot \left( 1 - \frac{ARM}{(1 - p) \cdot CAD} \right) \right] \right\} \quad (4.14)$$

$$ARM = (1 - p) \cdot CAD \cdot \left\{ 1 - \frac{2}{\pi} \cdot \operatorname{arctg} \left[ \frac{\pi}{2} \cdot \left( \frac{|L| - CAD \cdot p}{(1 - p) \cdot CAD} \right) \right] \right\} \quad (4.15)$$

sendo,  $L$  é o negativo acumulado (mm);  $CAD$  a capacidade de água disponível (mm);  $ARM$  o armazenamento de água no solo (mm) no decêndio;  $p$  a fração de água disponível no solo.

#### 4.2.2 Verificação do processo de geração de Números Aleatórios do *Visual Basic (macro)* do programa *Microsoft Excel 2000* (primeira etapa)

O processo de geração dos números aleatórios do módulo *Visual Basic (Macro)* do *Microsoft Excel 2000* foi realizado com a função *Rnd*, a instrução *Randomize* e o comando *For*, baseando-se no seguinte procedimento,

```
Sub GNA()
With ActiveSheet
Randomize 'O valor retornado pelo cronômetro do sistema é utilizado
como semente.
For j = 1 To 30
For i = 1 To 10.000
Xi = Rnd
.Cells(2 + i, 2).Value = Xi
Next i
Next j
End With
End Sub
```

A instrução *Randomize(number)* foi disposta no procedimento para que seja utilizada apenas uma semente inicial para toda a seqüência de aleatórios gerados – o módulo “Balanço hídrico climatológico decendial” utiliza a instrução para cada número aleatório gerado. A função *Rnd* gera o número aleatório e  $x_i$  é a variável aleatória gerada no intervalo entre 0 e 1.

O processo de verificação do gerador de números aleatórios do Módulo *Visual Basic (macros)* do programa *Microsoft Excel 2000* foi realizado com 30 seqüências de 10.000 números aleatórios, uma vez que o módulo “Balanço hídrico climatológico decendial” permite a realização de até 10.000 anos simulados.

O gerador de números aleatórios do módulo *Visual Basic (Microsoft Excel 2000)* foi avaliado quanto à qualidade da série retornada, aplicando-se:

- (a) **Teste empírico:** constitui-se no “Teste da análise visual” da distribuição dos dados em gráfico de dispersão e histograma de freqüência a fim de detectar tendências;
- (b) **Matemático (estatístico):** Constituiu-se na aplicação do “Teste das séries para aleatoriedade”, conforme disposto em SPIEGEL (1993); e do “Teste de Chi-quadrado”, baseando-se em ASSIS *et al.* (1996) e PEREIRA JUNIOR *et al.*, (2002).

O processamento dos testes foi realizado na planilha eletrônica *Microsoft Excel 2000* e a geração da série de números aleatórios no *Visual Basic (macro)*.

#### 4.2.2.1 Análise visual em gráfico de dispersão

A metodologia empregada no “Teste de análise visual” consistiu na observação da distribuição de 10.000 números aleatórios em um gráfico de dispersão e histograma de frequência. Esta técnica visa avaliar a existência de tendências e foi aplicada somente à melhor e pior seqüência verificada no “Teste das séries para aleatoriedade” (Item 4.2.2.2).

#### 4.2.2.2 Teste das séries para aleatoriedade

O “Teste das séries para aleatoriedade” é não paramétrico e destina-se a avaliar a aleatoriedade de seqüências de números aleatórios ( $NA$ ). A metodologia do teste consiste em: (a) classificar e quantificar o número de séries da seqüência de aleatórios em dois grupos denominado, maior ( $N_1$ ) e menor ( $N_2$ ) que a mediana; (b) determinar a média e o desvio padrão das seqüências de  $N_1$  e  $N_2$ ; e (c) avaliar a significância estatística do valor  $z$  calculado da distribuição normal padronizada das seqüências de  $N_1$  e  $N_2$ .

Assumiu-se como normal a distribuição de frequência de  $V$  para as 30 seqüências de 10.000 números aleatórios gerados, pois em testes realizados *a priori*, verificou-se que o valor de  $V$  (Equação 4.16) foi maior que 8, conforme recomendação de SPIEGEL (1993),

$$V = N_1 + N_2 \quad (4.16)$$

sendo,  $V$  o total de séries da seqüência (adimensional);  $N_1$  o número de séries formada por valores maiores que a mediana (adimensional),  $N_2$  o número de séries com valores abaixo da mediana (adimensional).

A média e a variância das amostras  $N_1$  e  $N_2$  geradas foram calculadas conforme as Equações 4.17 e 4.18, respectivamente,

$$\mu_v = \frac{2N_1 + N_2}{N_1 + N_2} + 1 \quad (4.17)$$

$$\sigma_v^2 = \frac{2 \cdot N_1 \cdot N_2 \cdot (2N_1 \cdot N_2 - N_1 - N_2)}{(N_1 + N_2)^2 \cdot (N_1 + N_2 - 1)} \quad (4.18)$$

sendo,  $\mu_v$  a média de  $V$ ; e  $\sigma_v$  o desvio padrão de  $V$ .

Aplicando-se a média e o desvio padrão na Equação 4.19 obteve-se o valor  $z$  da distribuição normal padronizada,

$$z = \frac{V - \mu_v}{\sigma_v} \quad (4.19)$$

sendo,  $z$  o valor para distribuição normal padronizado.

Os 30 valores de “ $z$  padronizado calculado” foram analisados individualmente para os níveis de 1%, 5%, 10%, 20%, 40%, 60%, 80% e 90% de probabilidade, aplicando-se um “Teste de hipótese bilateral”. Assumiu-se o caráter aleatório da seqüência de números quando o valor de  $z$  calculado ficou no intervalo de  $z$  padronizado, correspondente ao nível de significância considerado. Assim, rejeitou-se  $H_1$  e a hipótese de nulidade ( $H_0$ ) foi aceita.

Diante da grande variabilidade de valores de  $z$  padronizado nas 30 seqüências de números aleatórios ( $NA$ ), obteve-se a distribuição de freqüência dos mesmos com a finalidade de encontrar o seu valor mais provável.

#### 4.2.2.3 Teste de Chi-quadrado

O “Teste Qui-quadrado” é um teste de aderência que visa determinar o grau de associação de uma série de dados (distribuição de probabilidade desconhecida) a uma distribuição de probabilidade específica, considerando um determinado nível de probabilidade. A aplicação do teste foi realizada seguindo as recomendações de ASSIS *et al.* (1996).

A Equação 4.20 foi utilizada para determinar o número de classes da distribuição de freqüência,

$$k = 5 \cdot \log N \quad (4.20)$$

sendo,  $k$  o número de classes;  $N$  o total de números na seqüência de números aleatórios (10.000).

A freqüência observada em cada classe foi determinada conforme a Equação 4.21,

$$FO_i = \frac{n_i}{N} \quad (4.21)$$

sendo,  $FO_i$  a freqüência observada em cada  $i$ -ésima classe (adimensional);  $n_i$  o número de  $NA$  em cada  $i$ -ésima classe (adimensional); e  $N$  o número total de  $NA$  da seqüência (adimensional).

Considerando que os dados das seqüências de números aleatórios seguem uma distribuição uniforme, a freqüência teórica de cada classe foi determinada conforme a Equação 4.22,

$$Fe_i = \frac{N}{k} \quad (4.22)$$

sendo,  $Fe_i$  a frequência esperada em cada  $i$ -ésima classe (adimensional);  $N$  o total de números aleatórios da seqüência (adimensional); e  $k$  o número de classes (adimensional).

O valor qui-quadrado de cada seqüência de  $NA$  foi obtido com a Equação 4.23, conforme as recomendações da ASSIS *et al.* (1996),

$$\chi^2 = \sum_1^k \left( \frac{(Fo_i - Fe_i)}{Fe_i} \right)^2 \quad (4.23)$$

sendo,  $\chi^2$  o valor de Qui-quadrado calculado (adimensional);  $k$  o número de classes (adimensional);  $Fo_i$  a frequência observada na  $i$ -ésima classe;  $Fe_i$  a frequência esperada em cada  $i$ -ésima classe.

Empregou-se a Equação 4.24 para determinar o número de graus de liberdade ( $GL$ ),

$$GL = k - p - 1 \quad (4.24)$$

sendo,  $GL$  o número de grau de liberdade (adimensional);  $k$  o número de classes (adimensional); e  $p$  o número de parâmetros da distribuição uniforme (adimensional). A distribuição uniforme possui dois parâmetros, o maior valor e o menor valor de toda a seqüência de  $NA$ .

Considerando três níveis de probabilidade estatística ( $\alpha$ ), 1%, 5% e 10%, aplicou-se o Teste de Qui-quadrado para as 30 seqüências de número aleatório ( $NA$ ). A seqüência de  $NA$  foi considerada possuindo distribuição de probabilidade Uniforme quando  $\chi^2_{\text{calculado}} < \chi^2_{\text{tabelado}}$ , para o nível de probabilidade selecionado. Nesse caso, considera-se que houve concordância estatística entre frequência observada e esperada, ou seja, a hipótese de nulidade ( $H_0$ ) é tida como verdadeira.

### 4.3 VERIFICAÇÃO DO MÓDULO “BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO DECENDIAL” APÓS AS MODIFICAÇÕES (Segunda e Terceira etapas)

A verificação do “Balanço hídrico climatológico decendial”, após a inclusão de mais três equações de armazenamento de água no solo e aferição do processo de geração dos números aleatórios, foi realizada com os dados climáticos da cidade de Ponta Grossa, considerando os seguintes passos:

- Levantamento e organização de dados climáticos de Ponta Grossa em decêndios, estimativa da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) decendial e a determinação de alguns parâmetros estatísticos (tendência e dispersão) para os mesmos;
- Identificação da função densidade de probabilidade que melhor se ajusta aos dados decendiais da  $ET_0$  e precipitação pluvial (chuva), determinando os valores que ocorrem a 75% de probabilidade;
- Composição e caracterização dos parâmetros físico-hídricos do solo que irão determinar o armazenamento da água no solo;
- Comparar a dinâmica do armazenamento e deficiência de água nos solos estudados, para Ponta Grossa, utilizando as cinco equações de armazenamento de água no solo dispostas no módulo “Balanço hídrico climatológico decendial”, após as modificações. É importante observar que a equação Co-senoidal será utilizada como parâmetro de avaliação sobre o desempenho das demais equações (Exponencial; Potencial de Primeira Ordem; BRAGA, 1982, Potencial de segunda ordem). Este procedimento baseia-se nos resultados encontrados por DOURADO NETO & JONG VAN LIER (1993), quando testaram quatorze condições necessárias à aceitação de equações para estimativa do armazenamento em função do negativo acumulado.

#### 4.3.1 Descrição da área de estudo

O presente trabalho foi realizado com uma série de 50 anos de dados climáticos do município de Ponta Grossa - PR, que se encontra localizada na Região Centro-leste do Estado do Paraná, fazendo divisa com os municípios de Castro (Norte), Palmeira e Teixeira Soares (Sul), Campo Largo (Leste), Tibagi e Ipiranga (Oeste). O município apresenta expressiva aptidão agrícola e se encontra próxima do campus de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná (Figura 4.2).

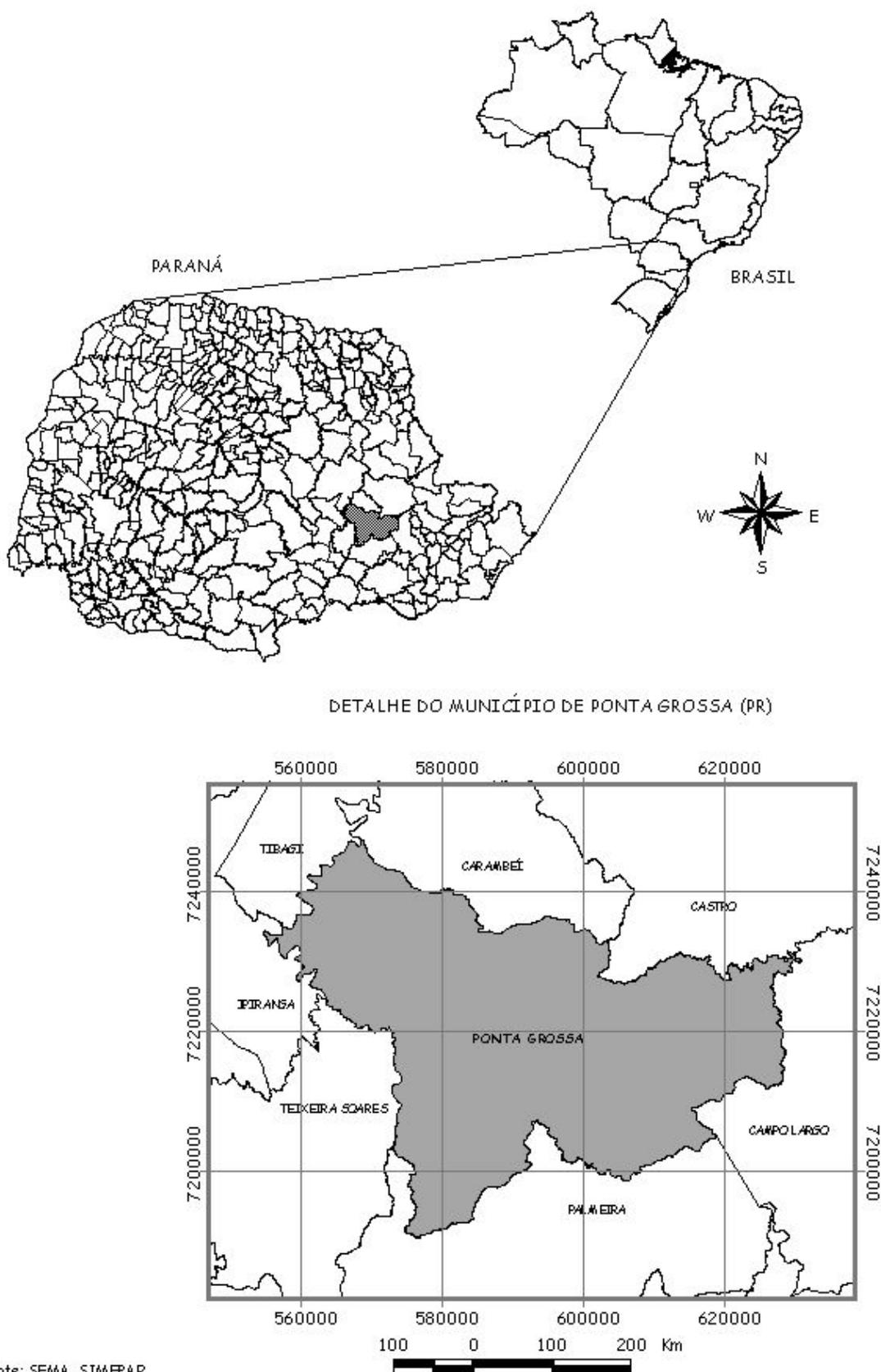


Figura 4.2 – Mapa contendo a localização da cidade de Ponta Grossa-PR.

### 4.3.2 Levantamento, organização e tratamento dos dados climáticos

Os dados climáticos utilizados foram coletados na estação climatológica de Ponta Grossa-PR e foram fornecidos pelo instituto SIMEPAR (Sistema Meteorológico do Paraná). A localização da estação climatológica, por coordenada geográfica terrestre, é: 25,2164° Sul; 50,0167° Oeste Greenwich e altitude de 880 metros.

Foram utilizados no presente trabalho os valores de 50 anos e 4 meses de dados climáticos diários de temperatura média do ar e precipitação pluvial.

#### 4.3.2.1 Procedimento de tabulação dos dados climáticos

A tabulação dos dados climáticos diários foi realizada em planilha eletrônica *Microsoft Excel* 2000, e constituiu no agrupamento dos mesmos em decêndios para todos os anos da série.

Os decêndios foram definidos como grupos de dez dias corridos de dados climáticos para todos os dias do ano. O último decêndio do ano foi formado com 5 ou 6 dias dependendo se o ano era bissexto ou não.

As Equações 4.25 e 4.26 apresentam, em termos matemáticos, como procedeu-se o agrupamento dos valores decendiais de temperatura e precipitação, respectivamente,

$$T_d = \sum_{i=1}^{n_d} \frac{T_{id}}{n_d} \quad (4.25)$$

$$P_d = \sum_{i=1}^{n_d} P_{id} \quad (4.26)$$

sendo,  $T_d$  a temperatura média no  $d$ -ésimo decêndio (°C);  $T_{id}$  a temperatura média do  $i$ -ésimo dia do  $d$ -ésimo decêndio (°C);  $P_d$  a precipitação acumulada no  $d$ -ésimo decêndio (mm/decêndio);  $P_{id}$  a precipitação do  $i$ -ésimo dia do  $d$ -ésimo decêndio (mm/dia);  $n_d$  o número de dias do  $d$ -ésimo decêndio (adimensional) –  $n_d$  é igual a 10 do 1° ao 36° decêndios e 5 ou 6 para 37° decêndio, em função do ano ser bissexto ou não;  $d$  é o número de decêndios no ano (adimensional) – 1 a 37. A ausência de leituras de temperatura ( $T_{id}$ ) ou precipitação ( $P_{id}$ ) em pelo menos um  $i$ -ésimo dia fez com que o valor o  $d$ -ésimo decêndio fosse descartado.

#### 4.3.2.2 Estimativa da evapotranspiração de referência

A estimativa da evapotranspiração de referência foi realizada conforme a metodologia de THORNTHWAITE (1948), descrita por PEREIRA *et al.* (1997). Originalmente o método de THORNTHWAITE (1948) estima a evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) para um mês com 30 dias de duração e 12 horas de fotoperíodo, considerando a temperatura média mensal. No entanto, seguindo o procedimento de SOUZA *et al.* (1994), a estimativa da evapotranspiração de referência decendial ( $ET_{o_d}$ ) foi realizada empregando-se a temperatura média dos  $d$ -ésimos decêndios da localidade considerada, conforme está apresentado na Equação 4.27.

A equação de estimativa da evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) foi adaptada para retornar o valor acumulado de  $ET_o$  no decêndio, corrigida para o fotoperíodo e número de dias do decêndio ( $ET_{o_d}$ ),

$$ET_{o_d} = \frac{N_d}{12} \cdot \frac{n_d}{30} \cdot 16 \cdot \left( \frac{10 \cdot T_d}{I} \right)^a, \text{ para } T_d > 0 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.27)$$

sendo,  $ET_{o_d}$  a evapotranspiração de referência no  $d$ -ésimo decêndio ( $\text{mm} \cdot \text{decêndio}^{-1}$ );  $n_d$  o número de dias do  $d$ -ésimo decêndio (adimensional) –  $n_d$  é igual a 10 do 1° ao 36° decêndios e 5 ou 6 para 37° decêndio;  $T_d$  a temperatura média do ar do  $d$ -ésimo decêndio ( $^\circ\text{C}$ );  $N_d$  o fotoperíodo no último dia do  $d$ -ésimo decêndio (h);  $I$  o índice de calor da região (Equação 4.28);  $a$  a função cúbica do índice de calor da região (Equação 4.29).

O índice de calor da região ( $I$ ) e a sua função cúbica ( $a$ ) foram determinados, respectivamente, pelas Equações 4.28 e 4.29. A temperatura considerada foi a decendial normal, obtida pela média aritmética de todos os decêndios disponíveis na série de dados climáticos.

$$I = \sum_{i=1}^{12} (0,2 \cdot T_i)^{1,514}, \text{ para } T_i > 0 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.28)$$

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 1,7912 \cdot 10^{-2} \cdot I + 0,49239 \quad (4.29)$$

sendo,  $I$  o índice de calor da região (adimensional);  $T_i$  a temperatura média normal do  $i$ -ésimo mês do ano ( $^\circ\text{C}$ ) – média aritmética dos decêndios do mês;  $a$  a função cúbica do índice de calor da região (adimensional);

O cálculo do fotoperíodo ( $N$ ) foi realizado seguindo a metodologia apresentada por OMETTO (1981) e PEREIRA *et al.* (2002), conforme a Equação 4.30,

$$N_d = \frac{2 \cdot H_d}{15} = \frac{2 \cdot \cos^{-1}(-\operatorname{tg}\delta_d \cdot \operatorname{tg}\Phi)}{15} \quad (4.30)$$

sendo,  $N_d$  o fotoperíodo no último dia de cada  $d$ -ésimo decêndio (h);  $H_d$  o ângulo horário de nascimento do sol no último dia do  $d$ -ésimo decêndio (graus);  $\delta_d$  a declinação do sol no último dia do  $d$ -ésimo decêndio (graus);  $\phi$  a latitude da estação climatológica onde os dados foram coletados (25,2164° Sul).

A declinação solar foi obtida com a Equação 4.31, seguindo as recomendações de PEREIRA *et al.* (2000),

$$\delta_d = 23,45 \cdot \operatorname{sen} \left[ \frac{360 \cdot (Dj_d - 80)}{365} \right] \quad (4.31)$$

sendo,  $\delta_d$  a declinação do sol para o último dia do  $d$ -ésimo decêndio (graus);  $Dj_d$  dia juliano (dias) – último dia do  $d$ -ésimo decêndio no calendário Juliano (1° de Janeiro é igual a 1 e 31 de dezembro igual a 365, para o ano não bissexto).

### 4.3.3 Teste de aderência e determinação da chuva e $ET_o$ provável

As análises de distribuição de frequência e teste de aderência para os valores decendiais de chuva e evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) foram realizadas com o módulo “Análise Estatística” do modelo MORETTI (SOUZA, 2001). Aplicou-se o teste de Kolmogorov-Smirnov a 5% de probabilidade considerando as distribuições de probabilidade teóricas, gama, normal, exponencial, triangular e uniforme. A aplicação do teste visou determinar os parâmetros da distribuição de melhor ajuste aos dados de chuva e  $ET_o$ , ou seja, encontrar os parâmetros, alfa, beta, média, desvio padrão, maior valor, menor valor e moda.

O Teste de Kolmogorov-Smirnov consiste em avaliar, por meio de um valor  $D_{max}$  (Equação 4.32), o ajuste entre uma distribuição de frequência acumulada teórica  $F'(x)$  e outra,  $F(x)$ , proveniente dos dados amostrados.

$$D_{max} = \operatorname{Max} |F'(x) - F(x)| \quad (4.32)$$

sendo,  $D_{max}$  o valor crítico para a estatística de Kolmogorov-Smirnov;  $F'(x)$  a função de distribuição de probabilidade teórica;  $F(x)$  a função de distribuição de probabilidade observada.

Se a condição  $D_{max} \text{ calculado} < D_{max} \text{ tabelado}$  for verdadeira, aceita-se a hipótese de que os valores da amostra ajustam-se bem à distribuição de probabilidade ao nível de 5% de significância. Caso contrário rejeita-se a hipótese.

O valor de  $D_{max} \text{ tabelado}$  é estimado no módulo “Análise Estatística” utilizando-se as Equações 4.33 e 4.34 (SOUZA, 2001),

para  $N < 16$ ,

$$D_{\max} = 0,971 - 0,2388 \cdot \ln N \quad (4.33)$$

para  $N \geq 16$ ,

$$D_{\max} = \frac{1,37}{\sqrt{N}} \quad (4.34)$$

sendo,  $D_{max}$  o valor crítico  $D_{max}$  da estatística de Kolmogorov-Smirnov; e  $N$  o número de elementos da amostra (adimensional) – o módulo “Análise estatística” estima o valor de  $D_{max} \text{ tabelado}$  conforme a estatística de Kolmogorov-Smirnov apresentada por ASSIS *et al.* (1996), a 5% de probabilidade.

De posse dos parâmetros da melhor distribuição de frequência obtidos no módulo “Análise Estatística” do modelo MORETTI, avaliou-se em uma planilha eletrônica (*Microsoft Excel 2000*) a ocorrência da chuva e  $ETo$  decendial a 75% de probabilidade para os 37 decêndios ao longo do ano, ou seja:

- para a chuva, considerou-se a ocorrência de um valor que tenha 75% de probabilidade de ser igualado ou superado (75% acima da curva);
- para a  $ETo$ , considerou-se a ocorrência de um valor que tenha 25% de probabilidade de ser igualado ou superado (75% abaixo da curva) (SAAD, 1990).

Procedimentos adotados para estimar a chuva e  $ETo$  provável a 75%:

- (a) Os valores de chuva e  $ETo$  foram agrupados conforme as Equações 4.25 e 4.26, respectivamente;
- (b) Na estimativa da chuva provável a 75%, como algumas das distribuições analisadas não admitem valores nulos, adotou-se o conceito de distribuição mista, conforme as recomendações de ASSIS *et al.* (1996). Assim, determinou-se a função cumulativa de probabilidade  $F(x)$  em duas partes, uma com os valores nulos e a outra com os valores maiores ou iguais a 1 mm/decêndio, conforme a Equação 4.35.

$$F(x) = P_o + (1 - P_o) \cdot D(x) \quad (4.35)$$

sendo,  $F(x)$  a função cumulativa de probabilidade da distribuição mista;  $P_o$  a probabilidade de ocorrência de valores nulos (zeros);  $D(x)$  a distribuição cumulativa teórica, onde os parâmetros são estimados na ausência de zeros.

A probabilidade de ocorrência de zeros (ausência de precipitação –  $P_o$ ) foi determinada com a Equação 4.36, conforme as recomendações de ASSIS *et al.* (1996). Consideraram-se como nulos todos os valores de chuva menores que 1 mm.

$$P_o = \frac{N_{zeros}}{N + 1} \cdot 100 \quad (4.36)$$

sendo,  $P_o$  a probabilidade de ocorrência de ausência de precipitação nos  $d$ -ésimos decêndios da série histórica (%),  $N_{zeros}$  o número total de  $d$ -ésimos decêndios com valores nulos na série histórica (adimensional); e  $N$  número total de anos da série histórica.

(c) Na estimativa da  $ET_o$  provável, como não existem valores nulos estimados, a função cumulativa de probabilidade resultou,

$$F(x) = D(x) \quad (4.35)$$

sendo,  $F(x)$  a função cumulativa de probabilidade da distribuição;  $D(x)$  a distribuição cumulativa teórica.

(d) Nos  $d$ -ésimos decêndios da série histórica possuindo valores maiores ou iguais a 1 mm/decêndio, com o auxílio do módulo “Análise estatística” do MORETTI, aplicou-se o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov e determinaram-se os parâmetros da função de distribuição de probabilidade teórica de melhor ajuste.

(e) Em uma planilha eletrônica (*Microsoft Excel* 2000), determinou-se por tentativa a chuva e a  $ET_o$  provável a 75% considerando a função distribuição de probabilidade de melhor ajuste.

#### 4.3.3.1 Funções de distribuição cumulativa de probabilidade $F(x)$

As funções de distribuição cumulativa de probabilidade  $F(x)$  utilizadas no módulo “Análise estatística” do modelo MORETTI são:

**(a) Distribuição cumulativa de probabilidade normal**

$$F(x) = \left( \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \right) \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (4.36)$$

sendo,  $F(x)$  a função distribuição de probabilidade normal ;  $\mu$  a média da população (mm);  $\sigma$  é o desvio padrão da população (mm);  $x$  a altura de precipitação ou  $ETo$  no decêndio considerado (mm);  $\pi$  constante numérica “pi”.

**(b) Distribuição cumulativa de probabilidade gama**

Para  $x, \alpha$  e  $\beta > 0$ ,

$$F(x) = \left( \frac{1}{\Gamma(\alpha) \cdot \beta^\alpha} \right) \cdot \int_0^x e^{\left(\frac{-x}{\beta}\right)} \cdot x^{(\alpha-1)} dx \quad (4.37)$$

para  $x, \alpha$  e  $\beta \leq 0$ ,

$$F(x) = 0 \quad (4.38)$$

sendo,  $F(x)$  a função distribuição de probabilidade gama incompleta;  $\alpha$  o parâmetro de forma (adimensional);  $\beta$  o parâmetro de escala (adimensional);  $\Gamma(\alpha)$  a função gama; e  $x$  a altura de chuva ou  $ETo$  (mm) – Para a chuva, valores menores do que 1 mm foram considerados iguais a zero.

**(c) Distribuição cumulativa de probabilidade exponencial**

A função distribuição de probabilidade exponencial é um caso particular da distribuição Gama (ASSIS *et al.*, 1996),

para  $x \geq 0$ ,

$$F(x) = 1 - e^{-Y} \quad \text{sendo } Y = \frac{x}{\bar{x}} \quad (4.39)$$

para  $x = 0$ ,

$$F(x) = 0 \quad (4.40)$$

sendo,  $F(x)$  a função distribuição de probabilidade exponencial;  $\bar{x}$  a altura média de chuva ou  $ETo$  (mm); e  $x$  a altura de chuva ou  $ETo$  (mm).

**(d) Distribuição cumulativa de probabilidade triangular**

Para  $a \leq x < m$ ,

$$F(x) = \frac{(x-a)^2}{(b-a) \cdot (m-a)} \quad (4.41)$$

para  $m < x \leq b$ ,

$$F(x) = \left( \frac{m-a}{b-a} \right) - \left( \frac{(b-x)^2}{(b-a) \cdot (b-m)} \right) + \left( \frac{b-m}{b-a} \right) \quad (4.42)$$

para  $x = m$ ,

$$F(x) = m \quad (4.43)$$

sendo,  $F(x)$  a função distribuição cumulativa de probabilidade triangular;  $x$  a altura de chuva ou  $ETo$  (mm);  $a$  o menor valor da série de dados (mm);  $b$  o maior valor da série de dados (mm) e  $m$  o valor modal da série de dados (mm).

**(e) Distribuição cumulativa de probabilidade uniforme**

Para  $x = a$ ,

$$F(x) = 0 \quad (4.44)$$

para  $a < x < b$ ,

$$F(x) = \frac{x-a}{b-a} \quad (4.45)$$

para  $x = b$ ,

$$F(x) = 1 \quad (4.46)$$

sendo,  $F(x)$  a função distribuição de probabilidade uniforme;  $x$  a altura de precipitação ou  $ETo$  no decêndio considerado (mm);  $a$  o menor valor da série de dados (mm), e  $b$  o maior valor da série de dados (mm).

**4.3.4 Parâmetros físico-hídricos do solo**

Baseando-se no triângulo textural da EMBRAPA (1999) foram obtidos três solos teóricos com textura arenosa, argilosa e média. Estes compuseram diferentes capacidades de água disponível ( $CAD$ ) nas análises de simulação no módulo “Balanço hídrico climatológico decendial” e permitiram o estudo e a verificação das cinco equações de armazenamento de água no solo. A Tabela 4.1 relaciona as percentagens de areia, silte e argila para os três solos considerados para as análises.

Tabela 4.1. Composição granulométrica dos solos selecionados para as análises de simulação no módulo “Balanço Hídrico Climatológico Decendial”.

Solo	Classe de textura*	Textura (%)		
		Areia	Silte	Argila
01	Argilosa	16	23	61
02	Média	53	22	25
03	Arenosa	70	10	20

Fonte: \*EMBRAPA (1999)

#### 4.3.4.1 Determinação da umidade do solo

A determinação dos teores de umidade do solo, com base em volume, na condição de capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ) e ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ) foi realizada através do modelo VAN GENUCHTEN (1980)<sup>3</sup>, citado por REICHARDT (1996), empregando a Equação 4.47,

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha \cdot |\phi_m|)^n]^m} \quad (4.47)$$

sendo,  $\theta$  a umidade do solo ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );  $|\phi_m|$  o potencial mátrico da água no solo (cm);  $\theta_r$  a umidade residual ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );  $\theta_s$  a umidade de saturação ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ); e  $\alpha$ ,  $m$ ,  $n$  são parâmetros de ajuste da curva de retenção de água no solo.

Os parâmetros  $\alpha$ ,  $n$  e  $m$  de ajuste da curva de retenção de água no solo e as umidades de saturação ( $\theta_s$ ) e residual ( $\theta_r$ ) foram estimados com o auxílio do programa *SPLINTEX*, desenvolvido por PREVEDELLO (2002). Para permitir a estimativa dos parâmetros  $\alpha$ ,  $n$  e  $m$  da curva de retenção da água no solo o programa necessita dos dados de densidade do solo, densidade de partícula e percentuais acumulados das classes texturais. De acordo com recomendações de PREVEDELO (2003), adotou-se a densidade do solo igual a  $1,3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  e a densidade de partícula igual a  $2,65 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , para os três tipos de solo considerados nas análises (Tabela 4.1). Os potenciais mátricos de água no solo ( $\phi_m$ ) para a determinação das umidades na  $\theta_{CC}$  e  $\theta_{PMP}$  foram de 100 cm e 15.000 cm de coluna de água, respectivamente (PREVEDELLO, 2003<sup>4</sup>).

<sup>3</sup> VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, 44: 892-898, 1980.

<sup>4</sup> PREVEDELLO, C.L. Determinação de parâmetros físicos para os solos do Estado do Paraná. Comunicação pessoal, 2003.

#### 4.3.5 Resumo das opções utilizadas para verificar o módulo “Balanço hídrico climatológico decendial” após as modificações, com os dados de Ponta Grossa-PR (Terceira etapa)

O levantamento dos dados de entrada no modelo e a escolha das opções necessárias, foram realizadas seguindo as recomendações de SOUZA (2001). Os itens dispostos abaixo especificam os principais dados e opções que foram realizados para fazer as análises:

- (a) Local: os balanços hídricos foram realizados para a região de Ponta Grossa-PR;
- (b) Número de simulações: as análises do balanço hídrico foram realizadas empregando-se 10.000 simulações;
- (c) Valores de evapotranspiração:
  - Os valores decendiais de  $ET_o$  que servem de entrada no modelo foram estimados com o método de THORNTHWAITE (1948), obtidos com os dados de temperatura média do ar da cidade de Ponta Grossa-PR;
  - Optou-se por simular a  $ET_o$  de todos os decêndios com a distribuição de probabilidade normal. Assumir que a  $ET_o$  segue esta distribuição foi necessário porque o módulo “Balanço hídrico climatológico decendial” não possibilita a escolha de diferentes distribuições de probabilidade para os decêndios ao longo do ano;
  - Para transformar a  $ET_o$  em Evapotranspiração da Cultura ( $ET_c$ ) ao longo dos decêndios do ano, foi considerado uma cultura hipotética perene possuindo coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) igual a 1,0 ao longo de todo o ano;
- (d) Os valores de entrada da precipitação provável a 75%, respectiva para cada decêndio, foram obtidos com os dados climáticos de Ponta Grossa-PR, levando-se em consideração a distribuição de probabilidade (Gama, Normal, Exponencial, Triangular ou uniforme) que melhor se ajustou a série decendial de precipitações;
- (e) Armazenamento de água no solo:
  - As unidades de capacidade de campo ( $U_{CC}$ ) e ponto de murcha permanente ( $U_{PMP}$ ) para fazer o cálculo da capacidade de água disponível do solo ( $CAD$ ) (Equação 4.1) foram estimadas com o programa *SPLINTEX* a partir dos três tipos de solo considerados na região de Ponta Grossa (Tabela 4.1). Adotou-se uma profundidade efetiva do sistema radicular igual a 50 cm;

- Os valores de água disponível do solo ( $AD$ ) (Equação 4.2) foram obtidos no modelo considerando valores de fração água disponível ( $p$ ) para uma cultura hipotética, igual a 0,5 ao longo de todo o ano;
- Para estimar o armazenamento de água no solo e, conseqüentemente, calcular os valores de “negativo acumulado” no balanço hídrico, foram utilizadas as equações Co-senoidal, Exponencial (THORNTHWAITE & MATHER, 1955), Potencial de Primeira Ordem (RIJTEMA & ABOUKHALED, 1975), BRAGA (1982) e Potencial de segunda ordem.

(f) O manejo decendial das irrigações suplementares foi realizado conforme a Tabela 4.2

Tabela 4.2. Manejo de irrigações suplementares utilizadas nas análises de simulação.

Manejo	Decêndios ao longo do ano											
	1-3	4-6	7-9	10-12	13-15	16-18	19-21	22-24	25-27	28-30	31-33	34-37
Manejo 1	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Manejo 2	■	■	■	□	□	□	□	□	□	■	■	■
Manejo 3	□	□	□	■	■	■	■	■	■	□	□	□
Manejo 4	□	■	□	■	□	■	□	■	□	■	□	■
Manejo 5	■	□	■	□	■	□	■	□	■	□	■	□
Manejo 6	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□

Irriga
  Não irriga

O manejo da irrigação no modelo *MORETTI* é feito com a utilização de 37 caixas de seleção, cada uma delas correspondendo a um decêndio. A seleção de uma caixa indica a permissão da irrigação no respectivo decêndio e a não seleção indica ausência da irrigação. É importante observar para as opções “irrigar” das caixas de seleção, que o modelo considera a condição de irrigação suplementar. Desta forma, as irrigações somente são realizadas quando o armazenamento e a fração da capacidade de água disponível no solo acusarem a necessidade.

#### 4.4 CENÁRIO PARA AVALIAR OS LIMITES DE UTILIZAÇÃO DO MÓDULO “BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO” DECENDIAL (Quarta etapa)

Visando avaliar os limites de utilização do módulo “Balanço hídrico climatológico decendial”, foi realizado um contraste entre a  $ET_c$ , chuva provável a 75%, deficiência hídrica anual ( $DEF$ ) e a água disponível no solo ( $AD$ ) para as localidades de Ponta Grossa, Apucarana, Cascavel e Morretes, sob diferentes condições de armazenamento de água no solo.

Os itens dispostos abaixo especificam os principais dados e opções que foram realizados para fazer as análises:

- (a) Local: os balanços hídricos foram realizados para as cidades paranaenses de Apucarana, Cascavel, Morretes e Ponta Grossa;
- (b) Número de simulações: as análises do balanço hídrico foram realizadas empregando-se 10.000 simulações;
- (c) Estimativa dos valores de  $ET_o$  e chuva provável a 75%:
  - Os valores de  $ET_o$  decendial foram simulados baseando-se na distribuição Normal. Os valores decendiais de chuva provável a 75% foram estimados baseando-se na distribuição de probabilidade de melhor ajuste para as quatro localidades. Todo o processo de determinação da  $ET_o$  e chuva provável a 75% seguiu os mesmos procedimentos já indicados nos Itens 4.3.2 e 4.3.3 descritos anteriormente. Para transformar a  $ET_o$  em Evapotranspiração da Cultura ( $ET_c$ ) ao longo dos decêndios do ano, foi considerado uma cultura hipotética perene possuindo coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) igual a 1,0 ao longo de todo o ano;
- (d) Armazenamento de água no solo:
  - As umidades de capacidade de campo ( $U_{CC}$ ) e ponto de murcha permanente ( $U_{PMP}$ ) para fazer o cálculo da capacidade de água disponível ( $CAD$ ) (Equação 4.1) foram estimadas com o solo argiloso utilizado para as simulações dos balanços hídricos de Ponta Grossa-PR. Os 17 valores de  $CAD$ , variando de 20 mm e 100 mm em intervalos de 5 mm (20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95 e 100 mm), foram obtidos ajustando-se a profundidade do sistema radicular;
  - Os valores de água disponível do solo ( $AD$ ) (Equação 4.2) foram obtidos no modelo considerando a fração água disponível ( $p$ ) igual a 0,5 para uma cultura hipotética ao longo de todo o ano;
  - Para estimar o armazenamento de água no solo e, conseqüentemente, calcular os valores de “negativo acumulado” no balanço hídrico, foi utilizada a equação Co-senoidal;
- (e) Empregou-se apenas o manejo que considera o uso da irrigação ao longo de todo o ano (Manejo 1 da Tabela 4.2);

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 VERIFICAÇÃO DO PROCESSO DE GERAÇÃO DE NÚMEROS ALEATÓRIOS DO VISUAL BASIC (MACROS) DO MICROSOFT EXCEL 2000 (Primeira etapa)

#### 5.1.1 Teste das séries para aleatoriedade

Na aplicação do teste das séries para aleatoriedade foram obtidos valores de  $z$  padronizado considerando a média e a variância das variáveis  $N_1$  e  $N_2$ , conforme a metodologia de SPIEGEL (1993). Foi obtido o número total de séries ( $V$ ), tanto com valores menores ( $N_1$ ) quanto maiores ( $N_2$ ) que a mediana. A Tabela 5.1 apresenta os valores de  $z$  padronizado e  $V$  para as 30 séries de  $NA$  (números aleatórios) gerados.

Tabela 5.1. Valores de  $z$  padronizado calculado e número total de séries ( $V$ ) nas 30 seqüências de  $NA$  ( $S$ ) gerados no módulo *Visual Basic* (macro).

$S$	$V$	$z$												
1	4936	-1,30	7	5000	-0,02	13	5072	1,42	19	5075	1,48	25	5002	0,02
2	5021	0,40	8	4986	-0,30	14	4994	-0,14	20	4942	-1,18	26	5046	0,90
3	5016	0,30	9	4995	-0,12	15	4980	-0,42	21	4987	-0,28	27	4958	-0,86
4	5027	0,52	10	4979	-0,44	16	4933	-1,36	22	5000	-0,02	28	4962	-0,78
5	4975	-0,52	11	4866	-2,70	17	4967	-0,68	23	4979	-0,44	29	5057	1,12
6	4968	-0,66	12	5018	0,34	18	5076	1,50	24	5003	0,04	30	4966	-0,70

Analisando-se os dados da Tabela 5.1 pode-se observar a ocorrência de valores negativos e positivos de  $z$  padronizado. Valores positivos de  $z$  indicam que a seqüência apresenta muitas subdivisões ou muitas séries. Valores negativos demonstram poucas séries na seqüência testada. Das 30 seqüências analisadas, observou-se que 19 (63,3%) apresentaram valores negativos de  $z$  calculado. Comparando-se os valores de  $z$  em módulo, observou-se que o maior valor negativo ( $z = -2,7$ ) superou em 80% o maior valor positivo ( $z = +1,50$ ). Quanto maior o valor de  $z$  padronizado, independente do seu sinal, menor a possibilidade da seqüência ser considerada como aleatória. Ainda com relação aos dados da Tabela 5.1, nota-se que os valores de  $z$  padronizado são maiores quanto mais distante de 5.000 estiver o valor de  $V$ . Isto pode ser observado nas seqüências de número 22 e 11, que apresentaram valores de  $z$  iguais a  $-0,02$  e  $-2,7$ , respectivamente.

Avaliando-se a distribuição de freqüência dos valores de  $z$  padronizado da Tabela 5.2, verifica-se a concentração dos mesmos em torno do valor 0,1, que correspondente na distribuição de  $Z$  padronizado a 92% de significância. Esta concentração fica mais explícita na Figura 5.1, que relaciona os valores de  $z$  padronizado com a sua freqüência relativa de ocorrência. Pode-se observar também na Figura 5.1 que a distribuição dos valores de  $z$  padronizado calculado tende a uma distribuição normal.

Tabela 5.2. Distribuição de freqüência dos valores de  $z$  padronizado das 30 seqüências de  $NA$  gerados no módulo *Visual Basic (macros)* do *Microsoft Excel 2000*.

Classes	Limite de classe		Centro de Classe	Freqüência (%)		Freqüência relativa (%)	
	Inferior	Superior		Por classe	Acumulada	Por classe	Acumulada
1	$> -2,70$	$\leq -1,96$	-2,33	1	1	3	3
2	-1,96	$\leq -1,21$	-1,59	2	3	6	10
3	-1,21	$\leq -0,47$	-0,84	7	10	23	33
4	-0,47	$\leq +0,27$	-0,10	11	21	36	70
5	0,27	$\leq +1,01$	0,64	5	26	16	86
6	1,01	$\leq +1,76$	1,39	4	30	13	100
7	$> 1,76$	$\leq +2,50$	2,13	0	30	0	100
Soma	—	—	—	30	30	100	100

Obs.: Intervalo de classe ( $IC$ ) é igual a 0,74, Maior valor absoluto de  $z$  foi 2,7; Menor valor de  $z$  foi de 0,02.

A Figura 5.1a permite verificar que 94% da freqüência relativa dos valores de  $z$  concentra-se entre o intervalo  $-1,59$  e  $1,76$ .

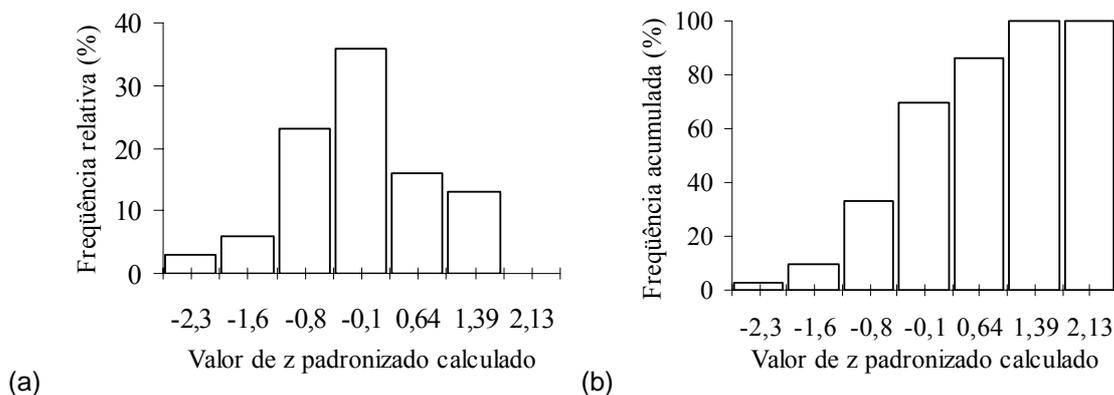


Figura 5.1 – (a) Freqüência relativa e (b) freqüência relativa acumulada dos valores de  $z$  padronizado calculado para 30 seqüências de  $NA$ , seguindo a metodologia proposta por SPIEGEL(1993).

Os valores apresentados na Tabela 5.3 foram obtidos a partir da aplicação do teste estatístico dos valores de  $z$  padronizado calculado para as 30 seqüências em 8 níveis de significância estatística. Analisando-se os resultados observa-se que 29 das 30 seqüências comportaram-se como aleatórias para os níveis de 1%, 5% e 10% de significância. Assim, pode-se dizer que as seqüências de *NA* obtida com o gerador de números aleatórios (*GNA*) do módulo *Visual Basic* do *Microsoft Excel 2000* são aleatórias ao nível de 99%, 95% e 90% de probabilidade pelo Teste das Séries para Aleatoriedade proposto por SPIEGEL (1993).

Tabela 5.3. Resultado das análises do teste das séries para aleatoriedade considerando oito níveis de significância estatística e valores de  $z$  padronizado calculado.

Seqüência	Valor de $z$ calculado	Nível de significância estatística $\alpha$ e os respectivos valores de $z$ padronizado							
		1% 2,57	5% 1,96	10% 1,65	20% 1,28	40% 0,84	60% 0,52	80% 0,25	90% 0,13
1	-1,30	+	+	+	-	-	-	-	-
2	-0,40	+	+	+	+	+	+	-	-
3	0,30	+	+	+	+	+	+	-	-
4	0,52	+	+	+	+	+	-	-	-
5	-0,52	+	+	+	+	+	-	-	-
6	-0,66	+	+	+	+	+	-	-	-
7	-0,02	+	+	+	+	+	+	+	+
8	-0,30	+	+	+	+	+	+	-	-
9	-0,12	+	+	+	+	+	+	+	+
10	-0,44	+	+	+	+	+	+	-	-
11	-2,70	-	-	-	-	-	-	-	-
12	0,34	+	+	+	+	+	+	-	-
13	1,42	+	+	+	-	-	-	-	-
14	-0,14	+	+	+	+	+	+	+	-
15	-0,42	+	+	+	+	+	+	-	-
16	-1,36	+	+	+	-	-	-	-	-
17	-0,68	+	+	+	+	+	-	-	-
18	1,50	+	+	+	-	-	-	-	-
19	1,48	+	+	+	-	-	-	-	-
20	-1,18	+	+	+	+	-	-	-	-
21	-0,28	+	+	+	+	+	+	-	-
22	-0,02	+	+	+	+	+	+	+	+
23	-0,44	+	+	+	+	+	+	-	-
24	0,04	+	+	+	+	+	+	+	+
25	0,02	+	+	+	+	+	+	+	+
26	0,90	+	+	+	+	-	-	-	-
27	-0,86	+	+	+	+	-	-	-	-
28	-0,78	+	+	+	+	+	-	-	-
29	1,12	+	+	+	+	-	-	-	-
30	-0,70	+	+	+	+	+	-	-	-

“+”seqüência é aleatória para o nível de significância considerado (não significativo, aceita-se  $H_0$ ); “-” a seqüência não é aleatória para o nível de significância considerado (significativo, aceita-se  $H_1$ ).

Em contra partida, apenas 5 seqüências foram consideradas aleatórias para um nível de significância de 90%. Observou-se então, que o aumento do nível de significância estatística

do teste eleva a possibilidade de aceitar a hipótese de nulidade ( $H_0$ ), ou seja, a aleatoriedade da seqüência. Desta forma, verifica-se que a “dureza” do Teste das Séries para Aleatoriedade reduz a medida que se aumenta o nível de significância. Assim uma seqüência de  $NA$  será tão melhor quanto menor for o seu valor de  $z$  padronizado.

### 5.1.2 Avaliação do gráfico de dispersão das seqüências de $NA$

A avaliação das seqüências de  $NA$  em gráfico de dispersão pode identificar tendências assim como heterogeneidade na distribuição dos valores dentro do plano cartesiano. A análise visual do gráfico de dispersão é um teste empírico citado na bibliografia, porém é subjetivo. Esta subjetividade do teste faz com que se tenham, muitas vezes, conclusões distintas para um mesmo grupo de dados. Pode-se dizer que o teste é bastante influenciado pelo pesquisador e depende da sua capacidade de abstrair tendências e concentrações nos dados.

A Figura 5.2 apresenta o gráfico de dispersão do Teste de análise visual, contendo a melhor e a pior das 30 seqüências identificadas por meio do Teste das Séries para Aleatoriedade. Os valores aleatórios apresentaram-se bem distribuídos na área do gráfico em ambas as situações. Observaram-se áreas com diferentes densidades de pontos e pequenas regiões vazias. Também foi possível abstrair para as duas seqüências, tendências em algumas áreas.

Não foi possível determinar a melhor seqüência de  $NA$  por meio do Teste de análise visual, mesmo quando se analisou as condições extremas (melhor e pior seqüência).

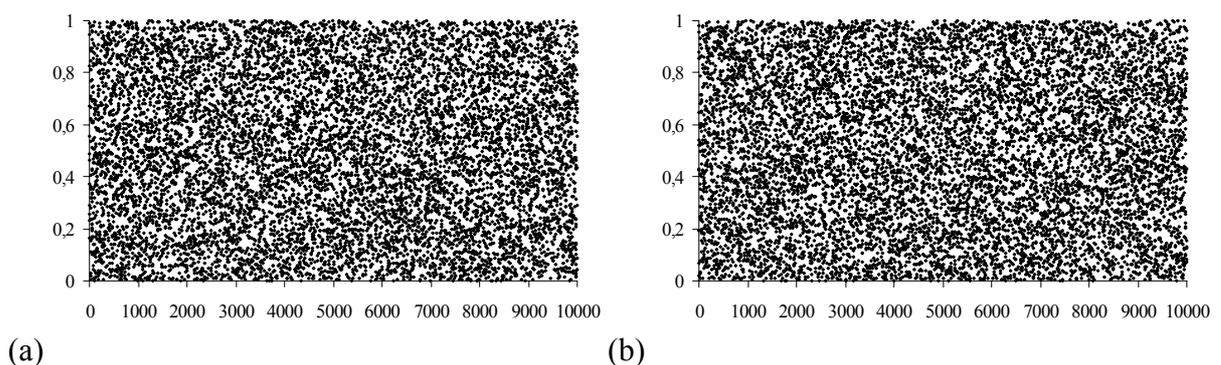


Figura 5.2 – Gráficos de dispersão da (a) melhor e (b) pior seqüência de  $NA$  identificadas por intermédio do Teste das Séries para Aleatoriedade.

### 5.1.3 Teste do Chi-quadrado

A Figura 5.3 apresenta a distribuição de frequência para a melhor e pior seqüência de *NA* identificada por meio do Teste das Séries para Aleatoriedade. Analisando-se a Figura 5.3 nota-se que as duas seqüências apresentam pequenas variações de frequência, sustentando a hipótese de que as mesmas tendem para uma distribuição Uniforme. A amplitude entre a maior e menor frequência de classe foi de 1,05% para a seqüência 22 e 0,86% para a seqüência 11, que foram respectivamente, a melhor e pior condição pelo Teste das Séries para Aleatoriedade. Esta constatação contraria a avaliação do Teste das Séries para a Aleatoriedade e se contrapõe à característica de uniformidade de frequências, presumida para uma distribuição de probabilidade uniforme (ASSIS *et al.*, 1996). Baseando-se nos dados da Figura 5.3 observou-se amplitude máxima de 0,75% e mínima de 0,05% entre a melhor e a pior seqüência de *NA*.

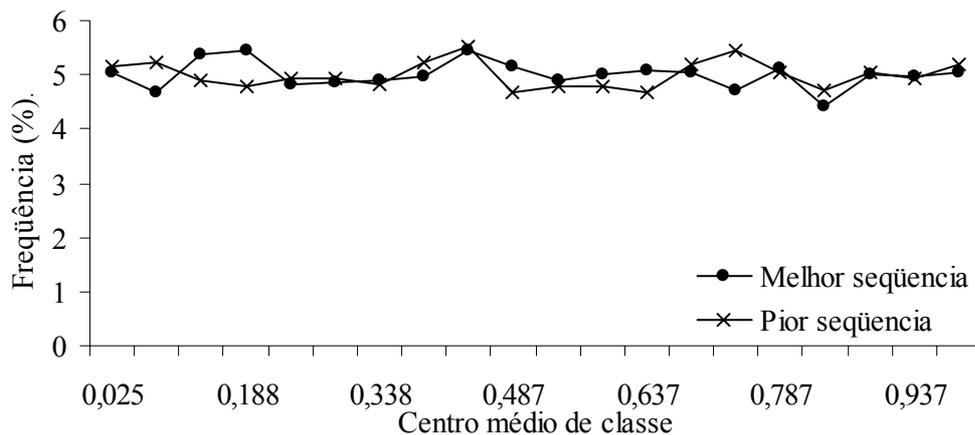


Figura 5.3 – Gráfico de distribuição de frequência para a (a) melhor e (b) pior seqüência de *NA* identificada por meio do Teste das Séries para Aleatoriedade.

A Tabela 5.4 apresenta os valores de Chi-quadrado obtidos com as seqüências de *NA*, considerando que as mesmas seguem uma distribuição Uniforme.

Observou-se expressiva variação nos valores obtidos, o que nos indica conclusões variadas no teste de chi-quadrado.

O teste revela que apenas 7 das 30 seqüências geradas foram consideradas não uniformes para algum dos níveis de probabilidade estatística. Assim, pode-se afirmar que o *GNA* do *Visual Basic* gerou seqüências de *NA* com distribuição uniforme pelo teste de Chi-quadrado ao nível de significância estatística de 1%, 5% e 10%.

Tabela 5.4. Teste de Chi-quadrado para as 30 seqüências de *NA* considerando quatro níveis de probabilidade.

Seqüência	$\chi^2$ calculado	Chi-quadrado tabelado			Seqüência	$\chi^2$ calculado	Chi-quadrado tabelado		
		$\chi^2_{0,90;17}$ 24,76	$\chi^2_{0,95;17}$ 27,58	$\chi^2_{0,99;17}$ 33,40			$\chi^2_{0,90;17}$ 24,76	$\chi^2_{0,95;17}$ 27,58	$\chi^2_{0,99;17}$ 33,40
1	13,20	+	+	+	16	20,10	+	+	+
2	30,05	-	-	+	17	20,44	+	+	+
3	24,42	+	+	+	18	20,90	+	+	+
4	30,65	-	-	+	19	15,71	+	+	+
5	16,53	+	+	+	20	22,75	+	+	+
6	20,81	+	+	+	21	23,24	+	+	+
7	17,26	+	+	+	22	23,45	+	+	+
8	26,03	-	+	+	23	14,40	+	+	+
9	13,26	+	+	+	24	21,51	+	+	+
10	18,67	+	+	+	25	13,70	+	+	+
11	23,99	+	+	+	26	25,59	-	+	+
12	13,58	+	+	+	27	26,77	-	+	+
13	25,40	-	+	+	28	20,48	+	+	+
14	16,70	+	+	+	29	15,36	+	+	+
15	21,38	+	+	+	30	36,14	-	-	-

“+” a seqüência é aleatória para o nível de significância considerado (não significativo, aceita-se  $H_0$ ); “-” a seqüência não é aleatória para o nível de significância considerado (significativo, aceita-se  $H_1$ ).

A Figura 5.4 apresenta a distribuição de freqüência relativa e acumulada dos valores de chi-quadrado determinados conforme a metodologia apresentada por ASSIS *et al.* (1996) e relacionados na Tabela 5.4. Analisando a Figura 5.4a não se observa um valor de chi-quadrado mais freqüente, mas sim uma faixa que vai de 14,52 ( $\alpha = 63\%$ ) a 25,06 ( $\alpha = 9,3\%$ ). A faixa de valores de Chi-quadrado é suficiente para aceitar que as seqüências são uniformes para os níveis de probabilidade identificados na Tabela 5.4 (aceita-se a hipótese  $H_0$ ).

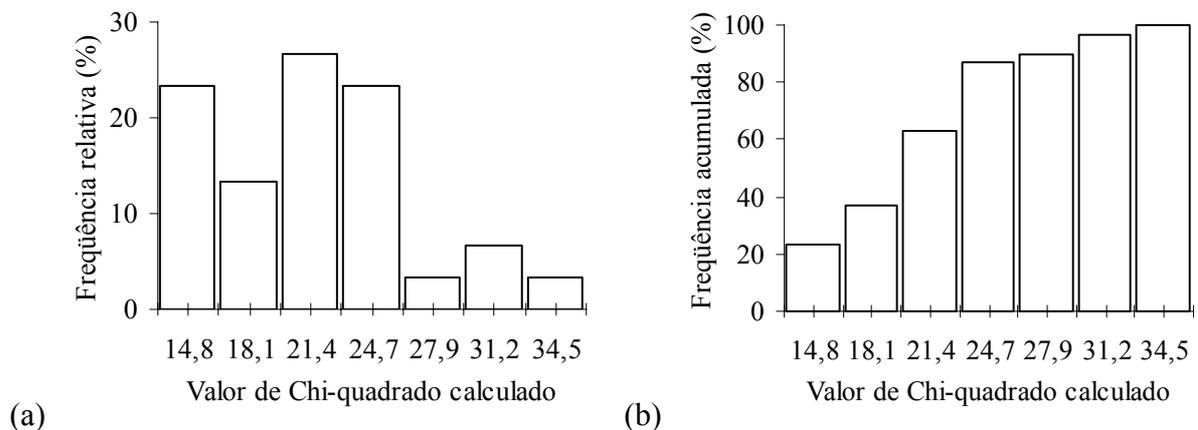


Figura 5.4 – (a) Freqüência relativa e (b) freqüência relativa acumulada dos valores de Chi-quadrado obtidos para as 30 seqüências de *NA* gerados no módulo *Visual Basic* do *Microsoft Excel* 2000.

Analisando-se os resultados obtidos com o Teste das Séries para a Aleatoriedade e Teste de Qui-quadrado, observou-se que ocorreu predominância pela aleatoriedade das seqüências geradas pelo Módulo *Visual Basic* do *Microsoft Excel* 2000.

Os resultados do Teste das Séries para Aleatoriedade empregando níveis de significância ( $\alpha$ ) maiores que 40% indicaram que muitas das seqüências não se apresentaram aleatórias. No entanto, níveis de significância elevados podem resultar na diminuição da confiança do teste de hipótese, que implica na maior possibilidade de rejeitar a aleatoriedade da seqüência quando a mesma é verdadeira (erro tipo I).

Inúmeros autores, entre eles SPIEGEL (1993) e ASSIS *et al.* (1996), reportam que a única forma de reduzir os erros do tipo I e II é aumentar o tamanho da amostra. O modelo “Balanço hídrico climatológico decendial” simula até 10.000 balanços hídricos com 37 decêndios cada. Sendo assim, acredita-se que essa seqüência de valores constitui uma amostra de *NA* suficiente para atenuar tais erros e grande o bastante para representar com fidelidade as variáveis simuladas.

A redução da possibilidade de considerar uma seqüência aleatória quando não for (erro tipo II), pode ser realizada ajustando-se o nível de significância estatística ( $\alpha$ ), ou seja, o valor crítico que define as áreas de aceitação da aleatoriedade e não aleatoriedade da seqüência de *NA*. Os níveis de confiança estatística de 95% e 99% são os mais recomendados e aplicados na experimentação agropecuária para testar hipóteses sobre populações contínuas (CAMPOS, 1984).

Considerando-se tais resultados e as recomendações de ASSIS *et al.*(1996) quanto ao nível de significância estatística ( $\alpha$ ) para os testes de hipótese, verificou-se que o módulo *Visual Basic* produziu seqüências de números aleatórios aos níveis de 0,05 ( $\alpha = 5\%$ ) e 0,01 ( $\alpha = 1\%$ ).

## 5.2 ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS DE ENTRADA PARA SIMULAR O “BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO DECENDIAL” (Segunda etapa)

### 5.2.1 Estimativa da *ET<sub>o</sub>* e probabilidade de sua ocorrência

A Tabela 5.5 apresenta para a região de Ponta Grossa, os parâmetros estatísticos decendiais da *ET<sub>o</sub>* obtidos nas análises de teste de aderência com o módulo “Análise Estatística” do modelo *MORETTI*, a 5% de significância. Os parâmetros estatísticos relacionados são: menor valor, maior valor, média, desvio padrão, moda, alfa e beta, assim como o número de anos disponíveis para cada decêndio do ano. Os valores de *ET<sub>o</sub>* a 75% de probabilidade foram obtidos com a função distribuição de probabilidade de melhor ajuste. A Figura 5.5 apresenta para a região de Ponta Grossa-PR os respectivos valores decendiais de *ET<sub>o</sub>* média, provável a 75%, maior e menor valor.

Os resultados apresentados na Tabela 5.5 e Figura 5.5 permitem verificar que:

- As distribuições de probabilidade Normal e Gama foram as distribuições que melhor se ajustaram a *ET<sub>o</sub>* estimada para Ponta Grossa. A distribuição Normal ajustou-se bem em 26 decêndios e a Gama a 11 decêndios. As distribuições Uniforme, Exponencial e Triangular não apresentaram melhor ajuste em nenhum dos decêndios do ano;
- Os resultados obtidos para a distribuição Normal concordam com os encontrados por CASTRO (1994), que destaca que variáveis sem limite inferior e superior são bem representadas pela distribuição de probabilidade Normal;
- A amplitude média entre os valores decendiais de *ET<sub>o</sub>* provável e média ficou em 2,2 mm ( $s = 0,30$  mm/decêndio). O maior e o menor valor de amplitude da *ET<sub>o</sub>* ao longo do ano ficou em 3,1 mm e 1,5 mm, respectivamente;
- O maior valor de *ET<sub>o</sub>* decendial provável a 75% ficou em 36,7 mm e o menor em 14,1 mm. O maior valor de *ET<sub>o</sub>* média ficou em 34,1 mm e o menor em 12,2 mm;
- Para o período primavera/verão, entre os decêndios 28 (28/09) a 11 (20/04) verificou-se uma *ET<sub>o</sub>* média de 28,32 mm ( $s = 4,87$ ) e *ET<sub>o</sub>* provável a 75% de 30,6 mm ( $s = 4,91$  mm). No período outono/inverno, entre os decêndios 12 e 27 (21/04 a 27/09) verificou-se uma *ET<sub>o</sub>* média de 15,0 mm ( $s = 2,69$  mm) e *ET<sub>o</sub>* provável a 75% de 17,3 mm ( $s = 2,87$  mm);
- A *ET<sub>o</sub>* média corresponde, em média, a 90,12% ( $s = 3,11\%$ ) da *ET<sub>o</sub>* provável estimada a 75%.

Tabela 5.5. Parâmetros estatísticos decendiais da *ETo*, obtidos nas análises de teste de aderência, a 5% de significância, com as distribuições de probabilidade Normal (N), Triangular (T), Uniforme (U), Exponencial (E) e Gama (G), e cálculo da *ETo* provável a 75% de probabilidade para Ponta Grossa.

Decêndios	Série (ano)	Maior Valor (mm)	Menor Valor (mm)	Moda (mm)	Média (mm)	Desvio Padrão (mm)	Parâ- metro Alfa	Parâ- metro Beta	$D_{max}$ Tabela- do 5%	$D_{max}$ Calcu- lado	Melhor Distri- buição	<i>ETo</i> Provável (mm)
1 (01/01 a 10/01)	50	43,5	26,8	36,21	34,12	3,76	84,62	0,40	0,19	0,04	N	36,7
2 (11/01 a 20/01)	50	42,6	26,1	33,32	33,52	3,63	88,89	0,38	0,19	0,08	G	35,8
3 (21/01 a 30/01)	50	40,8	27,6	31,74	34,02	3,10	122,81	0,28	0,19	0,04	N	36,1
4 (31/02 a 09/02)	49	39,5	26,0	31,94	33,07	2,83	138,26	0,24	0,20	0,01	N	35,0
5 (10/02 a 19/02)	49	39,7	24,7	33,17	32,68	3,19	106,16	0,31	0,20	0,03	N	34,8
6 (20/02 a 01/03)	50	38,6	24,3	30,59	31,16	3,11	101,53	0,31	0,19	0,04	N	33,3
7 (02/03 a 11/03)	51	34,9	22,9	29,65	29,62	2,91	103,26	0,29	0,19	0,04	N	31,6
8 (12/03 a 21/03)	51	35,8	23,7	26,01	27,89	2,82	103,73	0,27	0,19	0,07	N	29,8
9 (22/03 a 31/03)	51	32,9	19,4	25,31	26,47	3,01	78,79	0,34	0,19	0,06	G	28,4
10 (01/04 a 10/04)	50	31,1	17,0	24,98	23,76	3,31	51,78	0,46	0,19	0,05	N	26,0
11 (11/04 a 20/04)	50	30,2	14,9	21,57	21,82	3,46	41,02	0,53	0,19	0,03	N	24,2
12 (21/04 a 30/04)	50	27,5	12,9	19,27	18,95	3,39	32,68	0,58	0,19	0,04	N	21,2
13 (01/05 a 10/05)	49	23,1	9,8	17,29	16,56	3,38	23,58	0,70	0,20	0,05	N	18,8
14 (11/05 a 20/05)	49	21,9	5,5	14,72	15,11	3,12	20,60	0,73	0,20	0,03	N	17,2
15 (21/05 a 30/05)	49	20,5	6,4	12,57	13,02	3,06	17,08	0,76	0,20	0,04	N	15,1
16 (31/05 a 09/06)	49	21,5	6,4	11,13	12,44	3,57	12,38	1,01	0,20	0,04	G	14,6
17 (10/06 a 19/06)	49	18,8	4,9	14,42	12,52	2,95	16,53	0,76	0,20	0,02	N	14,5
18 (20/06 a 29/06)	50	18,1	7,2	13,31	12,32	2,67	20,31	0,61	0,19	0,07	N	14,1
19 (30/06 a 09/07)	50	18,3	7,7	12,37	12,72	2,71	21,63	0,59	0,19	0,04	N	14,6
20 (10/07 a 19/07)	49	22,0	6,0	12,98	12,20	3,46	12,53	0,97	0,20	0,03	G	14,3
21 (20/07 a 29/07)	50	19,6	5,1	13,24	12,82	3,69	10,89	1,18	0,19	0,05	N	15,3
22 (30/07 a 08/08)	50	20,9	7,1	13,13	13,97	3,44	16,37	0,85	0,19	0,06	N	16,3
23 (09/08 a 18/08)	50	22,9	7,9	14,43	14,85	3,34	20,56	0,72	0,19	0,03	G	16,9
24 (19/08 a 28/08)	49	23,2	9,1	15,24	16,86	3,42	23,42	0,72	0,20	0,08	N	19,2
25 (29/08 a 07/09)	50	29,8	8,1	14,93	17,50	4,52	15,62	1,12	0,19	0,08	G	20,2
26 (08/09 a 17/09)	49	28,3	10,1	20,37	18,87	3,94	21,50	0,88	0,20	0,08	N	21,5
27 (18/09 a 27/09)	50	29,2	10,5	18,65	19,86	3,93	25,31	0,78	0,19	0,03	G	22,3
28 (28/09 a 07/10)	50	28,9	16,0	20,06	21,24	3,26	44,80	0,47	0,19	0,13	G	23,3
29 (08/10 a 17/10)	50	36,8	14,7	24,35	23,38	4,61	26,88	0,87	0,19	0,03	N	26,5
30 (18/10 a 27/10)	50	32,8	16,7	23,77	24,53	3,71	43,88	0,56	0,19	0,04	N	27,0
31 (28/10 a 06/11)	49	36,6	20,9	23,14	26,26	3,64	55,16	0,48	0,20	0,06	N	28,7
32 (07/11 a 16/11)	48	37,7	20,3	25,71	28,41	4,28	44,36	0,64	0,20	0,06	G	31,2
33 (17/11 a 26/11)	49	37,7	21,9	26,85	29,47	3,67	65,12	0,45	0,20	0,07	G	31,8
34 (27/11 a 06/12)	49	37,5	24,6	33,47	31,11	3,23	92,62	0,34	0,20	0,08	N	33,3
35 (07/12 a 16/12)	50	43,3	26,7	31,90	32,80	3,57	88,52	0,37	0,19	0,03	G	35,1
36 (17/12 a 26/12)	50	39,1	23,2	30,15	32,34	3,39	90,72	0,36	0,19	0,03	N	34,6
37 (27/12 a 31/12)	50	22,9	9,8	17,13	17,07	2,32	51,93	0,33	0,19	0,04	N	18,6

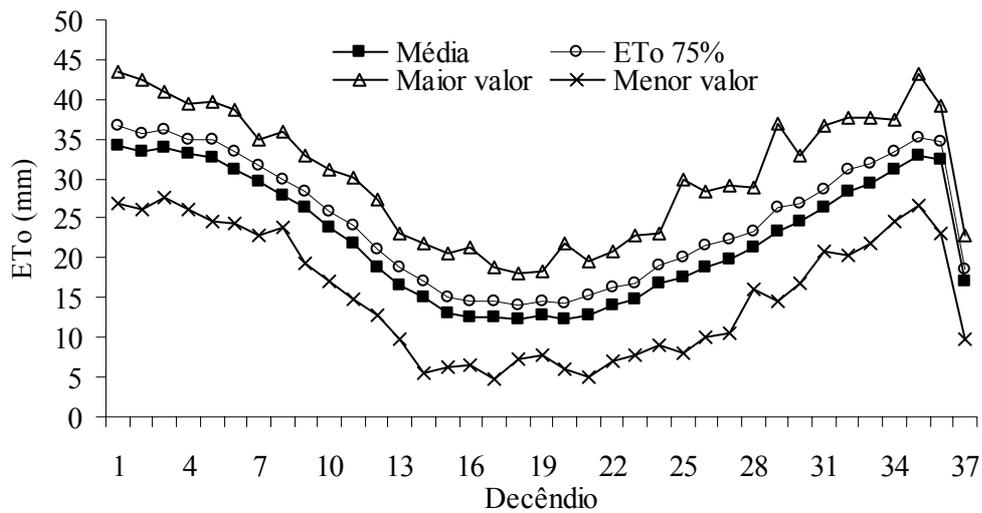


Figura 5.5 – Curva de tendência do menor valor, maior valor e média da  $ETo$  estimada com o método THORNTHWAITE (1948) e valores de  $ETo$  a 75% de probabilidade, obtidos com a distribuição de melhor ajuste para Ponta Grossa-PR.

A Figura 5.6 apresenta a probabilidade de ocorrer um valor maior ou igual à média da  $ETo$  para Ponta Grossa-PR, baseando-se em uma série de 50 anos de dados (1954–2004), considerando a distribuição de probabilidade de melhor ajuste.

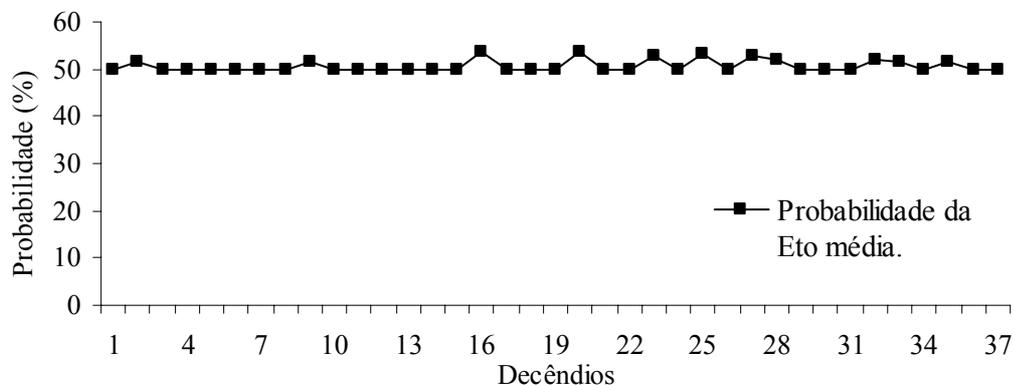


Figura 5.6 – Probabilidade de ocorrer um valor maior ou igual à  $ETo$  média de Ponta Grossa-PR, baseando-se em uma série de 50 anos de dados (1954–2004), considerando a distribuição de probabilidade de melhor ajuste.

Mediante os resultados obtidos com o teste de aderência da  $ETo$  para Ponta Grossa, optou-se por realizar as simulações da  $ETo$  de todos os decêndios com a distribuição Normal. Assumir que a  $ETo$  de todos os decêndios segue esta distribuição foi necessário porque o modelo “Balanço hídrico climatológico decendial” não possibilita a escolha de diferentes distribuições de probabilidade para a simulação da  $ETo$  dos decêndios ao longo do ano.

### 5.2.2 Precipitação pluvial e probabilidade de sua ocorrência

Para a determinação da precipitação a 75% de probabilidade foram obtidos os parâmetros estatísticos das funções de distribuição de probabilidade normal, gama, exponencial, triangular e uniforme. A Tabela 5.6 apresenta o número de anos válidos da seqüência disponível de precipitação, bem como os parâmetros estatísticos, menor valor, maior valor, moda, média, desvio padrão, alfa e beta para cada um dos decêndios do ano. Os resultados apresentados na referida tabela permitem verificar que:

- As distribuições de probabilidade Gama e Exponencial ajustaram-se melhor a precipitação de Ponta Grossa, ou seja, 23 e 11 decêndios, respectivamente. A distribuição Normal ajustou-se bem em 3 decêndios e as distribuições Uniforme e Triangular não apresentaram melhor ajuste a nenhum dos decêndios do ano.
- As distribuições Gama e Exponencial prevaleceram entre as demais funções testadas para os dados de Ponta Grossa, apresentando melhor ajuste em 34 dos 37 decêndios. Para ASSIS *et al.* (1996) a função distribuição de frequência Exponencial é um caso particular da distribuição Gama, o que reforça a hipótese de que essa última descreva com maior fidelidade os dados decendiais de chuva em Ponta Grossa. Autores como THOM (1958), CASTRO (1994), SAAD (1990) e ASSIS *et al.* (1996) reafirmaram essa constatação quando trabalhavam com dados acumulados de chuva em um curto período de tempo (5, 7, 10, 15 e 30 dias).
- Como a série de precipitação de Ponta Grossa tem aproximadamente 50 anos, a amplitude entre a média e moda indica que a chuva decendial não deve mesmo se ajustar a distribuição de probabilidade Normal. Observa-se também que o parâmetro de forma  $\alpha$  não excedeu a 100 em nenhum dos decêndios, o que de forma isolada, de acordo com THOM (1958) e FRIZZONE *et al.* (1985), indica bom ajuste a distribuição de probabilidade Gama.

Tabela 5.6. Parâmetros estatísticos decendiais da precipitação, obtidos nas análises de teste de aderência, a 5% de significância, com as distribuições de probabilidade Normal (*N*), Triangular (*T*), Uniforme (*U*), Exponencial (*E*) e Gama (*G*), e cálculo da precipitação provável a 75% de probabilidade para Ponta Grossa.

Decêndios	Série	Menor	Maior	Moda	Média	Desvio	Parâ-	Parâ-	$D_{max}$	$D_{max}$	Melhor	Prob.	Chuva
	(ano)	Valor	Valor	(mm)	(mm)	padrão	metro	metro	tabe-	calcu-	distri-	Precip.	Provável
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	Alfa	Beta	lado	lado	buição	Zero	(mm)
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(ad.)	(ad.)	5%			(%)	(mm)
1 (01/01 a 10/01)	49	2,6	286,6	20,35	61,21	53,07	1,53	39,91	0,196	0,031	G	2,0	23,9
2 (11/01 a 20/01)	49	1,7	235,5	16,31	59,99	57,38	1,06	56,70	0,196	0,021	E	2,0	16,1
3 (21/01 a 30/01)	50	6,1	211,2	18,92	53,71	38,65	2,04	26,31	0,194	0,049	G	0,0	26,1
4 (31/02 a 09/02)	48	5,5	148,9	68,24	54,33	32,52	2,30	23,65	0,200	0,050	N	2,0	30,8
5 (10/02 a 19/02)	47	4,3	194,8	63,83	58,01	40,57	1,91	30,38	0,200	0,070	G	4,0	24,7
6 (20/02 a 01/03)	49	5,5	155,5	14,88	50,90	36,55	1,69	30,20	0,200	0,050	G	2,0	21,1
7 (02/03 a 11/03)	49	2,0	149,1	29,58	50,93	34,21	1,68	30,33	0,200	0,047	G	3,8	20,1
8 (12/03 a 21/03)	50	1,4	102,9	33,12	44,91	29,32	1,82	24,65	0,190	0,079	G	1,9	19,6
9 (22/03 a 31/03)	47	1,0	180,8	12,24	41,52	41,03	0,92	45,22	0,200	0,060	E	5,9	9,5
10 (01/04 a 10/04)	46	1,2	146,7	10,29	34,46	34,03	1,01	34,20	0,200	0,057	E	7,8	7,1
11 (11/04 a 20/04)	43	3,0	126,1	10,69	37,32	27,77	1,84	20,25	0,210	0,075	G	13,7	10,9
12 (21/04 a 30/04)	42	1,0	182,2	12,32	39,23	38,28	0,99	39,44	0,210	0,030	E	15,7	4,6
13 (01/05 a 10/05)	38	3,2	132,0	12,40	39,31	36,88	1,13	34,78	0,220	0,037	E	22,0	1,6
14 (11/05 a 20/05)	40	1,5	231,1	15,85	56,18	55,30	0,90	62,73	0,220	0,068	E	18,0	5,0
15 (21/05 a 30/05)	39	2,0	228,5	18,18	42,31	47,76	1,03	40,88	0,220	0,063	G	20,0	3,0
16 (31/05 a 09/06)	42	1,1	143,5	10,00	35,64	34,92	1,09	32,56	0,210	0,029	G	14,0	5,6
17 (10/06 a 19/06)	44	1,4	227,9	15,56	46,78	42,42	1,22	38,29	0,210	0,029	G	10,0	11,0
18 (20/06 a 29/06)	43	1,2	179,4	12,34	45,82	42,18	1,04	44,14	0,210	0,039	E	13,7	6,4
19 (30/06 a 09/07)	40	2,5	177,5	13,44	45,71	41,72	1,28	35,81	0,220	0,022	E	19,6	3,2
20 (10/07 a 19/07)	40	1,0	118,4	8,34	34,80	35,17	0,92	38,02	0,220	0,145	G	19,6	2,0
21 (20/07 a 29/07)	41	1,1	184,3	12,55	31,81	37,65	0,85	37,45	0,210	0,026	G	17,6	2,1
22 (30/07 a 08/08)	40	1,0	187,3	12,64	34,38	37,03	0,89	38,62	0,220	0,033	G	19,6	1,8
23 (09/08 a 18/08)	36	1,5	95,40	8,21	28,35	25,04	1,16	24,51	0,230	0,031	G	27,5	0,0
24 (19/08 a 28/08)	38	1,6	128,6	10,67	36,91	31,77	1,15	31,96	0,220	0,075	E	22,0	1,5
25 (29/08 a 07/09)	42	1,8	126,2	9,57	33,32	27,07	1,49	22,38	0,210	0,031	G	15,7	7,0
26 (08/09 a 17/09)	43	1,5	172,0	12,16	51,98	46,15	1,02	51,15	0,210	0,078	E	12,0	8,3
27 (18/09 a 27/09)	42	2,1	159,0	51,13	56,68	40,28	1,88	30,07	0,210	0,048	G	15,7	15,1
28 (28/09 a 07/10)	46	2,4	189,2	14,08	55,51	48,33	1,37	40,44	0,200	0,032	G	7,8	16,2
29 (08/10 a 17/10)	48	3,0	134,2	27,60	42,92	27,09	2,20	19,53	0,200	0,033	G	3,9	19,9
30 (18/10 a 27/10)	50	1,0	121,8	53,85	52,92	29,76	2,31	22,92	0,190	0,057	N	0,0	32,8
31 (28/10 a 06/11)	49	2,0	156,0	11,63	47,13	32,20	1,78	26,50	0,200	0,063	N	0,0	25,4
32 (07/11 a 16/11)	46	2,4	146,6	11,41	42,73	33,79	1,48	28,88	0,200	0,039	G	4,1	15,2
33 (17/11 a 26/11)	46	2,0	164,2	32,41	39,23	34,80	1,25	31,27	0,200	0,068	G	6,0	11,3
34 (27/11 a 06/12)	48	5,8	134,6	13,85	47,58	34,12	1,89	25,18	0,200	0,060	G	2,0	21,2
35 (07/12 a 16/12)	46	4,8	152,8	14,05	47,28	38,73	1,52	31,18	0,200	0,058	E	7,8	9,8
36 (17/12 a 26/12)	50	3,7	166,5	13,88	50,91	40,83	1,51	33,82	0,190	0,049	G	0,0	20,6
37 (27/12 a 31/12)	41	2,3	102,0	8,53	32,47	25,20	1,55	20,97	0,210	0,066	G	17,6	6,1

A Figura 5.7 apresenta um contraste entre os valores decendiais de precipitação pluvial média e provável a 75%. A Figura 5.8 relaciona a chuva decendial provável e a probabilidade de ausência de chuva para a localidade de Ponta Grossa-PR.

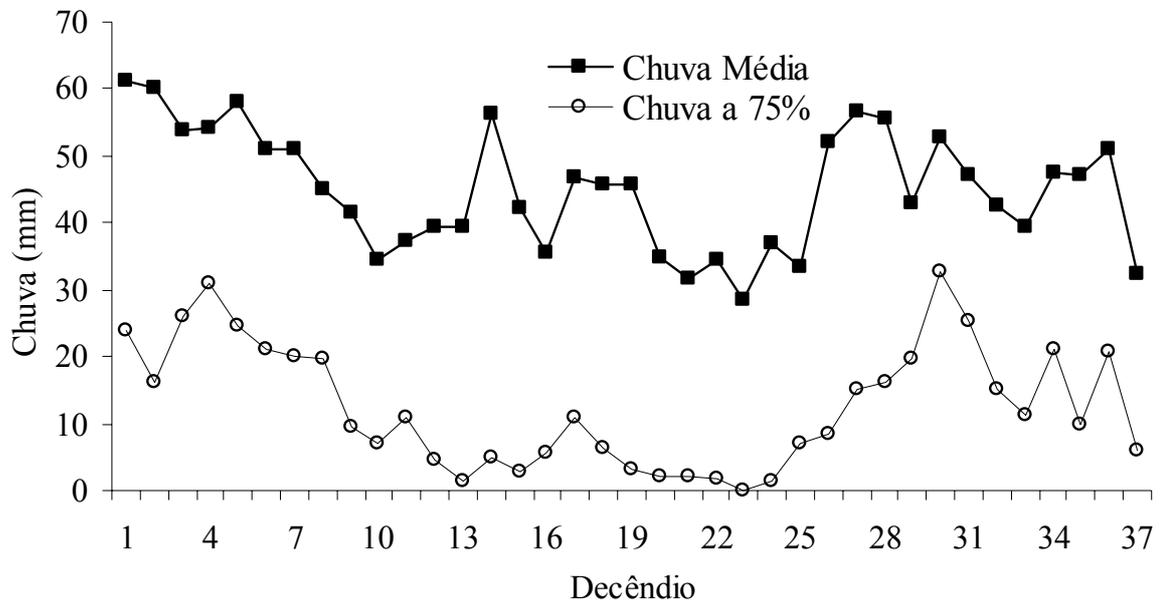


Figura 5.7 – Precipitação decendial média e provável a 75%, estimada com a distribuição de probabilidade de melhor ajuste para a região de Ponta Grossa-PR.

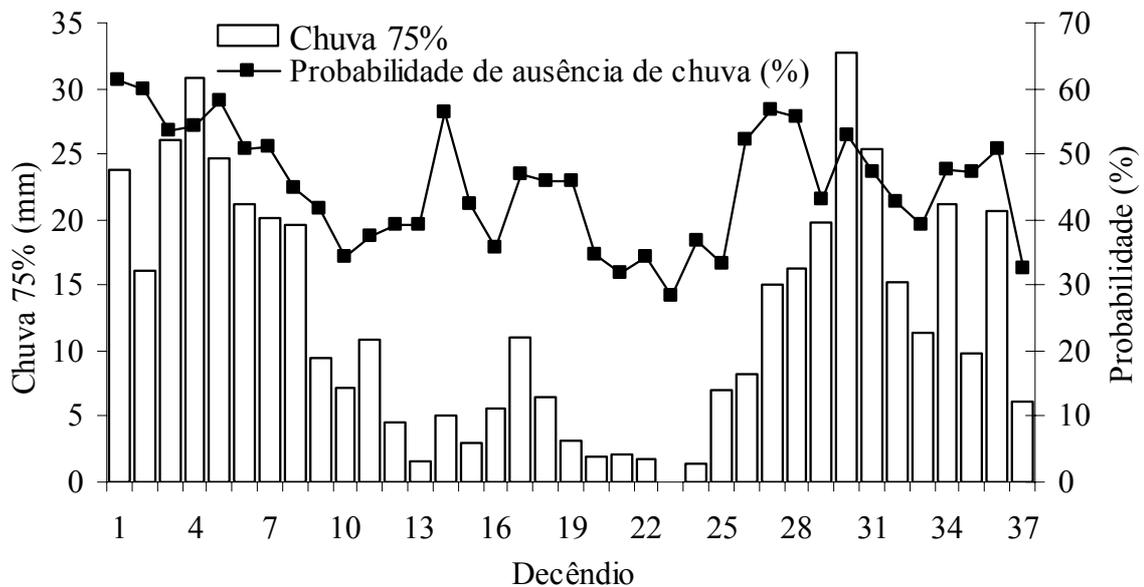


Figura 5.8 – Chuva decendial provável (75%) e probabilidade de ausência de precipitação ( $P = 0$ ) para uma série climática média de 44 anos em Ponta Grossa-PR.

Os resultados apresentados na Figura 5.7 permitem verificar que:

- A chuva provável a 75% correspondeu, em média, a 26,1% da chuva média decendial. A diferença média entre chuva provável e chuva média foi de 32,4 mm/decêndio. A maior amplitude entre as precipitações média e provável foi de 51,2 mm (14° decêndio) e a menor amplitude foi de 20,1 mm (30° decêndio).
- CASTRO (1994) comenta que a precipitação média é bastante empregada para a realização de projetos agrícolas no Brasil (RIBEIRO & LUNARDI, 1997b). Diante disso, utilizar a precipitação média em projetos de irrigação na região de Ponta Grossa pode levar ao subdimensionamento dos sistemas e os técnicos da área devem estar atentos a este fato. FRIZZONE *et al.* (1985) corrobora com esses resultados quando comenta que a média aritmética da precipitação não é representativa, na prática, para projetos, pois considera os valores extremos da série.

Os resultados apresentados na Figura 5.8 permitem verificar que:

- A região apresenta duas estações, sendo uma chuvosa, entre o 28° e 8° decêndio e, outra seca, entre o 9° e 27° decêndio, aproximadamente;
- As maiores probabilidades de ausência de precipitação ( $P = 0$ ) ocorreram entre os decêndios 11 e 27, o que corresponde ao período entre os meses de abril e setembro. Assim, a maior frequência de períodos com pequena precipitação ou estiagem concentra-se nas estações de outono e inverno.

A Figura 5.9 relaciona a probabilidade assumida quando se consideram os valores médios de precipitação pluvial para a localidade de Ponta Grossa-PR. Apenas os três decêndios com melhor ajuste a distribuição Normal apresentaram probabilidade de ocorrência próxima a 50% associada aos seus valores médios. Para o período chuvoso a probabilidade de ocorrência da precipitação média variou entre 30% e 40%. Dentro do período seco, nove decêndios apresentaram probabilidade menor que 30% de receber uma chuva igual ou superior à média. CUNHA *et al.* (1997) obteve resultados semelhantes ao estudar a chuva mensal em Bauru-SP, encontrando níveis de 30% a 50% de probabilidade para as precipitações médias. RIBEIRO & LUNARDI (1997b) e FRIZZONE *et al.* (1985) também apresentam dados que justificam os obtidos para a localidade de Ponta Grossa.

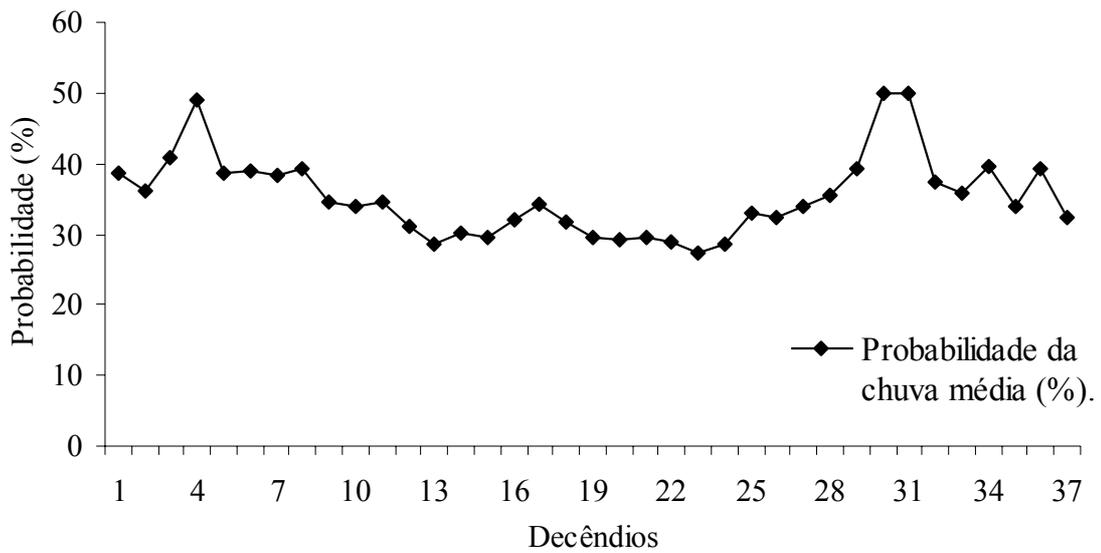


Figura 5.9 – Probabilidade de ocorrência da precipitação média para a região de Ponta Grossa, considerando a distribuição de probabilidade de melhor ajuste pelo teste de Kolmogorov-Smirnov.

### 5.2.3 Contraste entre precipitação e $ET_o$ provável a 75%

A Figura 5.10 apresenta um contraste entre os dados médios decendiais de  $ET_o$  e chuva para a região de Ponta Grossa-PR.

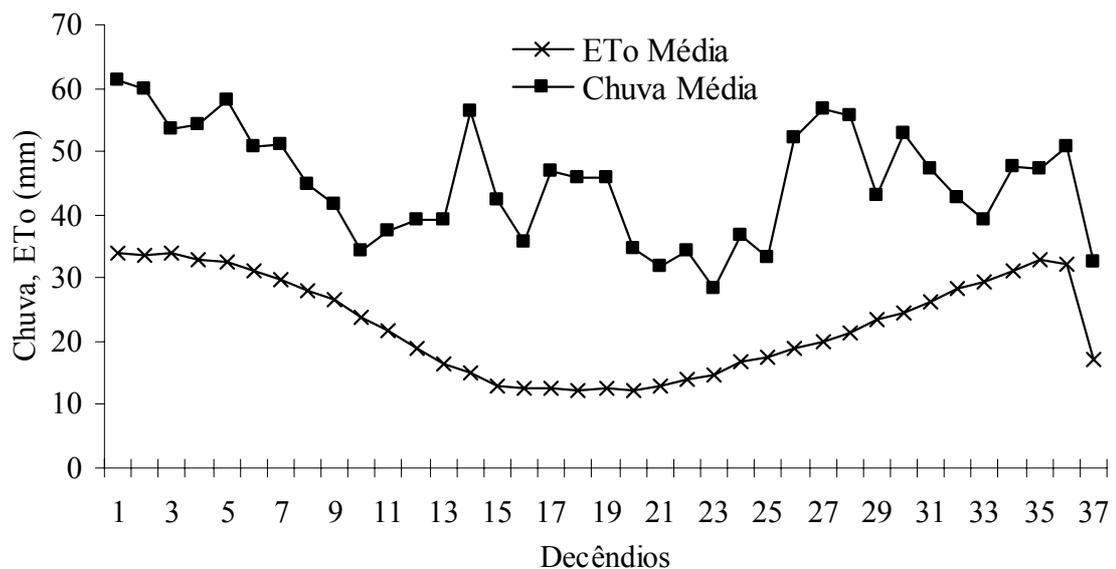


Figura 5.10 – Valores médios decendiais de  $ET_o$  e chuva para a região de Ponta Grossa-PR.

Considerando os dados apresentados na Figura 5.10 pode-se verificar que:

- A maior amplitude entre os valores médios de chuva e  $ET_o$  foi de 41,1 mm para o decêndio 14 (11/05 a 20/05) e a menor foi de 9,8 mm, para o decêndio 33 (17/11 a 26/11). A amplitude média ficou em 22,4 mm/decêndio ( $s = 7,23$  mm/decêndio);
- Os valores decendiais médios de  $ET_o$  e chuva para a região de Ponta Grossa indicaram que não há deficiência em nenhum decêndio do ano, ou seja, para todos os decêndios ocorreu a precipitação de uma lâmina de chuva maior que a  $ET_o$ ;
- Desconsiderando a possibilidade de ocorrência de veranicos e adotando apenas os dados médios de  $ET_o$  e chuva, observa-se que não há necessidade da instalação de sistemas de irrigação suplementar, pois há excedentes hídricos em todos os decêndios. Esses excedentes podem compor o armazenamento de água do solo e mantê-lo nas condições ideais para o pleno desenvolvimento das culturas;

A Figura 5.11 apresenta um contraste entre os valores de chuva provável e  $ET_o$  média e provável, para a região de Ponta Grossa-PR.

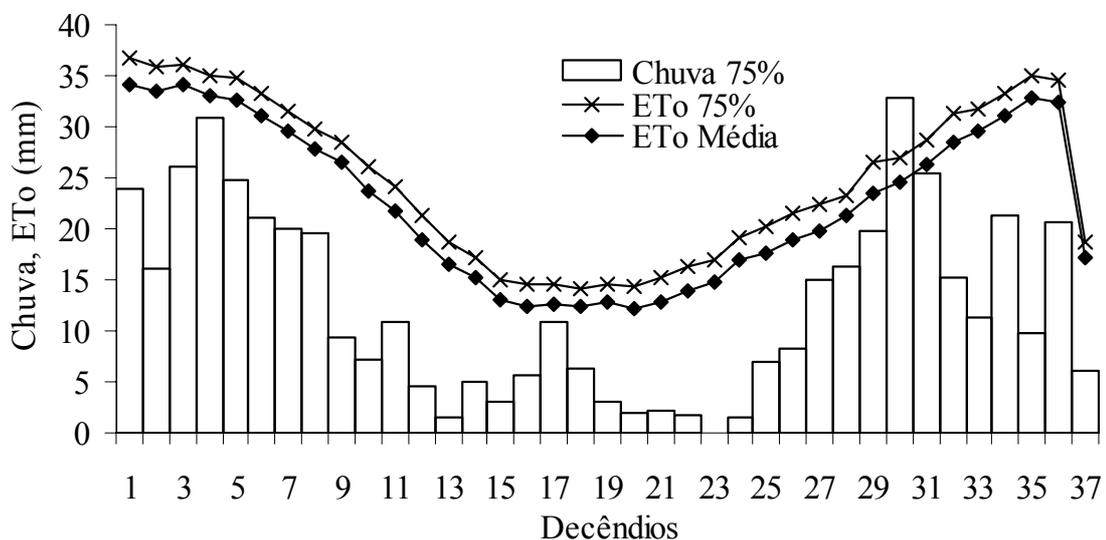


Figura 5.11 – Valores decendiais de chuva provável e evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) média e provável a 75%, para a região de Ponta Grossa-PR.

Analisando-se a Figura 5.11 é possível verificar que:

- Observa-se que a região de Ponta Grossa apresenta deficiência de água para todos os decêndios do ano, exceto no período entre 18 e 27 de outubro (decêndio 30). A chuva provável a 75% para o decêndio 30 excedeu em 5,8 mm a *ETo* provável para o mesmo período;
- A diferença média entre a *ETo* e a precipitação pluvial, ambas a 75% de probabilidade, foi de 12,7 mm/decêndio ( $s = 4,9$  mm/decêndio);
- A deficiência total anual entre chuva e *ETo* decendial provável foi de 451,9 mm enquanto que entre a chuva provável e a *ETo* média foi de 369,4 mm por ano, que representa uma redução de 18,2% na *ETo* anual;
- A maior amplitude encontrada foi de 25,4 mm e ocorreu no decêndio 35, entre os dias 7 e 16 de dezembro. A menor amplitude foi de 3,3 mm e ocorreu no decêndio 31 (28/10 a 06/11);
- Os dados de chuva e *ETo* provável indicam que a região apresenta necessidade de irrigação suplementar independentemente da época de desenvolvimento da cultura. As condições climáticas da região de Ponta Grossa possibilitam que as culturas agrícolas respondam positivamente à instalação de sistemas de irrigação em decorrência da alta probabilidade de deficiências de água no solo.

As considerações feitas sobre os resultados dispostos nas Figuras 5.10 e 5.11 são contrastantes, apesar de ambas representarem a chuva e a *ETo* da região de Ponta Grossa. Baseando-se em valores médios de chuva e *ETo*, observou-se que é desnecessária a instalação de sistemas de irrigação. Por outro lado, ficou evidente a necessidade de irrigação suplementar contrastando-se os valores prováveis de chuva e *ETo*. Desta forma, o retorno econômico de uma determinada cultura e o risco climático e financeiro é que determinarão a possibilidade e viabilidade da realização de projetos de irrigação na região.

Diante dos resultados e considerações feitas nos parágrafos anteriores, verifica-se que os valores prováveis de chuva devem ser utilizados como base para as simulações dos balanços hídricos para fins de planejamento agrícola para a região de Ponta Grossa, pois a utilização de valores médios de precipitação em estudos de planejamento não mostrou-se indicada. Resultados semelhantes também foram obtidos por FRIZZONE *et al.* (1985) e CUNHA *et al.* (1997).

### 5.2.4 Parâmetros físico-hídricos dos solos

Os parâmetros físico-hídricos dos solos, obtidos com o auxílio do programa *SPLINTEX* (PREVEDELLO, 2002) estão relacionados na Tabela 5.7. Analisando-se esta tabela, verificou-se que os dados de umidade de saturação ( $\theta_s$ ) e residual ( $\theta_r$ ) estão de acordo com KLAR (1984), ou seja, os solos com textura mais arenosa possuem maior umidade de saturação ( $\theta_s$ ) e os contendo textura argilosa maior umidade residual ( $\theta_r$ ).

Tabela 5.7. Parâmetros físico-hídricos estimados pelo programa *SPLINTEX* e capacidade de água disponível (*CAD*) estimada para três solos possuindo classes de textura argilosa, média e arenosa, considerando a densidade de solo igual a  $1,3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , densidade de partícula igual a  $2,65 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  e 50 cm de profundidade efetiva do sistema radicular.

Textura	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	$\alpha$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	$N$	$m$	$\theta_s$	$\theta_r$	$\theta_{CC}$	$\theta_{PMP}$	$CAD_{50}$ (mm)	CAD <sub>50</sub> (%)
							$(\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3})$					
Argilosa	61	23	16	0,00892	2,9681	0,6631	0,5124	0,3193	0,45	0,32	65,0	100,0
Média	25	22	53	0,01989	2,5269	0,6043	0,5172	0,1364	0,26	0,14	60,0	92,3
Arenosa	20	10	70	0,05679	2,2520	0,5560	0,5340	0,1071	0,16	0,11	25,0	38,5

Os valores de umidade a 100 cm e 15.000 cm de coluna de água obtidos na Equação 4.47, conforme VAN GENUCHTEN (1980), demonstram, respectivamente, as umidades de capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ) e ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ). O solo argiloso apresentou  $\theta_{CC}$  de  $0,45 \text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$  ou 45%, enquanto que o solo arenoso apresentou uma  $\theta_{CC}$  de apenas  $0,16 \text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$  ou 16% de armazenamento na mesma condição. Quando submetido a uma tensão de 15.000 cm de coluna de água o solo arenoso foi capaz de manter 11% de água. Os solos de textura média e argilosa mantiveram, respectivamente, 14% e 32% de  $\theta_{PMP}$ .

O solo argiloso apresentou armazenamento máximo de 65,0 mm, pouco maior que a *CAD* do solo com textura média (60,0 mm), considerando um perfil de 50 centímetros de profundidade. A *CAD* do solo arenoso foi de 25,0 mm, o que representa menos de 40% da *CAD* do solo argiloso. A grande variação da capacidade de água disponível entre os solos pode resultar na manifestação mais freqüente de deficiências e excessos, principalmente para os solos mais arenosos.

Como a diferença entre a *CAD* dos solos de textura argilosa e média ficou em apenas 5 mm, optou-se por descartar o solo de textura média das análises de verificação do módulo “Balanço hídrico climatológico decendial”, após as modificações.

### 5.3 VERIFICAÇÃO DO MÓDULO “BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO DECENDIAL” APÓS AS MODIFICAÇÕES (Terceira etapa)

#### 5.3.1 Verificação da *ETc* Simulada

A verificação dos resultados obtidos com o módulo “Balanço hídrico climatológico decendial” do modelo *MORETTI*, considerando as modificações sugeridas para o gerador de números aleatórios (*NA*), foi realizada para os decêndios (18 e 29) que apresentaram o menor e o maior desvio padrão, respectivamente, para os dados de *ETc* estimados para a localidade de Ponta Grossa. A *ETc* média estimada para o decêndio 18 (20/06 a 29/06) foi de 12,32 mm/decêndio ( $s = 2,67 \text{ mm}\cdot\text{decêndio}^{-1}$ ) e para o decêndio 29 (08/10 a 17/10) foi de 23,38 mm/decêndio ( $s = 4,61 \text{ mm}\cdot\text{decêndio}^{-1}$ ), conforme dados da Tabela 5.5.

A Figura 5.12 apresenta a distribuição de freqüência dos valores simulados de *ETc* decendial com a distribuição normal, utilizando o processo: geração de números aleatórios original do modelo *MORETTI*, para os decêndios 18 (a) e 29 (b); e o proposto neste trabalho, para os decêndios 18 (c) e 29 (d).

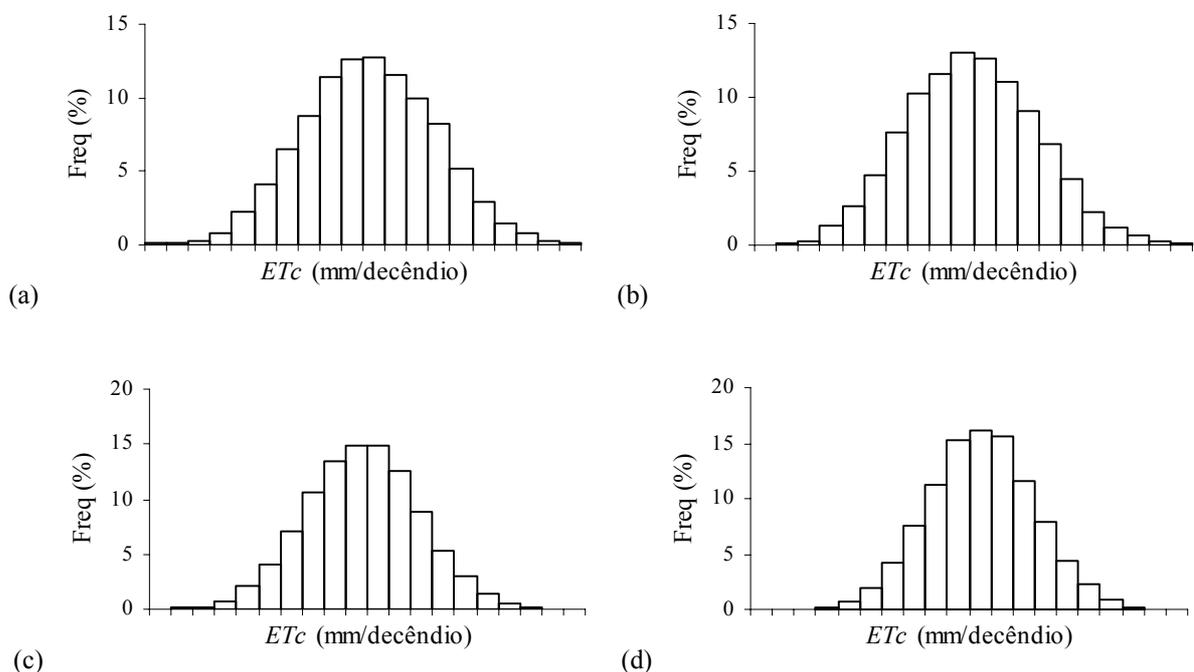


Figura 5.12 – Distribuição de freqüência da *ETc* decendial simulada pelo processo original de geração de *NA* do modelo *MORETTI*, para os decêndios 18 (a) e 29 (b), e sugerido por este trabalho para o decêndio 18 (c) e 29 (d).

Analisando-se a Figura 5.12 é possível verificar que:

- A análise visual dos histogramas de frequência permitiu observar que independente do processo de geração dos *NA* e dos parâmetros de simulação (média e desvio padrão), os valores de *ETc* apresentaram-se distribuídos proporcionalmente em torno da média;
- A análise visual não foi capaz de identificar o histograma de frequência mais característico de uma distribuição normal, pois todos as seqüências simuladas apresentaram valores de *ETc* decendial distribuídos conforme a natureza da distribuição normal;
- Os histogramas de frequência da *ETo* para os decêndios 18 e 29 apresentaram forma campanular ou de sino, independentemente do processo de geração de *NA* empregado para as simulações.

A Tabela 5.8 apresenta a área acumulada sob as curvas de distribuição de frequência dos valores de *ETc* decendial estimadas pelo módulo balanço hídrico original e modificado do modelo *MORETTI*.

Tabela 5.8. Área acumulada sob a curva de distribuição Normal teórica (SPIEGEL, 1993) e obtida com a distribuição de frequência da *ETc* decendial estimada no módulo balanço hídrico do modelo *MORETTI* com o algoritmo original e modificado.

Área da curva Normal	18° decêndio ( $s = 2,67$ mm/decêndio)					29° decêndio ( $s = 4,61$ mm/decêndio)			
	Normal (%)	Original (%)	Erro <sup>1</sup> (%)	Modificado (%)	Erro (%)	Original (%)	Erro (%)	Modificado (%)	Erro (%)
$\mu \pm \sigma$	68,27	75,17	+10,1	75,31	+10,3	75,14	+10,1	69,72	+2,1
$\mu \pm 2 \cdot \sigma$	95,45	97,47	+2,1	97,47	+2,1	97,21	+1,8	97,89	+2,6
$\mu \pm 3 \cdot \sigma$	99,74	99,93	+0,2	99,81	+0,1	99,87	+0,1	99,93	+0,2
Erro acumulado	—	—	+12,4	—	+12,5	—	+12,0	—	+4,9

(<sup>1</sup>) Erro relativo

Baseando-se nas informações da Tabela 5.8 é possível verificar que:

- Quando comparado a distribuição Normal de probabilidade, o módulo balanço hídrico original do modelo *MORETTI* simulou valores de *ETc* decendial com distribuição de frequência apresentando erro acumulado de 12,4% e 12,0% para o decêndio 18 ( $s = 2,67$  mm/decêndio) e 29 ( $s = 4,61$  mm/decêndio), respectivamente;
- O módulo balanço hídrico modificado do modelo *MORETTI* superestimou a área de concentração dos valores de *ETc* simulada. O erro de área acumulado foi de 12,5% para o decêndio 18 ( $s = 2,67$  mm/decêndio) e 4,9% para o decêndio 29 ( $s = 4,61$  mm/decêndio);

- O erro médio da área compreendida sob a curva de distribuição de freqüência dos valores de *ETc* decendial simulada com o módulo balanço hídrico original e modificado do modelo *MORETTI* foi de 12,2% e 8,7%, respectivamente;
- A distribuição de freqüência da *ETc* simulada para o decêndio 29 ( $s = 4,61$  mm/decêndio) com o módulo balanço hídrico modificado, apresentou erro acumulado da área sob a curva 61% menor que o encontrado para o decêndio 18 ( $s = 2.67$  mm/decêndio);
- A variação do desvio padrão de 2,67mm/decêndio para 4,61 mm/decêndio implicou na redução de 3% no erro acumulado da área sob a curva de distribuição de freqüência da *ETo* decendial simulada com o módulo balanço hídrico original;
- A discrepância entre os percentuais assumidos por SPIEGEL (1993) e os obtidos com a distribuição dos valores de *ETc* simulada, empregando ambas as formas de simulação (original e modificada), principalmente no intervalo entre  $\mu + \sigma$  e  $\mu - \sigma$ , pode ser decorrente do método de transformação dos valores da distribuição uniforme para a distribuição normal ou, ainda, resultantes de uma série ruim de *NA* aleatórios gerados. De acordo com ASSIS *et al.* (1996), a qualidade da distribuição de freqüência gerada é muito influenciada pela qualidade da distribuição dos números aleatórios gerados para esse fim.

Segundo SOUZA (2001), o módulo “Balanço hídrico climatológico decendial” utiliza a seguinte equação para simular os valores contendo uma distribuição normal,

$$VS_i = \frac{\sigma}{\sqrt{\frac{n}{12}}} \cdot \sum_{i=1}^n r_i + \left( \mu - \frac{n}{2} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{\frac{n}{12}}} \right) \quad (5.1)$$

sendo,  $VS_i$  o valor simulado;  $\sigma$  o desvio padrão da população ou amostra;  $r_i$  o número aleatório gerado;  $\mu$  a média da população ou amostra;  $n$  a quantidade de números aleatórios gerados.

A Tabela 5.9 apresenta os parâmetros estatísticos dos 10.000 anos de *ETc* simulada para os decêndios 18 e 29, considerando o algoritmo original e o sugerido neste trabalho (modificado). Os parâmetros média e desvio padrão, utilizados na simulação dos valores decêndiais da *ETc* no modelo estão dispostos na Tabela 5.5.

Tabela 5.9. Parâmetros estatísticos para os 10.000 anos de *ETo* decendial simulada empregando módulo “Balanço hídrico climatológico decendial” do modelo *MORETTI* original e considerando as modificações propostas neste trabalho.

Parâmetros Estatísticos (mm/decêndio)	Original	Modificado	Original	Modificado
	18° Decêndio	18° Decêndio	29° Decêndio	29° Decêndio
Menor Valor	3,32	2,60	8,45	4,15
Maior Valor	20,87	22,51	38,49	40,47
Valor Modal	12,56	12,03	22,68	23,27
Média	12,35	12,33	23,36	23,38
Desvio Padrão	2,74	2,70	4,70	4,60
Amplitude de Classe	0,92	1,05	1,58	1,91
Limite Inferior	2,86	2,08	7,66	3,20
Limite Superior	21,33	23,03	39,28	41,43

Considerando-se os dados da Tabela 5.9 pôde-se observar que:

- A diferença entre a *ETc* média simulada com o código original e modificado foi de 0,02 mm para os decêndios 18 e 29;
- A maior diferença entre o desvio padrão da *ETc* simulada e o utilizado como parâmetro estatístico para as simulações ( $s = 2,67$  mm/decêndio) foi de 2,26% para o decêndio 18 ( $s = 2,74$  mm/decêndio), empregando-se o código original do modelo *MORETTI*;
- A maior diferença entre a média da *ETc* simulada e a utilizada como parâmetro estatístico para as simulações ( $\mu = 12,32$  mm/decêndio) foi de 0,21% para o decêndio 18 ( $\mu = 12,35$  mm/decêndio), empregando-se o código original do modelo *MORETTI*;
- As *ETc* decendiais simuladas com o módulo balanço hídrico original gerou seqüências de *ETc* com desvios de 1,88% a 2,62% e de  $-0,07\%$  a 2,62% em relação aos parâmetros média e desvio padrão dos decêndios 18 e 29, respectivamente, empregados na simulação. A rotina modificada resultou em erros para média e desvio padrão variando de  $-0,02\%$  a 0,05% e de  $-0,29\%$  a 1,05%, respectivamente, quando comparados aos parâmetros estatísticos de *ETo* utilizados para a sua simulação. É importante observar que esta comparação foi possível ( $ETc = ETo$ ) devido a cultura hipotética possuir valores de  $Kc = 1$  em todos os decêndios ao longo do ano.

Analisando as considerações anteriores, observou-se que a metodologia modificada simulou uma seqüência de valores de *ETc* com menor desvio percentual para a distribuição normal, assim como, menor variação entre os parâmetros (média e desvio padrão) da seqüência e os utilizados para sua simulação. É importante salientar, no entanto, que ambas as metodologias (original e modificada) apresentaram resultados satisfatórios, gerando valores

de  $ET_c$  conforme a distribuição Normal. Desta forma, a adoção de uma ou outra metodologia não compromete os resultados, no entanto a adoção das modificações constitui um avanço.

### 5.3.2 Resultados alcançados com as equações de armazenamento de água no solo

As Tabelas 5.10 e 5.11 e as Figuras 5.13 e 5.14 apresentam os valores médios anuais de irrigação ( $I$ ), evapotranspiração real ( $ER$ ) e deficiência ( $DEF$ ), encontrados em 10.000 anos simulados aplicando: cinco equações de armazenamento de água no solo, seis manejos de irrigação no “Balanço hídrico climatológico decendial” e dois tipos de solo (argiloso e arenoso). Para as mesmas condições, as Tabelas 5.10 e 5.11 também apresentam o excedente ( $EXC$ ) e a frequência de irrigação ( $Fi$ ), obtidos conforme os respectivos manejos de irrigação.

#### (a) Considerações sobre os resultados alcançados no balanço hídrico para o solo argiloso:

- A lâmina de irrigação média de 10.000 anos simulados para a equação Co-senoidal foi de 360 mm/ano ( $s = 27,07$  mm/ano), considerando o manejo de irrigação o ano todo (manejo 1). A menor lâmina de irrigação, 261,27 mm/ano ( $s = 26,65$  mm/ano), foi estimada com a equação Exponencial e a maior lâmina, 364,08 mm/ano ( $s = 27,11$  mm/ano), foi obtida com a equação Potencial de Segunda Ordem (Tabela 5.10);
- Considerando o manejo 1 de irrigação e, em relação a equação Co-senoidal, verificou-se que todas as equações de estimativa do armazenamento em função do negativo acumulado subestimaram a lâmina de irrigação, exceto a equação Potencial de Segunda Ordem;
- Observou-se que as lâminas de irrigação estimadas com as equações Potenciais de Primeira e Segunda Ordem apresentaram tendência similar àquele demonstrado pela equação Co-senoidal para manejos de irrigação 1 a 5. As equações Exponencial e BRAGA (1982) apresentaram lâminas de irrigação subestimadas com relação a equação Co-senoidal para os manejos de irrigação 1 a 5 (Figura 5.13a).
- O maior desvio ( $-27,43\%$ ) com relação ao valor de irrigação estimado com a equação Co-senoidal foi observado empregando-se a equação Exponencial e o manejo 1 de irrigação (irrigação o ano todo). A equação Potencial de Segunda Ordem superestimou a lâmina de irrigação para todos os manejos de irrigação, sendo que o maior desvio ( $6,78\%$ ) foi observado para o manejo 5 (irrigações alternadas de três em três decêndios partindo dos três primeiros);

Tabela 5.10. Valores médios de irrigação ( $I$ ), evapotranspiração real ( $ER$ ), deficiência ( $DEF$ ), excedente ( $EXC$ ) e frequência de irrigações no ano ( $Fi$ ), obtidos de 10.000 simulações do “Balanço hídrico climatológico decendial” do modelo *MORETTI*, para a localidade de Ponta Grossa, considerando solo com textura ARGILOSA ( $CAD = 65,0$  mm), fração  $p$  igual 0,5, coeficiente de cultivo igual a 1,0, seis manejos de irrigação (Tabela 4.2), e cinco equações de armazenamento de água no solo: Co-senoidal; Exponencial de THORNTHWAITE & MATHER (1955); Potencial de primeira ordem de RIJTEMA & ABOUKHALED (1975); BRAGA (1982) e Potencial de segunda ordem.

Manejo Irrigação	Co-senoidal	Exponencial	Potencial de 1ª ordem	Braga (1982)	Potencial de 2ª ordem
<b>Irrigação (<math>I</math>) em mm</b>					
1 – Irrigação ano todo	360,00	261,27	354,76	318,96	364,08
2 – Verão sim/inverno não	199,69	158,97	198,74	178,92	204,38
3 – Inverno sim/verão não	225,67	173,60	225,99	210,74	229,35
4 – Mês não/mês sim	309,14	225,50	306,23	259,46	327,80
5 – Mês Sim/mês não	287,27	213,75	287,25	243,00	306,75
6 – Sem irrigação	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Evapotranspiração Real (<math>ER</math>) em mm</b>					
1 – Irrigação ano todo	816,38	713,09	810,79	770,70	820,56
2 – Verão sim/inverno não	655,61	610,79	654,56	630,64	660,66
3 – Inverno sim/verão não	692,25	640,18	692,57	677,32	695,94
4 – Mês não/mês sim	770,14	683,76	767,33	719,43	788,81
5 – Mês Sim/mês não	748,81	674,42	748,56	703,39	767,98
6 – Sem irrigação	466,60	466,60	466,60	466,60	466,58
<b>Deficiência (<math>DEF</math>) em mm</b>					
1 – Irrigação ano todo	18,73	122,28	24,64	64,63	14,45
2 – Verão sim/inverno não	179,83	224,76	180,68	204,78	174,82
3 – Inverno sim/verão não	143,46	195,48	142,40	157,64	139,51
4 – Mês não/mês sim	65,17	151,47	67,83	115,92	46,60
5 – Mês Sim/mês não	86,37	160,78	86,95	131,66	67,60
6 – Sem irrigação	369,13	368,90	368,37	368,67	368,76
<b>Excedente (<math>EXC</math>) em mm</b>					
1 – Irrigação ano todo	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03
2 – Verão sim/inverno não	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04
3 – Inverno sim/verão não	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02
4 – Mês não/mês sim	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05
5 – Mês Sim/mês não	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01
6 – Sem irrigação	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Frequência da irrigação (<math>Fi</math>)</b>					
1 – Irrigação ano todo	12 a 17	10 a 14	13 a 20	11 a 18	12 a 17
2 – Verão sim/inverno não	7 a 12	5 a 10	8 a 13	7 a 13	7 a 11
3 – Inverno sim/verão não	5 a 7	4 a 5	5 a 7	5 a 7	5 a 7
4 – Mês não/mês sim	8 a 12	7a 10	8 a 11	8 a 12	8 a 13
5 – Mês Sim/mês não	7 a 11	6 a 8	6 a 11	8 a 10	7 a 10
6 – Sem irrigação	0	0	0	0	0

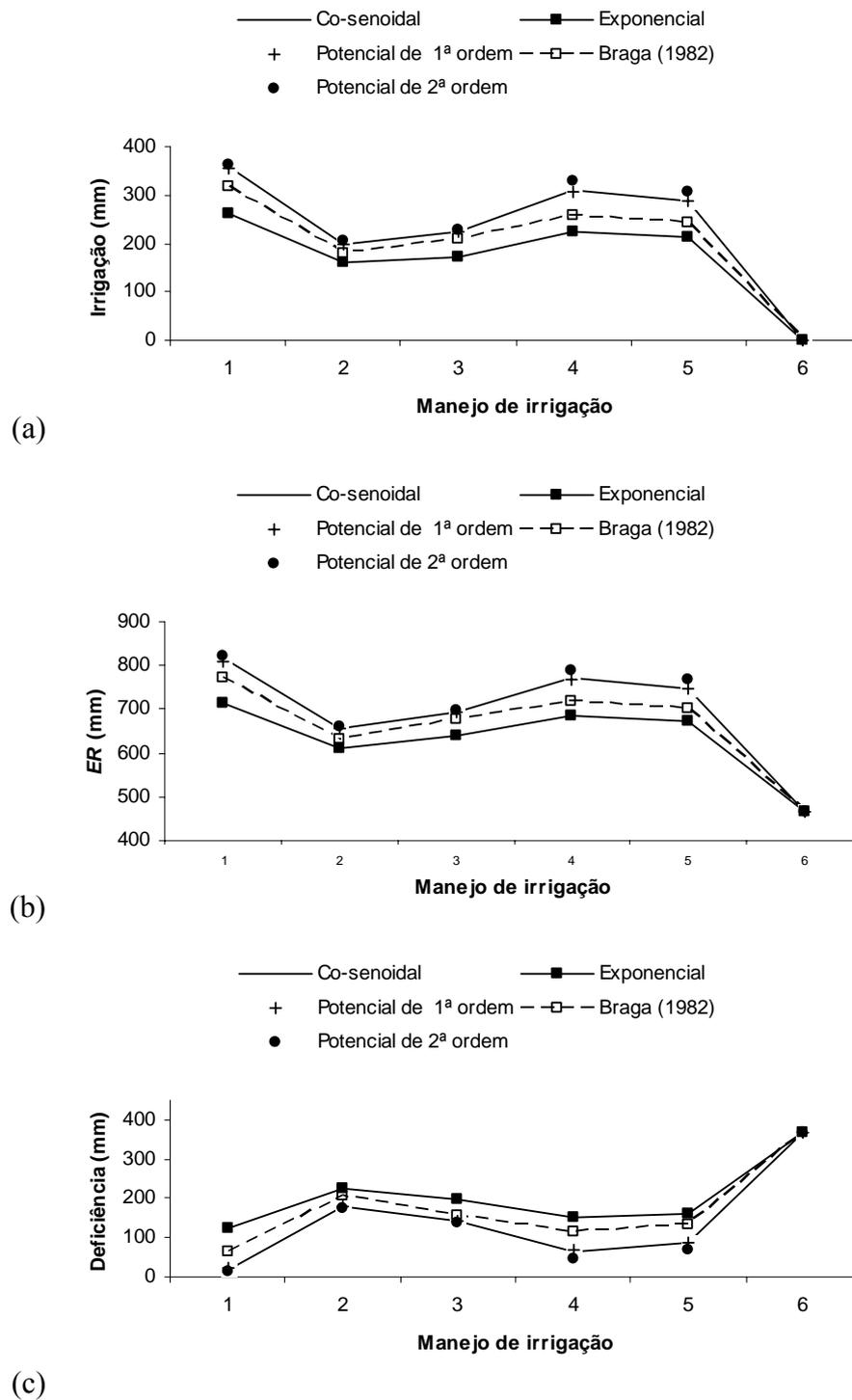


Figura 5.13 – Valores médios de irrigação ( $I$ ), evapotranspiração real ( $ER$ ) e deficiência ( $DEF$ ), obtidos de 10.000 simulações do “Balanço hídrico climatológico decenal” do modelo *MORETTI*, para a localidade de Ponta Grossa, considerando solo com textura ARGILOSA ( $CAD = 65,0$  mm), fração  $p$  igual 0,5, coeficiente de cultivo igual a 1,0, seis manejos de irrigação (Tabela 4.2), e cinco equações de armazenamento de água no solo.

- A *ER* estimada com a equação Co-senoidal e manejo de irrigação o ano todo (manejo 1) foi de 816,38 mm/ano ( $s = 21,18$  mm/ano). A *ER* simulada com a Equação Co-senoidal para o manejo 6 (sem irrigação) correspondeu a 57,15% da *ER* estimada para o manejo 1 (irrigação o ano todo);
- O valor máximo da *ER* média anual foi de 820,56 mm/ano ( $s = 21,52$  mm/ano), estimada com a equação Potencial de Segunda Ordem considerando o manejo de irrigação 1 (irrigação o ano todo). O menor valor de *ER* para o manejo de irrigação 1, foi de 713,09 mm/ano ( $s = 18,00$  mm/ano), simulado com a Equação Exponencial;
- A *ER* observada para o manejo 6 (sem irrigação) foi de 466,6 mm/ano para todas as equações de estimativa do armazenamento de água em função do negativo acumulado. O máximo desvio padrão encontrado para a *ER* estimada para o solo argiloso ( $CAD = 65$  mm), sem irrigação, foi de 1,8 mm/ano para a equação de BRAGA (1982);
- Os valores anuais de *ER* simulados com as equações Potenciais de Primeira e Segunda Ordem acompanham a tendência dos valores anuais obtidos considerando a equação Co-senoidal para os seis manejos de irrigação (Figura 5.13c). Esta mesma tendência foi observada para os valores de *DEF* anual, devido o relacionamento das variáveis no balanço hídrico adotado (Figura 5.13b);
- A *ER* anual média de 10.000 anos de balanços hídricos simulados com as equações Exponencial e BRAGA (1982), apresentaram a mesma tendência, porém com valores subestimados considerando-se os dados obtidos com a equação Co-senoidal (Figura 5.13c). Seguindo a mesma tendência, estas equações também apresentaram para os manejos de irrigação 1 a 5 valores anuais de *DEF* simulada maiores que os obtidos com a equação Co-senoidal (Figura 5.13b);
- O maior valor médio de *DEF* de água no solo para o manejo 1 (irrigação o ano todo) foi de 122,28 mm/ano ( $s = 14,22$  mm/ano) para a equação Exponencial. O menor valor de deficiência para o manejo 1, 14,45 mm/ano ( $s = 12,75$  mm/ano), foi estimado pela equação Potencial de Segunda Ordem. A equação Co-senoidal apresentou uma *DEF* de 18,73 mm/ano ( $s = 12,6$  mm/ano) empregando-se o manejo de irrigação o ano todo (Tabela 5.10);
- A equação exponencial superestimou a *DEF* em 552,86% em comparação à *DEF* estimada com a equação Co-senoidal para o manejo 1 de irrigação (Tabela 5.10). A equação Potencial de Segunda Ordem subestimou a deficiência hídrica para os seis manejos de irrigação simulados. A equação Exponencial apresentou maiores valores de *DEF* para todos os

- manejos de irrigação testados. Os menores desvios entre a *DEF* estimada adotando equação Co-senoidal e as demais equações, foram observados para o manejo 6 de irrigação (sem irrigação);
- A deficiência estimada pela equação Co-senoidal para o manejo de irrigação o ano todo foi de 0,51 mm/decêndio. Avaliando-se os dados decendiais dos balanços hídricos observou-se que não ocorreram decêndios com irrigação e *DEF*, pois a fração de *AD* (32,5 mm/decêndio) foi suficiente para atender a demanda de evapotranspiração média da cultura hipotética no período (média = 22,58 mm/decêndio;  $s = 7,8$  mm/decêndio);
  - Os valores de *EXC* estimados para o solo argiloso ( $CAD = 65$  mm) foram menores que 0,05 mm/ano para todas as equações de estimativa do armazenamento em função do negativo acumulado e manejos de irrigação. Estes resultados mostraram-se coerentes com os dados climáticos da região de Ponta Grossa-PR que demonstram não haver a formação de excedentes de água no solo mediante a consideração da chuva provável e evapotranspiração média na escala decendial;
  - As equações Co-senoidal e Potencial de Segunda Ordem apresentaram em média 12 a 17 irrigações decendiais por ano simulado. A equação Exponencial apresentou a menor frequência de irrigações (10 a 14 irrigações anuais), influenciando a ocorrência de maior deficiência de água no solo;
  - Os valores anuais de *I*, *ER* e *DEF*, obtidos com a simulação do balanço hídrico para o manejo 6 (sem irrigação), demonstraram que não houve diferenças entre os modelos estatísticos de estimativa do *ARM* em função do negativo acumulado quando não se considerou a realização de irrigação (manejo 6), como pode ser observado na Figura 5.13. Diante disso, pode ser adotada qualquer uma das cinco equações de estimativa do *ARM* na simulação do balanço hídrico para fins climatológicos ou outro que não adote a prática da irrigação;
  - Baseando-se nos valores anuais simulados de *I*, *ER* e *DEF*, observou-se a formação de dois grupos de equações de estimativa do armazenamento de água no solo em função do negativo acumulado para fins de planejamento da irrigação, definidos conforme os resultados da equação Co-senoidal. O primeiro grupo é formado pelas equações Potencial de Primeira Ordem, Potencial de Segunda Ordem e Co-senoidal, e o segundo pelas equações Exponencial e BRAGA (1982);

- A escolha de uma equação de estimativa do armazenamento do primeiro ou do segundo grupo irá determinar a qualidade dos dados para o planejamento da irrigação, que por sua vez influenciará outras variáveis de interesse. Programas como o *MORETTI*, *Tobruk*, *BRASDHC* entre outros, não têm como objetivo determinar somente as componentes do balanço hídrico, mas sim utilizar seus resultados como parâmetro para determinar ou estimar outras variáveis de interesse. No caso do modelo *MORETTI*, os valores de irrigação e deficiência simulados do balanço hídrico servem de base para calcular a lâmina de irrigação e custo com energia e água em função do sistema de irrigação, bem como estimar o rendimento da cultura a partir de uma função de produção. Com isso, resultados inconsistentes do balanço hídrico podem gerar dados finais incoerentes com a realidade.
- Baseando-se nos resultados obtidos e nas recomendações de DOURADO NETO & JONG VAN LIER (1993), observou-se que o emprego de uma das equações pertencentes ao primeiro grupo (Potencial de Primeira Ordem, Potencial de Segunda Ordem e Co-senoidal) no módulo balanço hídrico do modelo *MORETTI*, considerando um solo argiloso ( $CAD = 65$  mm), retornou valores semelhantes e consistentes para fins de planejamento da irrigação. As equações pertencentes ao segundo grupo (Exponencial e BRAGA, 1982) não apresentaram resultados com a mesma consistência observada nos resultados apresentados pelas equações do primeiro grupo, porém podem ser empregadas para finalidades de planejamento onde a irrigação não é considerada.

De forma geral, os resultados obtidos com a simulação do balanço hídrico para a região de Ponta Grossa-PR considerando um solo argiloso mostraram-se coerentes e permitiram a identificação de diferenças e semelhanças entre as cinco equações e manejos de irrigação testados. Observou-se que a equação Potencial de Segunda Ordem apresentou maior sensibilidade para avaliar a dinâmica da água no solo argiloso. Concordando com as considerações de RIJTEMA & ABOUKHALED (1975), os resultados obtidos com a simulação dos balanços hídricos com a equação Exponencial indicaram a menor sensibilidade deste modelo para estimar o armazenamento e o negativo acumulado sob condições de irrigação para um solo argiloso e dados climáticos de Ponta Grossa-PR. O modelo Exponencial resultou valores de  $ER$ ,  $DEF$ ,  $Fi$  e  $I$  com desvio máximo para os valores simulados considerando a equação Co-senoidal sob todos os manejos de irrigação, exceto para o manejo 6 (sem irrigação). A Equação de BRAGA (1982) apresentou comportamento similar ao da equação Exponencial, mesmo considerando a ocorrência de  $DEF$  somente quando o

$ARM$  for menor que o crítico [ $CAD \cdot (1 - p)$ ]. As equações Potenciais de Primeira (Linear Exponencial) e Segunda Ordem foram os modelos que obtiveram os menores desvios em relação aos dados simulados com o modelo Co-senoidal de estimativa do armazenamento em função do negativo acumulado.

**(b) Considerações sobre os resultados alcançados no balanço hídrico para o solo arenoso ( $CAD = 25$  mm):**

- A magnitude dos valores de  $DEF$  para o solo arenoso ( $CAD = 25$  mm) aponta para um significativo grau de deficiência de água no solo, mesmo empregando-se o manejo de irrigação o ano todo (manejo 1) para todas as equações de estimativa do armazenamento em função do negativo acumulado;
- Esperava-se que o solo arenoso apresentasse para o manejo de irrigação 1 (irrigação o ano todo), armazenamento de água no solo oscilando entre a  $CAD$  e o armazenamento crítico [ $CAD \cdot (1 - AD)$ ] para todos os decêndios do ano, que resultaria em valores de  $DEF$  tendendo a zero. No entanto, os valores anuais simulados de  $DEF$  oscilaram entre 207,11 mm/ano (equação Potencial de Segunda Ordem) e 245,07 mm/ano (equação Exponencial);
- Observou-se também a ocorrência de irrigação ( $I$ ) e deficiência ( $DEF$ ) em um mesmo decêndio do ano, demonstrando que a  $CAD$  do solo arenoso foi insuficiente para suprir as demandas da  $ET_c$ , bem como manter a fração mínima de água disponível ( $AD$ ) armazenada no solo para a cultura. Os resultados encontrados com a simulação do balanço hídrico no módulo “Balanço hídrico climatológico decendial” do modelo *MORETTI*, são importantes e devem ser observados para qualquer programa de simulação ou cálculo do balanço hídrico que adote o conceito de reservatórios para o armazenamento da água no solo e apenas uma irrigação por período (decêndio);
- A frequência média anual de irrigações decendiais obtida para o solo arenoso foi sempre superior àquela simulada para o solo argiloso considerando todas as equações de estimativa do armazenamento e manejos de irrigação, exceto para o manejo 6. A frequência de irrigação para o solo arenoso ( $CAD = 25$  mm) obtida com a equação Co-senoidal e o manejo de irrigação 1, foi 52,17% maior que a encontrada para o solo argiloso ( $CAD = 65$  mm).

Tabela 5.11. Valores médios de irrigação ( $I$ ), evapotranspiração real ( $ER$ ), deficiência ( $DEF$ ), excedente ( $EXC$ ) e frequência de irrigações no ano ( $Fi$ ), obtidos de 10.000 simulações do “Balanço hídrico climatológico decendial” do modelo *MORETTI*, para a localidade de Ponta Grossa, considerando solo com textura ARENOSA ( $CAD = 25,0$  mm), fração  $p$  igual 0,5, coeficiente de cultivo igual a 1,0, seis manejos de irrigação (Tabela 4.2), e cinco equações de armazenamento de água no solo: Co-senoidal; Exponencial de THORNTHWAITE & MATHER (1955); Potencial de primeira ordem de RIJTEMA & ABOUKHALED (1975); BRAGA (1982) e Potencial de segunda ordem.

Manejo Irrigação	Co-senoidal	Exponencial	Potencial de 1ª ordem	Braga (1982)	Potencial de 2ª ordem
<b>Irrigação (<math>I</math>) em mm</b>					
1 – Irrigação ano todo	244,89	215,58	252,89	220,31	267,34
2 – Verão sim/inverno não	83,85	77,22	91,71	78,25	98,22
3 – Inverno sim/verão não	180,40	163,76	179,88	167,73	185,31
4 – Mês não/mês sim	160,58	151,98	169,72	153,77	175,13
5 – Mês Sim/mês não	143,45	132,89	148,53	134,11	154,16
6 – Sem irrigação	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Evapotranspiração Real (<math>ER</math>) em mm</b>					
1 – Irrigação ano todo	614,20	590,39	618,22	594,02	628,48
2 – Verão sim/inverno não	495,33	496,05	498,82	496,11	500,07
3 – Inverno sim/verão não	595,67	572,72	595,66	576,57	603,57
4 – Mês não/mês sim	576,95	569,66	583,66	571,10	588,48
5 – Mês Sim/mês não	563,81	555,97	567,48	557,33	571,30
6 – Sem irrigação	466,59	466,60	466,55	466,60	466,55
<b>Deficiência (<math>DEF</math>) em mm</b>					
1 – Irrigação ano todo	220,99	245,07	217,18	241,05	207,11
2 – Verão sim/inverno não	340,22	339,41	336,65	339,25	335,02
3 – Inverno sim/verão não	239,71	262,64	239,29	258,84	231,79
4 – Mês não/mês sim	258,03	265,42	252,04	264,23	247,16
5 – Mês Sim/mês não	271,19	279,17	267,93	278,21	264,13
6 – Sem irrigação	368,61	368,78	368,73	368,73	368,84
<b>Excedente (<math>EXC</math>) em mm</b>					
1 – Irrigação ano todo	0,07	0,11	0,08	0,11	0,07
2 – Verão sim/inverno não	0,05	0,06	0,06	0,05	0,05
3 – Inverno sim/verão não	0,05	0,10	0,05	0,09	0,04
4 – Mês não/mês sim	0,06	0,06	0,05	0,05	0,04
5 – Mês Sim/mês não	0,04	0,10	0,05	0,08	0,04
6 – Sem irrigação	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Frequência da irrigação (<math>Fi</math>)</b>					
1 – Irrigação ano todo	23 a 28	20 a 26	22 a 29	20 a 27	22 a 31
2 – Verão sim/inverno não	10 a 13	09 a 13	09 a 14	10 a 13	11 a 14
3 – Inverno sim/verão não	12 a 17	10 a 15	12 a 16	12 a 16	12 a 17
4 – Mês não/mês sim	12 a 16	12 a 16	13 a 16	12 a 16	13 a 17
5 – Mês Sim/mês não	12 a 16	10 a 16	12 a 15	11 a 16	13 a 15
6 – Sem irrigação	0	0	0	0	0

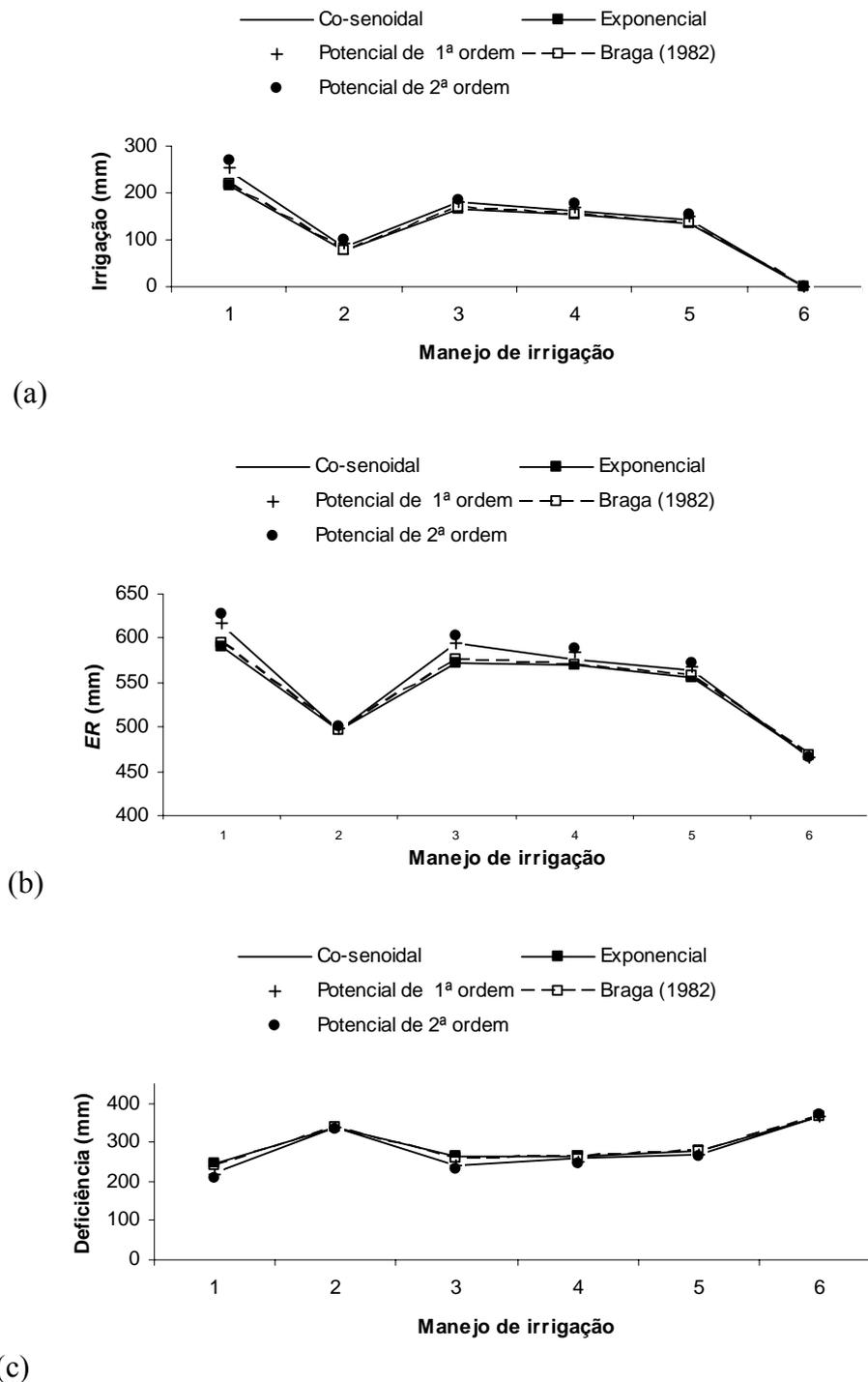


Figura 5.14 – Valores médios de irrigação ( $I$ ), evapotranspiração real ( $ER$ ) e deficiência ( $DEF$ ), obtidos de 10.000 simulações do “Balanço hídrico climatológico decenal” do modelo *MORETTI*, para a localidade de Ponta Grossa, considerando solo com textura ARENOSA ( $CAD = 25,0$  mm), fração  $p$  igual 0,5, coeficiente de cultivo igual a 1,0, seis manejos de irrigação (Tabela 4.2), e cinco equações de armazenamento de água no solo.

- A seleção da equação Co-senoidal resultou em uma frequência de 23 a 28 irrigações decendiais para cada ano simulado com o manejo de irrigação 1 (irrigação o ano todo). A maior (22 a 31 irrigações/ano) e menor (20 a 26 irrigações/ano) frequência de irrigação, empregando o manejo 1 de irrigação, foram observadas para a Equação Potencial de Segunda Ordem e Exponencial, respectivamente (Tabela 5.11).
- Contrastando-se os valores simulados de  $F_i$  e  $DEF$ , observou-se que os mesmos reforçam a inconsistência dos resultados obtidos para o solo arenoso, pois o aumento da  $F_i$  não resultou na redução da  $DEF$  como foi observado nas simulações com o solo argiloso. Desta forma, os valores médios anuais simulados da lâmina de  $I$  e  $ER$ , apresentados na Tabela 5.11, não são consistentes também;
- Os resultados médios anuais de  $I$ ,  $ER$  e  $DEF$ , obtidos com a simulação do balanço hídrico considerando um solo arenoso na região de Ponta Grossa-PR, não permitiram a identificação de diferenças entre as equações de estimativa do armazenamento em função do negativo acumulado, como pode ser observado na Figura 5.14;

De forma geral, os resultados da simulação do balanço hídrico decendial com o solo arenoso não foram coerentes devido aos baixos valores de  $CAD$  e  $AD$  do solo arenoso ( $CAD = 25$  mm). Os resultados obtidos foram importantes e levaram a realização de um cenário, conforme apresentado no Item 5.4, visando avaliar os limites de utilização do módulo “Balanço hídrico climatológico decendial” para algumas regiões do Estado do Paraná.

#### **5.4 CENÁRIO: AVALIAÇÃO DOS LIMITES DE UTILIZAÇÃO DO MÓDULO “BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO DECENDIAL” (Quarta etapa)**

As análises realizadas para verificar o módulo “Balanço hídrico climatológico decendial” após as modificações (Terceira etapa), com os dados de Ponta Grossa-PR, evidenciaram a partir dos baixos valores de  $CAD$  e  $AD$  do solo arenoso no “Item 5.3.2.b” a necessidade de se estudar e avaliar os limites de utilização deste balanço hídrico decendial para diferentes condições climáticas e de armazenamento da água no solo. Desta forma, além da cidade de Ponta Grossa, mais três cidade (Apucarana, Cascavel, Morretes) localizadas em regiões distintas no Estado do Paraná foram escolhidas para compor cenários de simulação do “Balanço hídrico climatológico decendial”, visando contrastar relações entre a  $ET_c$ , chuva provável a 75%, deficiência hídrica anual ( $DEF$ ) e a água disponível no solo ( $AD$ ).

#### 5.4.1 Estimativa dos parâmetros decendiais de chuva provável e *ETo*

A Tabela 5.12 e a Figura 5.15 apresentam os valores decendiais de chuva provável e *ETo* média, com o seu respectivo desvio padrão, estimados para realização dos cenários nas localidades de Apucarana, Cascavel, Morretes e Ponta Grossa. Os cálculos realizados para os valores mencionados seguiram o mesmo procedimento metodológico apresentado para a cidade de Ponta Grossa, entre os “Itens 4.3.2 e 4.3.3” do Material e Métodos.

Considerando-se os dados da Tabela 5.12 e Figura 5.15 é possível observar:

- As quatro localidades apresentaram, predominantemente, valores de *ETo* maiores que a chuva provável a 75%. A região de Apucarana-PR apresentou saldo positivo (1 mm/decêndio) entre a chuva provável e a *ETo* média, apenas para o decêndio 34 (27/11 a 06/12). A região de Cascavel apresentou 7 decêndios com chuva provável maior que a *ETo* média, sendo o maior saldo (12,1 mm) acumulado entre os dias 28/09 (decêndio 28) e 06/11 (decêndio 31). A região de Morretes apresentou 5 decêndios com *ETo* menor que chuva (75%), sendo que 80% deles estão entre os decêndios 1 (01/01 a 10/01) e 7 (02/03 a 11/03). A localidade de Ponta Grossa apresentou chuva maior que a *ETo* (+8,27mm/decêndio) somente para o decêndio 30 (18/10 a 27/10);
- O valor acumulado da diferença entre chuva provável e *ETo* média foi de -476,4 mm/ano para Apucarana-PR, -348 mm/ano para Cascavel, -235 mm/ano para Morretes e -368,71 mm/ano para Ponta Grossa;
- O maior valor de *ETo* decendial para a localidade de Apucarana-PR foi de 36,9 mm para os decêndios 1 (01/01 a 10/01) e 3 (21/01 a 30/01) e o menor valor de *ETo* decendial foi de 14,7 mm para o decêndio 20 (10/07 a 19/07). A *ETo* decendial média para a região de Apucarana-PR foi de 26,08 mm/decêndio;
- O valor de *ETo* decendial média para a região de Cascavel-PR foi de 25,2 mm/decêndio e para a região de Ponta Grossa foi de 22,58 mm/decêndio. O maior valor de *ETo* estimado para Cascavel e Ponta Grossa foi de 38 mm/decêndio e 34,12 mm/decêndio, respectivamente, ambos ocorrendo no decêndio 1 (01/01 a 10/01). As regiões de Cascavel e Ponta Grossa apresentaram menor valor de *ETo* para o decêndio 20 (10/07 a 19/07), sendo: 11,6 mm/decêndio e 12,2 mm/decêndio, respectivamente;
- A *ETo* média para a região de Morretes foi de 26,54 mm/decêndio. A maior *ETo* estimada foi de 41,8 mm para os decêndios 3 (21/01 a 30/01) e 5 (10/02 a 19/02). A menor *ETo* foi de 13,40 mm para o decêndio 20 (10/07 a 19/07).

Tabela 5.12. Parâmetros estatísticos, média e desvio padrão da *ETo* estimada, e chuva a 75% de probabilidade para quatro localidades no estado do Paraná.

Decêndios	Apucarana			Cascavel			Morretes			Ponta Grossa		
	<i>ETo</i> Média (mm)	Desvio Padrão (mm)	Chuva 75% (mm)									
1 (01/01 a 10/01)	35,9	4,2	26,0	38,0	3,8	14,5	41,1	5,0	46,0	34,12	3,76	23,9
2 (11/01 a 20/01)	36,3	4,4	18,0	37,6	3,6	25,0	41,7	5,3	27,0	33,52	3,63	16,1
3 (21/01 a 30/01)	36,9	4,0	23,0	37,6	3,3	20,0	41,8	4,4	46,0	34,02	3,10	26,1
4 (31/02 a 09/02)	35,3	3,6	29,0	35,7	3,1	28,0	41,3	4,4	49,0	33,07	2,83	30,8
5 (10/02 a 19/02)	35,2	4,6	23,0	34,6	3,2	28,0	41,8	4,5	32,0	32,68	3,19	24,7
6 (20/02 a 01/03)	34,7	4,0	21,0	34,7	3,3	13,5	39,8	5,0	36,0	31,16	3,11	21,1
7 (02/03 a 11/03)	33,4	4,2	15,5	34,4	3,4	16,0	37,0	4,1	44,0	29,62	2,91	20,1
8 (12/03 a 21/03)	32,4	3,8	15,0	32,0	3,4	20,0	35,2	3,8	24,0	27,89	2,82	19,6
9 (22/03 a 31/03)	30,4	3,9	9,0	30,0	3,8	7,0	33,0	4,0	32,0	26,47	3,01	9,5
10 (01/04 a 10/04)	27,5	4,9	9,5	26,8	5,0	13,5	29,1	4,5	20,0	23,76	3,31	7,1
11 (11/04 a 20/04)	26,1	4,2	9,0	24,1	4,6	25,0	27,4	3,4	20,0	21,82	3,46	10,9
12 (21/04 a 30/04)	23,6	5,0	5,0	22,7	5,1	13,0	24,0	3,8	12,0	18,95	3,39	4,6
13 (01/05 a 10/05)	20,3	3,9	1,5	18,5	4,1	6,5	21,3	3,9	9,5	16,56	3,38	1,6
14 (11/05 a 20/05)	18,9	3,9	5,0	16,3	3,6	15,0	19,8	3,6	9,0	15,11	3,12	5,0
15 (21/05 a 30/05)	16,4	3,6	0,0	14,4	3,4	16,0	17,2	3,5	5,5	13,02	3,06	3,0
16 (31/05 a 09/06)	15,9	4,4	7,0	13,2	5,0	13,5	15,5	3,8	7,7	12,44	3,57	5,6
17 (10/06 a 19/06)	16,2	4,1	8,5	13,4	4,2	11,0	14,3	3,0	7,0	12,52	2,95	11,0
18 (20/06 a 29/06)	15,1	3,5	7,0	12,5	3,7	10,0	13,9	2,6	7,0	12,32	2,67	6,4
19 (30/06 a 09/07)	15,3	3,5	2,4	13,2	3,6	7,5	13,8	2,6	11,0	12,72	2,71	3,2
20 (10/07 a 19/07)	14,7	4,3	2,7	11,6	4,0	6,5	13,4	3,6	4,5	12,20	3,46	2,0
21 (20/07 a 29/07)	16,1	4,6	2,0	13,5	5,0	0,0	13,7	2,9	4,2	12,82	3,69	2,1
22 (30/07 a 08/08)	17,8	4,6	2,0	15,1	4,1	5,5	14,3	3,1	3,8	13,97	3,44	1,8
23 (09/08 a 18/08)	18,3	5,2	0,0	14,7	3,9	4,5	14,8	2,6	6,5	14,85	3,34	0,0
24 (19/08 a 28/08)	21,3	5,2	1,5	18,2	4,8	0,0	16,3	2,7	3,5	16,86	3,42	1,5
25 (29/08 a 07/09)	21,2	6,2	6,5	18,9	6,3	2,0	16,7	2,8	14,0	17,50	4,52	7,0
26 (08/09 a 17/09)	22,5	6,6	11,0	19,9	5,8	8,0	18,7	3,5	9,0	18,87	3,94	8,3
27 (18/09 a 27/09)	24,0	5,7	10,0	22,6	5,6	0,0	20,0	3,7	16,0	19,86	3,93	15,1
28 (28/09 a 07/10)	26,0	4,9	13,0	24,5	4,5	30,0	22,5	3,0	15,0	21,24	3,26	16,2
29 (08/10 a 17/10)	27,5	6,0	17,0	26,9	5,0	31,0	24,1	4,0	18,0	23,38	4,61	19,9
30 (18/10 a 27/10)	29,4	5,3	28,0	28,8	4,5	30,0	26,5	3,7	36,0	24,53	3,71	32,8
31 (28/10 a 06/11)	31,1	5,3	24,0	30,7	4,0	32,0	29,8	4,0	24,0	26,26	3,64	25,4
32 (07/11 a 16/11)	32,3	5,4	19,5	33,0	6,1	26,0	32,3	4,2	18,5	28,41	4,28	15,2
33 (17/11 a 26/11)	33,8	4,5	19,5	34,6	4,6	27,0	34,0	5,1	20,0	29,47	3,67	11,3
34 (27/11 a 06/12)	34,0	3,5	35,0	35,8	3,8	30,5	36,2	3,9	29,5	31,11	3,23	21,2
35 (07/12 a 16/12)	35,8	4,2	27,0	37,5	4,9	22,0	38,8	4,9	32,0	32,80	3,57	9,8
36 (17/12 a 26/12)	35,3	3,5	28,0	37,0	4,2	21,0	39,5	4,7	36,0	32,34	3,39	20,6
37 (27/12 a 31/12)	18,1	2,7	7,5	19,4	2,7	5,0	21,2	3,3	11,5	17,07	2,32	6,1

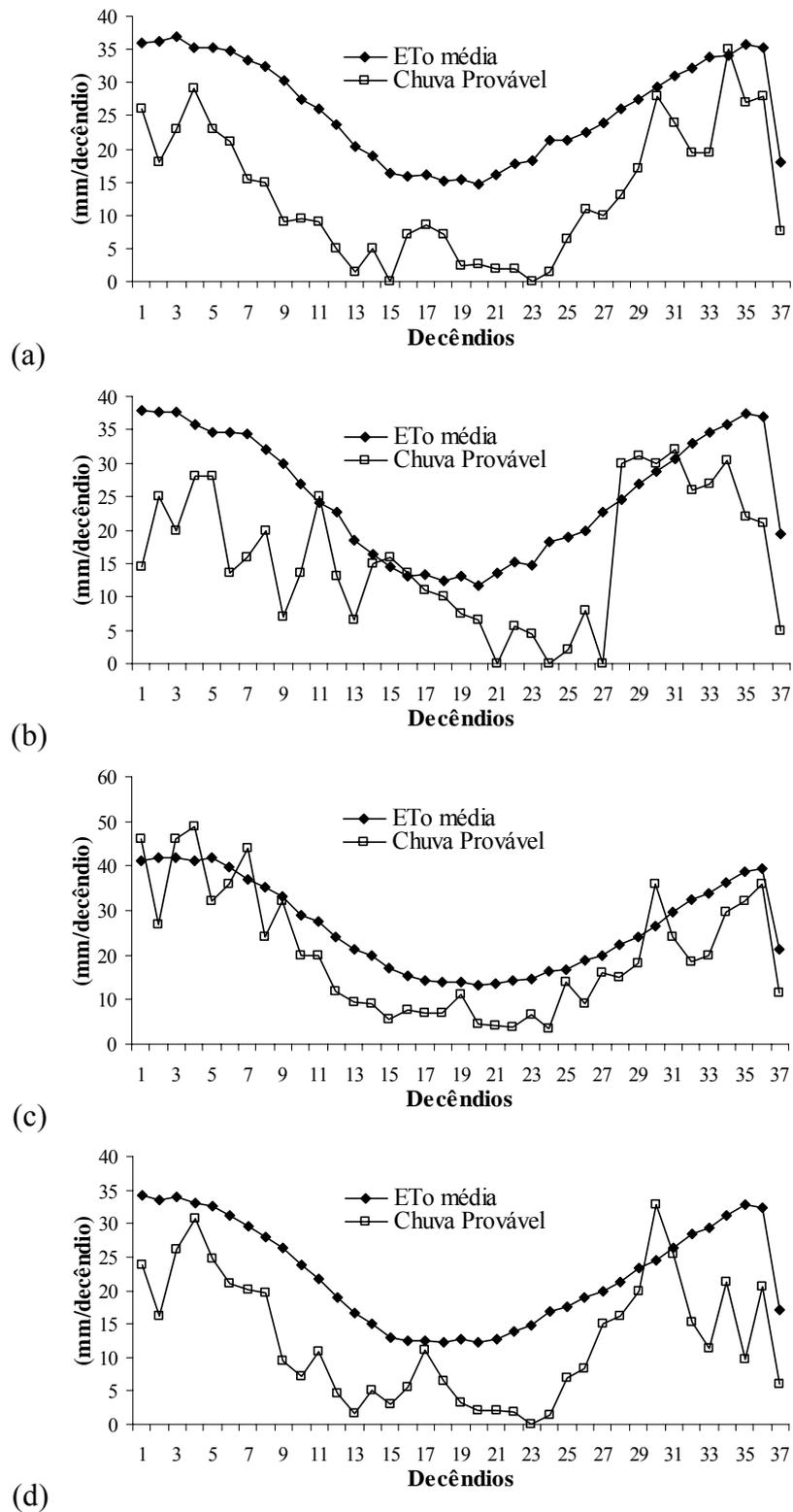


Figura 5.15 – Valores decenais de *ETo* média estimada pelo método de THORNTHWAITE (1948) e chuva provável (75%) estimada com a distribuição de probabilidade de melhor ajuste, para as localidades: (a) Apucarana, (b) Cascavel, (c) Morretes e (d) Ponta Grossa.

#### 5.4.2 Avaliação do módulo “Balanço hídrico climatológico decendial”

As Tabelas 5.13 a 5.16 apresentam a média e desvio padrão dos valores anuais de *DEF*, *ER* e *I*, obtidos com 10.000 simulações para as localidades de Apucarana, Cascavel, Morretes e Ponta Grossa, seguindo as opções e dados dispostos no “Item 4.4” do Material e Métodos. Para as mesmas condições, a Figura 5.16 apresenta a variação dos valores médios de *DEF*, *ER* e *I*, obtidos com o módulo “Balanço hídrico climatológico decendial” do modelo *MORETTI*, considerando valores de água disponível (*AD*) entre 10 mm e 50 mm, para solo argiloso em quatro cidades do Paraná.

A opção pelo manejo de irrigação suplementar ao longo de todo o ano não garantiu a ausência de deficiência de água no solo (*DEF*) para as quatro localidades estudadas (Figura 5.16a). As deficiências de água foram maiores para os solos que apresentaram menor *CAD* e *AD*. Este fato deve-se a limitação que a estrutura do balanço hídrico de THORNTHWAITE & MATHER (1955) oferece quando é adaptada para estimar irrigações, e ao período de realização destas irrigações. No caso do modelo utilizado este período é decendial. Assim, como as propriedades físico-hídricas para o cálculo do armazenamento da água no solo permaneceram inalteradas nas análises, o aumento da profundidade efetiva do sistema radicular (*z*) e, conseqüentemente da *CAD* e *AD* do solo (Equações 4.1 e 4.2), foi quem fez com que o módulo balanço hídrico retornasse valores simulados de *DEF* mais consistentes, correspondendo ao que se esperava em função do manejo de irrigação suplementar adotado (irrigar sempre que houver necessidade).

Verificou-se também que os incrementos no valor da *CAD* e *AD* no solo, utilizados nas simulações do balanço hídrico, promovem uma tendência de estabilização dos valores anuais de *DEF*, *ER* e *I*. A partir de um determinado valor de *AD* no solo, é possível visualizar patamares nas curvas apresentadas na Figura 5.16, em que a taxa de variação dos valores de *DEF*, *ER* e *I* podem ser considerada desprezível, em função: (a) do objetivo para o qual o modelo foi desenvolvido, sendo idealizado para fins de planejamento e gerenciamento de projetos de irrigação (SOUZA, 2001; FRIZZONE *et al.*, 2005); e, (b) da variabilidade do processo de geração dos números aleatórios (*NA*) nas simulações.

Tabela 5.13. Média e desvio padrão dos valores anuais de *DEF*, *ER* e *I* simulados para a região de **Apucarana-PR** considerando solo argiloso com *CAD* de 20 a 100 mm, manejo de irrigação 1 e equação Co-senoidal de estimativa do armazenamento e negativo acumulado.

<i>CAD</i> (mm)	<i>AD</i> (mm)	<i>z</i> (cm)	<i>DEF</i>		<i>ER</i>		<i>I</i>	
			Média	Desv. pad.	Média	Desv. pad.	Média	Desv. pad.
20	10,0	15,40	394,5	36,2	570,5	17,1	226,0	13,7
25	12,5	19,20	335,8	36,7	628,4	19,9	285,3	16,4
30	15,0	23,10	276,3	36,0	688,4	22,4	339,1	19,2
35	17,5	26,90	221,2	34,1	743,6	23,7	382,3	24,4
40	20,0	30,80	173,8	31,2	790,3	24,5	406,5	24,4
45	22,5	34,60	139,7	28,3	825,2	25,0	426,3	27,5
50	25,0	38,45	111,0	26,0	853,7	25,8	439,3	30,1
55	27,5	42,30	86,6	24,7	878,1	26,9	448,3	30,6
60	30,0	46,15	63,9	23,3	900,3	27,2	453,6	31,7
65	32,5	50,00	43,4	19,9	921,3	26,8	459,2	31,7
70	35,0	53,85	27,2	15,7	937,9	26,5	464,8	32,0
75	37,5	57,70	16,0	11,0	948,3	26,3	465,8	31,9
80	40,0	61,57	10,1	7,1	954,2	26,9	467,7	32,4
85	42,5	65,40	6,9	4,3	957,6	26,7	469,5	33,0
90	45,0	69,20	5,3	2,8	959,8	27,1	471,3	34,3
95	47,5	73,10	4,5	2,2	959,6	27,0	471,0	36,1
100	50,0	76,90	4,0	2,0	960,6	27,4	472,0	37,8

Tabela 5.14: Média e desvio padrão dos valores anuais de *DEF*, *ER* e *I* simulados para a região de **Cascavel-PR** considerando solo argiloso com *CAD* de 20 a 100 mm, manejo de irrigação 1 e equação Co-senoidal de estimativa do armazenamento e negativo acumulado.

<i>CAD</i> (mm)	<i>AD</i> (mm)	<i>z</i> (cm)	<i>DEF</i>		<i>ER</i>		<i>I</i>	
			Média	Desv. pad.	Média	Desv. pad.	Média	Desv. pad.
20	10,0	15,40	297,67	29,95	634,7	15,5	148,0	15,1
25	12,5	19,20	255,92	29,88	676,4	17,9	191,5	17,4
30	15,0	23,10	216,11	30,21	716,0	20,9	230,5	18,3
35	17,5	26,90	177,76	29,67	754,0	23,5	267,0	20,7
40	20,0	30,80	143,49	27,40	788,7	24,8	292,1	22,6
45	22,5	34,60	115,28	25,69	817,3	25,5	308,5	24,0
50	25,0	38,45	93,89	23,80	837,9	26,2	319,3	25,0
55	27,5	42,30	77,18	22,37	854,7	26,8	328,8	25,9
60	30,0	46,15	62,97	21,33	869,4	26,9	336,1	26,4
65	32,5	50,00	46,12	20,13	886,4	27,2	338,4	28,7
70	35,0	53,85	29,69	16,76	902,2	26,2	338,4	31,3
75	37,5	57,70	17,0	12,12	915,3	25,3	339,9	32,3
80	40,0	61,57	9,71	7,64	922,5	25,3	341,5	32,9
85	42,5	65,40	6,35	4,86	925,9	25,2	342,9	32,2
90	45,0	69,20	4,89	3,45	926,8	25,9	343,3	32,6
95	47,5	73,10	4,36	2,76	928,0	25,8	344,4	33,4
100	50,0	76,90	4,19	2,52	928,2	26,2	344,5	34,4

Tabela 5.15: Média e desvio padrão dos valores anuais de *DEF*, *ER* e *I* simulados para a região de **Morretes-PR** considerando solo argiloso com *CAD* de 20 a 100 mm, , manejo de irrigação 1 e equação Co-senoidal de estimativa do armazenamento e negativo acumulado.

<i>CAD</i> (mm)	<i>AD</i> (mm)	<i>z</i> (cm)	<i>DEF</i>		<i>ER</i>		<i>I</i>	
			Média	Desv. pad.	Média	Desv. pad.	Média	Desv. pad.
20	10,0	15,40	182,13	25,14	799,6	11,1	113,9	9,6
25	12,5	19,20	144,13	25,54	837,3	13,8	139,2	12,9
30	15,0	23,10	109,43	23,02	872,4	14,2	158,6	13,6
35	17,5	26,90	84,07	20,76	898,1	14,9	174,7	15,2
40	20,0	30,80	63,78	18,84	917,7	15,9	189,4	17,0
45	22,5	34,60	49,19	17,50	932,5	17,3	203,3	19,8
50	25,0	38,45	37,23	15,61	944,6	18,2	213,0	22,6
55	27,5	42,30	27,54	13,82	954,6	19,4	218,1	25,1
60	30,0	46,15	20,14	12,44	961,1	20,0	220,8	26,9
65	32,5	50,00	14,97	10,96	966,8	21,4	225,6	27,9
70	35,0	53,85	11,25	9,81	970,6	21,6	230,0	27,9
75	37,5	57,70	8,64	8,45	973,3	22,0	232,8	29,0
80	40,0	61,57	6,18	7,23	975,4	22,5	232,8	30,1
85	42,5	65,40	4,12	5,76	977,9	22,8	233,5	30,0
90	45,0	69,20	2,46	3,77	979,4	22,9	233,6	30,0
95	47,5	73,10	1,63	2,39	980,2	23,2	233,9	29,7
100	50,0	76,90	1,16	1,38	980,2	23,6	233,6	30,2

Tabela 5.16: Média e desvio padrão dos valores anuais de *DEF*, *ER* e *I* simulados para a região de **Ponta Grossa-PR** considerando solo argiloso com *CAD* de 20 a 100 mm, , manejo de irrigação 1 e equação Co-senoidal de estimativa do armazenamento e negativo acumulado.

<i>CAD</i> (mm)	<i>AD</i> (mm)	<i>z</i> (cm)	<i>DEF</i>		<i>ER</i>		<i>I</i>	
			Média	Desv. pad.	Média	Desv. pad.	Média	Desv. pad.
20	10,0	15,40	272,9	27,10	562,1	15,04	191,6	11,59
25	12,5	19,20	221,9	26,54	613,5	17,14	244,8	16,90
30	15,0	23,10	175,2	24,48	660,3	17,75	288,0	17,49
35	17,5	26,90	139,0	22,97	696,3	19,03	313,6	18,61
40	20,0	30,80	109,5	21,56	725,9	20,45	333,7	20,95
45	22,5	34,60	87,2	20,79	748,3	21,62	344,8	22,05
50	25,0	38,45	68,0	19,73	767,3	22,11	351,1	22,97
55	27,5	42,30	50,1	18,72	785,4	22,41	354,9	23,93
60	30,0	46,15	32,3	16,57	803,0	22,14	357,5	26,04
65	32,5	50,00	18,8	12,64	816,6	21,05	360,2	27,34
70	35,0	53,85	10,7	8,19	824,6	20,48	361,5	28,42
75	37,5	57,70	6,9	4,49	828,8	19,92	363,0	27,49
80	40,0	61,57	5,1	2,85	830,2	20,06	363,8	25,50
85	42,5	65,40	3,9	2,07	831,5	20,46	365,0	24,10
90	45,0	69,20	3,1	1,61	832,6	20,38	366,1	23,54
95	47,5	73,10	2,6	1,46	833,1	20,50	366,5	23,88
100	50,0	76,90	2,2	1,30	832,9	20,74	366,3	25,47

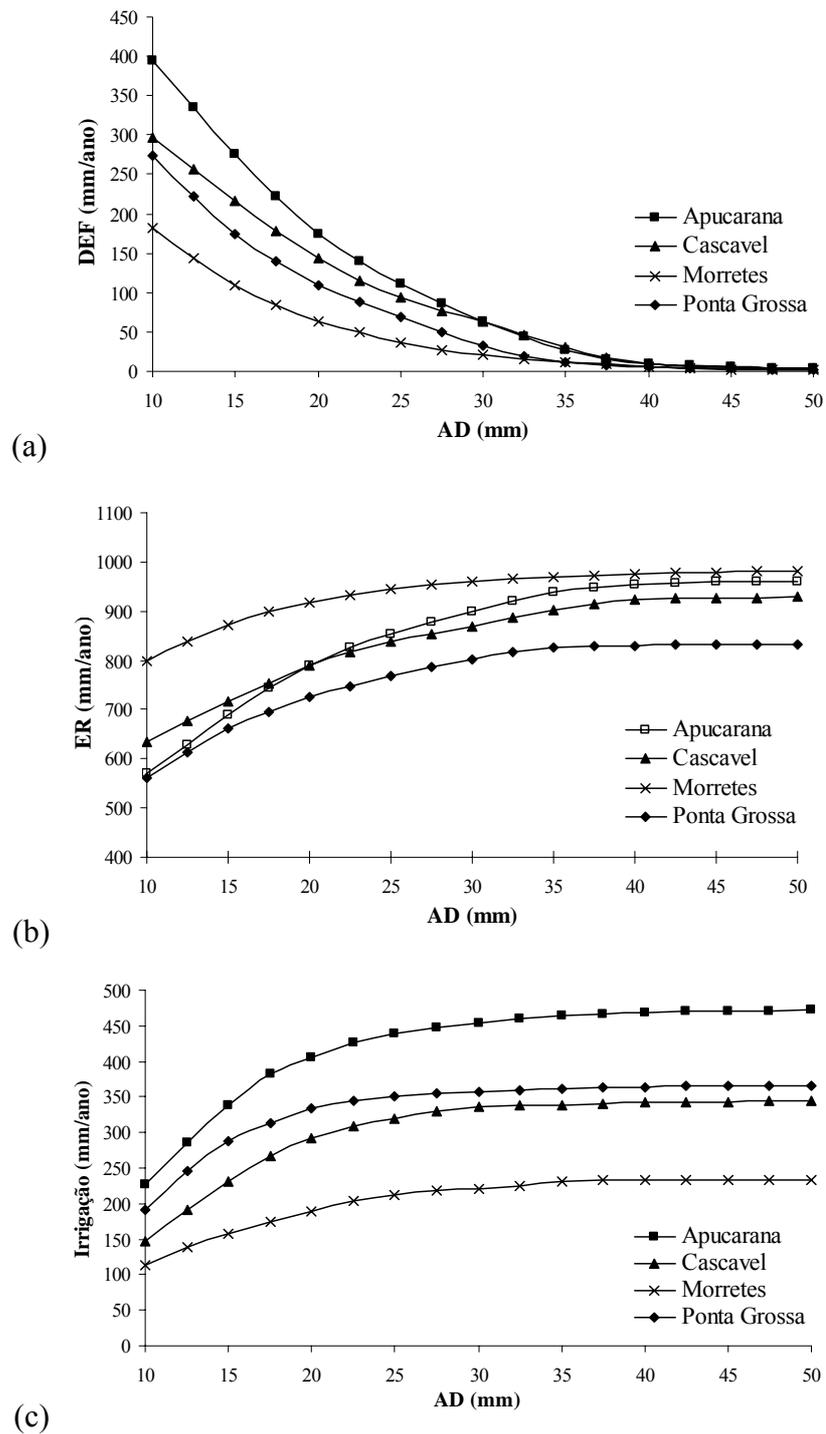


Figura 5.16. – Valores médios anuais de (a)  $DEF$ , (b)  $ER$  e (c)  $I$ , obtidos em 10.000 simulações com o módulo “Balanço hídrico climatológico decenal” do *MORETTI*, para quatro localidades no Paraná, considerando valores de  $AD$  de 10 mm a 50 mm, manejo de irrigação 1 e equação Co-senoidal de estimativa do armazenamento e negativo acumulado.

Os fatos apresentados até o momento evidenciam que o modelo de balanço hídrico decendial utilizado consegue obter melhores estimativas de seus componentes para maiores valores de *CAD*, e conseqüentemente de *AD* no solo. No entanto, existe um ponto de inflexão nas curvas de *ER*, *I* e *DEF*, conforme apresentado nas Tabelas 5.13 a 5.16 e Figura 5.16, que indica que valores de *CAD* ou *AD* além desse limite não representam maior precisão nas simulações realizadas. As mesmas tabelas e figura permitem verificar também que não é possível estabelecer um valor de *CAD* ideal e geral para processar as análises de irrigação com o balanço hídrico decendial, pois este valor está condicionado aos valores de *ETc*, que por sua vez tem a sua magnitude em função do clima da região, através da *ETo*, e dos valores de coeficiente de cultivo (*Kc*) da cultura ao longo dos estádios de seu desenvolvimento.

Os resultados das Tabelas 5.13 a 5.16 e Figura 5.16 confirmam as evidências apontadas no Item 5.3.2, quando foi verificado que se deve ter cuidado e atenção na interpretação dos resultados obtidos em simulações com balanços hídricos simulados para solos que não possuam *CAD* e *AD* compatível com a periodicidade do modelo (diário, pênstada, semana, decêndio, quinzena, mês). Assim, para que a inconsistência apontada não comprometa outras análises que podem ser realizadas eventualmente no modelo de balanço hídrico, como produtividades a partir de funções de produção, volume de água utilizado nas irrigações, contabilização dos custos com bombeamento, energia, agricultura irrigada, entre outros, é sempre importante verificar se os valores de *CAD* e *AD* são condizentes com a periodicidade das irrigações realizadas no modelo utilizado.

Para as condições do balanço hídrico em estudo, a partir dos dados da Tabela 5.17, os seguintes limites de utilização foram verificados nas quatro regiões analisadas:

- Os valores anuais de *DEF* e *ER* simulados para Apucarana apresentaram relativa estabilidade para valores de *AD* maiores ou iguais a 37,5 mm. A partir deste valor, a *DEF* média foi menor que 16,0 mm/ano (0,43 mm/decêndio) e as variações entre as *ER* estimadas foram inferiores a 1,1%. No entanto, a lâmina de irrigação suplementar necessária (*I*) estabilizou para valores de *AD* acima de 30,0 mm, apresentando variações entre irrigações estimadas (*I*) inferiores a 1,2%. Este fato indica, entre os valores de *AD* de 30,0 mm e 37,5 mm, que a cultura hipotética (possuindo  $Kc = 1$  e  $p = 0,5$ , ao longo de todo ano) ainda se encontra consumindo bastante água na zona seca do solo, ou seja, água que se encontra na região  $ARM \leq CAD \cdot (1 - p)$ ;

- Os valores anuais de *ER* e *DEF* simulados para Cascavel também apresentam relativa estabilidade para valores de *AD* maiores que 37,5 mm. A partir deste valor as *DEF* foram inferiores a 17,0 mm (0,46 mm/decêndio). A curva da lâmina de irrigação suplementar necessária (*I*) também ficou estável antes, apresentando variações inferiores a 0,68% a partir de valores de *AD* acima de 32,5 mm;
- Seguindo a mesma tendência observada para Apucarana e Cascavel, os valores anuais de *ER* e *DEF* simulados para Ponta Grossa apresentam relativa estabilidade para valores de *AD* maiores que 35,0 mm. A partir deste valor, a *DEF* média foi menor que 10,7 mm/ano (0,29 mm/decêndio). A lâmina de irrigação suplementar necessária (*I*) também ficou estável antes, apresentando variações inferiores a 1,1% a partir de valores de *AD* acima de 27,5 mm;
- Em relação às demais localidades, a região de Morretes apresentou a menor variação da *ER* e *I* entre os valores de *CAD* e *AD* que vão até 37,5 mm. Assim, visualmente, as curvas de *DEF*, *ER* e *I* fornecem uma falsa impressão de apresentar patamares mais uniformes em comparação aos resultados obtidos para as demais localidades. Porém, matematicamente, a variação nos valores da lâmina de irrigação suplementar (*I*) somente apresentou variações inferiores a 1,2% a partir de valores de *AD* maiores que 37,5 mm. A *ER* apresentou variações inferiores a 1,28% a partir de valores de *AD* maiores que 25 mm, e os valores de *DEF* foram inferiores a 14,97 mm (0,4 mm/decêndio) a partir de valores de *AD* maiores que 32,5 mm.

Os maiores valores decenciais médios de *ET<sub>o</sub>* (Tabela 5.12) estimados para a região de Apucarana (36,9 mm/decêndio), Cascavel (38,0 mm/decêndio) e Ponta Grossa (34,1 mm/decêndio) foram numericamente semelhantes aos valores limites de *AD* (37,5 mm, 37,5 mm e 35 mm, respectivamente) que proporcionaram relativa estabilidade aos valores anuais simulados de *DEF* e *ER*. Os valores anuais de *I* estabilizaram-se abaixo dos valores limites de *AD* necessários para estabilizar a *DEF* e *ER*. As duas constatações apontadas devem-se a utilização de uma cultura hipotética possuindo  $K_c = 1$  e à ausência de precipitação provável em alguns decêndios ao longo do ano, o que evidencia, para as três regiões estudadas, que o maior valor médio de *ET<sub>o</sub>* decencial (entre os 37 decêndios do ano) pode servir como um indicativo da *AD* mínima. Esta consideração é necessária para que o balanço hídrico climatológico decencial possa ser utilizado eficientemente para finalidades de planejamento, apresentando resultados coerentes com o manejo de irrigação selecionado e nível de deficiência ( $DEF \leq 0,5$  mm/decêndio). No entanto, quando os valores de  $K_c$  ficam abaixo de

um e, ou, a precipitação provável é diferente de zero em todos os decêndios ao longo do ano, como no caso de Morretes, este indicativo não é mais suficiente e o valor de *AD* mínima para realizar as análises poderá ficar abaixo do maior valor médio decendial da *ET<sub>o</sub>*, aumentando a faixa de aplicação do modelo utilizado. Nesta situação, a estimativa do valor limite de *AD* mínima somente poderá ser obtida empregando-se a metodologia utilizada para constituir as Tabelas 5.13 a 5.16 e Figura 5.16 deste trabalho.

Tabela 5.17. Deficiência decendial média (*DEF<sub>m</sub>* – mm/decêndio) e variação percentual dos valores de *DEF*, *ER* e *I* (%) entre os incrementos de *AD* no solo, obtidos com os dados das Tabelas 5.13 a 5.16 para as regiões de Apucarana, Cascavel, Morretes e Ponta Grossa.

<i>AD</i> (mm)	Apucarana				Cascavel				Morretes				Ponta Grossa			
	<i>DEF<sub>m</sub></i>	<i>DEF</i>	<i>ER</i>	<i>I</i>												
10,0	10,7				8,0				4,9				7,4			
12,5	9,1	-17,5	9,2	20,8	6,9	-16,3	6,2	22,7	3,9	-26,4	4,5	18,2	6,0	-23,0	8,4	21,7
15,0	7,5	-21,5	8,7	15,9	5,8	-18,4	5,5	16,9	3,0	-31,7	4,0	12,2	4,7	-26,7	7,1	15,0
17,5	6,0	-24,9	7,4	11,3	4,8	-21,6	5,0	13,7	2,3	-30,2	2,9	9,2	3,8	-26,0	5,2	8,2
20,0	4,7	-27,3	5,9	6,0	3,9	-23,9	4,4	8,6	1,7	-31,8	2,1	7,8	3,0	-26,9	4,1	6,0
22,5	3,8	-24,4	4,2	4,6	3,1	-24,5	3,5	5,3	1,3	-29,7	1,6	6,8	2,4	-25,6	3,0	3,2
25,0	3,0	-25,9	3,3	3,0	2,5	-22,8	2,5	3,4	1,0	-32,1	1,3	4,6	1,8	-28,2	2,5	1,8
27,5	2,3	-28,2	2,8	2,0	2,1	-21,7	2,0	2,9	0,7	-35,2	1,0	2,3	1,4	-35,7	2,3	1,1
30,0	1,7	-35,5	2,5	1,2	1,7	-22,6	1,7	2,2	0,5	-36,7	0,7	1,2	0,9	-55,1	2,2	0,7
32,5	1,2	-47,2	2,3	1,2	1,2	-36,5	1,9	0,7	0,4	-34,5	0,6	2,1	0,5	-71,8	1,7	0,7
35,0	0,7	-59,6	1,8	1,2	0,8	-55,3	1,8	0,0	0,3	-33,1	0,4	1,9	0,3	-75,7	1,0	0,4
37,5	0,4	-70,0	1,1	0,2	0,5	-74,6	1,4	0,4	0,2	-30,2	0,3	1,2	0,2	-55,1	0,5	0,4
40,0	0,3	-58,4	0,6	0,4	0,3	-75,1	0,8	0,5	0,2	-39,8	0,2	0,0	0,1	-35,3	0,2	0,2
42,5	0,2	-46,4	0,4	0,4	0,2	-52,9	0,4	0,4	0,1	-50,0	0,3	0,3	0,1	-30,8	0,2	0,3
45,0	0,1	-30,2	0,2	0,4	0,1	-29,9	0,1	0,1	0,1	-67,5	0,2	0,0	0,1	-25,8	0,1	0,3
47,5	0,1	-17,8	0,0	-0,1	0,1	-12,2	0,1	0,3	0,0	-50,9	0,1	0,1	0,1	-19,2	0,1	0,1
50,0	0,1	-12,5	0,1	0,2	0,1	-4,1	0,0	0,0	0,0	-40,5	0,0	-0,1	0,1	-18,2	0,0	-0,1

As considerações feitas anteriormente, permitem verificar que a consistência dos resultados obtidos a partir de balanço hídrico irrigacionista está intimamente relacionada aos parâmetros climáticos (*ET<sub>o</sub>*, *ET<sub>c</sub>* e *P*), físico-hídricos do solo e a periodicidade para qual o modelo foi desenvolvido (diária, semanal, decendial, quinzenal, mensal, entre outras). Como em condições de campo não é possível variar os valores de *CAD*, *AD*, *ET<sub>o</sub>*, *ET<sub>c</sub>*, *P* entre outros, assim como é realizado no processo de simulação, a verificação para apontar se o modelo de balanço hídrico decendial irrigacionista é adequado à região e proporcionará

resultados consistentes com as parâmetros físico-hídricos existente no solo deverá recair sobre a sua periodicidade. Sendo assim, pode-se sugerir:

- Se a maior *ETo* decencial média for  $\leq AD \Rightarrow$  a periodicidade do balanço hídrico pode ser igual a 10 dias (o modelo decencial utilizado apresentará bons resultados);
- Se a maior *ETo* decencial média for  $> AD \Rightarrow$  a periodicidade do balanço hídrico terá de ser menor que 10 dias (o modelo decencial utilizado não apresentará resultados consistentes).

Respeitando a periodicidade para qual o modelo *MORETTI* foi desenvolvido para fazer as simulações, as duas sugestões apontadas servem também para aqueles modelos que de alguma forma utilizam a simulação do balanço hídrico seqüencial, adotando o conceito de reservatórios de água no solo e a aplicação de apenas uma irrigação no período para o qual foi realizado (diária, semanal, decencial, quinzenal, mensal, entre outras).

O módulo “Balanço hídrico climatológico decencial” apresentou algumas limitações que estão relacionadas à sua composição, ou seja, não possibilitar a alteração da periodicidade (decencial). Essa característica não é exclusiva do modelo desenvolvido inicialmente por SOUZA (2001), mas muito comum à maioria dos modelos de balanço hídrico existentes na bibliografia. Desta forma, é importante observar que o modelo *MORETTI* apresenta facilidades e opções para realizar o estudo de um balanço hídrico destinado à agricultura irrigada, porém melhorias no sentido de possibilitar a alteração da periodicidade são necessárias. No entanto, é importante observar também, que independente das opções de periodicidade do modelo:

- Os cuidados com os limites de utilização do balanço hídrico por parte do usuário devem sempre existir, para evitar resultados de simulação distorcidos com a realidade estudada, conforme observado para algumas faixas de *AD* no solo nas localidades de Apucarana, Cascavel, Morretes e Ponta Grossa;
- A redução da periodicidade pode trazer problemas no que se refere à obtenção, agrupamento, tratamento e estudo dos valores prováveis de dados climáticos necessários ao modelo e às análises de simulação. Períodos mais curtos (diários, pênadas) também podem aumentar a variabilidade (risco) dos resultados, dificultando ou não permitindo a realização de análises seguras voltadas ao planejamento da agricultura irrigada.

## 6 CONCLUSÃO

De acordo com os dados coletados e análises realizadas, concluiu-se no presente estudo que:

- As seqüências de *NA* geradas no módulo *Visual Basic (macro)* do *Microsoft Excel 2000* são aleatórias a 1%, 5% e 10% de significância pelo teste das “Séries para a Aleatoriedade” e a 1% de significância pelo teste de “Chi-quadrado”. As seqüências de *NA* geradas não apresentam tendências e concentrações de valores de acordo com o teste de “Análise do gráfico de dispersão”;
- A *ET<sub>o</sub>* decidual média estimada para Ponta Grossa-PR apresenta melhor ajuste as distribuições Normal e Gama pelo Teste de Kolmogorov-Smirnov a 5% de significância estatística;
- A precipitação decidual média de Ponta Grossa-PR segue as distribuições Gama e Exponencial de acordo com o Teste de Kolmogorov-Smirnov a 5% de significância estatística;
- A chuva provável a 75% correspondeu, em média, a 26,1% (32,4 mm/decêndio) da chuva média decidual e foi menor que a precipitação média ao longo de todo o ano. A maior freqüência de períodos com pequena precipitação ou estiagem concentra-se nas estações de outono e inverno, sendo menor do que 30% a probabilidade do período receber uma chuva igual ou superior à média. Para o período chuvoso a probabilidade de ocorrência da precipitação média em Ponta Grossa varia entre 30% e 40%;
- Contrastes entre chuva média vs *ET<sub>o</sub>* média e chuva provável a 75% vs *ET<sub>o</sub>* provável a 75%, evidenciam que o retorno econômico de uma determinada cultura e o risco climático e financeiro é que determinam a possibilidade e viabilidade da realização de projetos de irrigação na região de Ponta Grossa-PR;
- Valores prováveis de chuva devem ser utilizados como base para as simulações dos balanços hídricos para fins de planejamento agrícola para a região de Ponta Grossa, pois a utilização de valores médios de precipitação em estudos de planejamento não mostrou-se indicada;

- As metodologias, original do modelo *MORETTI* e modificada (proposta), utilizadas para gerar números aleatórios (*NA*) apresentam resultados satisfatórios, gerando valores de *ETc* seguindo aproximadamente uma distribuição Normal. A adoção de uma ou outra metodologia não comprometeu os resultados, no entanto a adoção das modificações constituiu um avanço;
- Baseando-se nos resultados médios dos balanços hídricos simulados para o solo argiloso da região de Ponta Grossa-PR, as equações Potenciais de Primeira (Linear Exponencial) e Segunda Ordem obtiveram os menores desvios em relação aos dados simulados com o modelo Co-senoidal de estimativa do armazenamento em função do negativo acumulado. As equações Exponencial e BRAGA (1982) não apresentam bons resultados quando é previsto a realização de irrigação ao longo do ano. O solo arenoso da mesma região não permitiu a obtenção de resultados consistentes com as equações de armazenamento testadas;
- A simulação do balanço hídrico para fins climatológicos ou outro fim que não considere a irrigação suplementar, pode ser realizada adotando qualquer uma das equações testadas para a estimativa do armazenamento de água no solo;
- O modelo utilizado consegue obter melhores estimativas de seus componentes para maiores valores de *CAD* e *AD* no solo. O valor ideal de *CAD* para processar as análises de irrigação em função das variações da *ETo*, *Kc* e *ETc* devem de preferência ser estabelecidas no próprio modelo. Porém, quando a condição “maior *ETo* decendial média  $\leq AD$ ” do período é válida o balanço hídrico apresenta resultados consistentes para periodicidade igual a 10 dias.

## 7 REFERÊNCIAS

- AFFHOLDER, F. Effect of organic matter input on the water balance and yield of millet under tropical dryland condition. **Field Crops Research**, v.41, p.109-121, 1995.
- AFFHOLDER, F.; RODRIGUES, G.C; ASSAD, E.D. Modelo agroclimático para avaliação do comportamento do milho na região dos cerrados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v. 32, n. 10, 1997.
- AMORIM NETO, M.S.A. **Balço hídrico segundo Thornthwaite e Mather (1955)**. Comunicado técnico Embrapa, n.34, p.1-18, 1989.
- ARAÚJO, W.F.; ANDRADE JÚNIOR, A.S. de MEDEIROS, R.D. de; SAMPAIO, R.A. Precipitação pluviométrica mensal provável em Boa Vista, Estado de Roraima, Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.5, n.3, Campina Grande, p.563-567, 2001.
- ARRUDA, F.B.; ZULLO JÚNIOR., J.; OLIVEIRA J.B. Parâmetros de solo para o cálculo da água disponível com base na textura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 11, n. 1, p. 11-15, 1987.
- ARYA, L.M.; PARIS, J.F. A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data. **Soil Science Society**. Am. J. 45: 1023-1030, 1981.
- ASSAD, E.D. Simulation de l'irrigation et du drainage pour les cultures pluviales de riz et de maïs en sols de bas-fonds à Brasília. **Memoires et Travaux de IRAT**, n.13, p.10, 1986.
- ASSIS, F.N. de **Modelagem da ocorrência e da quantidade de chuva e de dias secos em Piracicaba-SP e Pelotas-RS**. Piracicaba, 1991. 134p. Tese (Doutor) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- ASSIS, F.N.; ARRUDA, H.V.; PEREIRA, A.R. **Aplicações de estatística à climatologia: teoria e prática**. Pelotas: Universitária/UFPel, 1996. 161p.
- BACK, Á.J. Análise das máximas intensidades de chuva para a região de Urussanga-SC **In: Anais... VII CONEA – Congresso Nacional de Engenharia de Agrimensura**, Salvador – BA, 1996. <<http://geodesia.ufsc.br/Geodesia-online/arquivo/Conea7/AREAS.HTM>>
- BARBIERI, V.; TUON, R. L.; ANGELOCCI, L.R. Programa para microcomputador do balanço hídrico (Thornthwaite & Mather, 1955) para dados mensais e decendiais, normais e sequenciais. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA**, 7, Viçosa, 1991. Resumos. Viçosa, Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1991. p.297-299.
- BARGER, G.L., THOM, H.C.S. Evaluation of drought hazard. **Agronomy Journal**, Madison, v.41, n.11, p. 519-526, 1949.

- BASTOS, E.A.; AGUIAR NETTO, O.; ANDRADE JÚNIOR, A.S.; OLIVEIRA, C.M.M. Distribuição de frequência da evapotranspiração potencial para a região de Teresina - PI, através do modelo de gumbel. **Revista Engenharia Agrícola**, Campinas, v.14, p. 99-104, 1994.
- BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 5.ed. Viçosa: Imprensa Universitária, 1989. 596p.
- BRAGA, H.J. **Caracterização da seca agrônômica através de novo modelo de balanço hídrico, na região de Laguna, litoral sul do Estado de Santa Catarina**. Piracicaba, 1982. 157p. Tese (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.
- CÂMARA, C.D. **Efeitos do corte raso de eucalipto sobre o balanço hídrico e a ciclagem de nutrientes em uma microbacia experimental**. Piracicaba, 1999. 103p. Dissertação (mestrado) Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.
- CAMARGO, A.P de; CAMARGO, M.B.P. de. Uma revisão analítica sobre evapotranspiração potencial. **Revista Bragantia**. v.2, n.59, p 125-137, 2000.
- CAMARGO, A.P. de **Contribuição para a determinação da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 1966. 59p. (IAC. Boletim Técnico, 16).
- CAMARGO, A.P.; PEREIRA A.R. **Prescrição de rega por modelo climatológico**. Função Cargill. Campinas (Série Técnico Científica, 170). 1990. 27p
- CAMPOS, H. **Estatística aplicada à experimentação com cana-de-açúcar**. Piracicaba: FEALQ, 1984. 292p.
- CASTRO, L.H.R.; MOREIRA, A.N.; ASSAD, E.D. Definição e regionalização dos padrões pluviométricos dos cerrados brasileiros. In: Assad, E.D. (coord.) **Chuvas no cerrados: análise e espacialização**. Brasília: Embrapa, CPAC; Embrapa, SPI, 1994. p.13-23.
- CASTRO, M.C. **Sistema computacional para a determinação da lâmina econômica ótima em irrigação pressurizada**. Lavras, 2001. 137p. Tese (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras.
- CASTRO, M.C; FARIA, M.A.de; SILVA A.M. da Sistema computacional para determinação da lâmina ótima econômica de irrigação pressurizada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, n.2, Campina Grande, p.372-378, 2002.
- CASTRO, R. **Distribuição probabilística da frequência de precipitação na Região de Botucatu – SP**. Botucatu, 1994. 101p. Tese (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista.
- CHRISTOFIDIS, D. Recursos hídricos e irrigação no Brasil. In: **Workshop Disponibilidade de Água e Irrigação no Nordeste**, 1999, Brasília. Texto... Brasília: ISPN, 1999. 34p.
- CINTRA, F.L.D.; LIBARDI; P. L.; SAAD; A.M. Balanço hídrico no solo para porta-enxertos de citros em ecossistema de Tabuleiro Costeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.4, n.1, Campina Grande, p.23-28, 2000.
- CLARK, I.; FRITZ, P. **Environmental Isotopes in Hydrogeology**. USA: CRC Press, 1997. 328p.
- CODDINGTON, P.D. **Random number generators for parallel computer**. Syracuse University (Northeast Parallel Architectures Center), New York, 1997.

<http://citeseer.ist.psu.edu/cache/papers/cs/25183/http:zSzzSzwww.crpc.rice.eduzSzNHSEreviewzSzRNGzSzPRNGreview.pdf/coddington97random.pdf>

COSTA, G.P. **Potencial de uso agrícola das terras e diagnóstico socioeconômico em duas vilas rurais no Estado do Paraná.** Curitiba, 2004. 87p. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) – Universidade Federal do Paraná.

CUNHA, A.R. de; MARTINS, D.; PASSOS, J.R. de S. O modelo gama de probabilidade aplicado ao estudo da distribuição de chuva mensal na região administrativa de Bauru, SP. In: **X CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA.** Piracicaba - SP, SBA/ESALQ-USP/ CNPq/ FAPESP/FINEP, 1997.

D'ANGIOLELLA, G., VASCONCELLOS, V.L.D. Planilhas EXCEL para cálculo de Balanço Hídrico Climatológico com diferentes metodologias para estimativa da evapotranspiração potencial. In.: **III Encuentro de las aguas: agua, vida y desarrollo,** Santiago (Chile), 2001.  
[http://www.aguaboliviana.org/situacionaguaX/IIIEncAguas/contenido/tema\\_rojo.htm](http://www.aguaboliviana.org/situacionaguaX/IIIEncAguas/contenido/tema_rojo.htm)

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.** FAO – Irrigation and Drainage Paper, 24, Roma, 1977. 144p

DOURADO NETO, D.; JONG VAN LIER, Q. de Estimativa do armazenamento de água no solo para realização de balanço hídrico. **Revista Brasileira de Ciências do Solo,** v.17, n.1, p.9-15, 1993.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos,** Brasília: EMBRAPA, 1999. 412p.

FIETZ, C.R.; URCHEI, M.A. **Análise de Frequência da Evapotranspiração de Referência da Região de Dourados, MS.,** Embrapa Agropecuária Oeste, Dourados – MS, 2002. Comunicado Técnico 53.

FONTANA, D.C.; BERLATO, M.A.; BERGAMASCHI, H. Relação entre o índice de vegetação global e condições hídricas no Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira,** Brasília, n.8, v.33, 1998.

FOREST, F. **Simulation du bilan hydrique des cultures pluviales. Présentation et utilisation du logiciel BIP.** Montpellier: IRAT-CIRAD, 1984.

FOREST, F.; CLOPES, A. Contribution à l'explication de la variabilité du rendement d'une culture de maïs plus ou moins intensifiée à l'aide d'un modèle de bilan hydrique amélioré. In: REYNIERS, F.N.; NETOYO, L. (Eds.). **Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique tropicale: Vers une gestion des flux hydriques par les systèmes de culture?** Paris: J. Libbey, 1994. p.3-15

FRANKE, L. B.; SAIBRO, J. C. de. Efeito do fósforo e da irrigação no rendimento de sementes de alfafa. **Pesquisa Agropecuária Brasileira,** Brasília, n.12, v.32, 1997.

FRÉTEAUD, J.P.; POSS, R.E.; SARAGONI, H. Ajustement d'un modèle de bilan hydrique à des mesures tensio-neutroniques in situ sous culture de maïs. **Agronomie Tropicale,** Montpellier, v.42, n.2, p.94-103, 1987.

FRIZZONE, J.A. **Análise de cinco modelos para o cálculo da distribuição e frequência de precipitação na região de Viçosa, MG.** Viçosa, 1979. 100p. Tese (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa.

FRIZZONE, J.A., RETTORE, P. R., PEREIRA, G.T. Análise da distribuição e frequência das precipitações em períodos de 5 e 10 dias, na região de Pereira Barreto (SP), utilizando a distribuição Gama incompleta. **ITEM – Irrigação e Tecnologia Moderna.** n. 22, 1985.

FRIZZONE, J.A.; ANDRADE JÚNIOR, A.S. de; SOUZA, J.L.M.de; ZOCOLER, J.L. **Planejamento da Irrigação:** análise de decisão de investimento. Brasília: EMBRAPA, 2005. 627p.

HERNANDEZ, F.B.T.; LEMOS FILHO, M.A.F.; BUZETTI, S. **Software hidrisa e o balanço hídrico de Ilha Solteira.** Ilha Solteira: UNESP, 1995. 45p (Série Irrigação 1)

JENSEN, M.E. **Design and operation of farm irrigation system.** New York: ASAE. 1983. 829p.

KLAR, A.E. **A água no sistema solo-planta-atmosfera.** São Paulo: Nobel, 1984. 408p

KREPPER, C.M., SCIAN, B.V., PIERINI, J.O. Time and space variability of rainfall in Central East Argentina. **Journal of Climate,** v.2, n.1, p.39-47, 1989.

L'ECUYER, P. **Random Number Generation,** Handbook on Simulation, Chapter 4, Ed.: Wiley Jerry Banks, Université de Montreal, February 27, 1998.

<<http://www.iro.umontreal.ca/~lecuyer/myftp/papers/handsim.ps>>

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

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo.** Piracicaba, 1995. 497p.

LIMA, J. E. F. W. **Determinação e simulação da evapotranspiração de uma bacia hidrográfica do Cerrado.** Brasília, 2000. 75p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Brasília.

LOIOLA, M.L.; SOUZA, F. de. Estatísticas sobre irrigação no Brasil segundo o Censo Agropecuário 1995-1996. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,** v.5, n.1, Campina Grande, p.171-180, 2001.

MARIN, F.R., SENTELHAS, P.C., UNGARO, M. R. G. Perda de rendimento potencial da cultura do girassol por deficiência hídrica, no Estado de São Paulo. **Sci. agric.,** v.57, n.1, p.1-6, 2000.

MARQUES, P.A.A. **Modelo compucional para determinação do risco econômico em culturas irrigadas.** Piracicaba, 2005. 150p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

MARQUES, P.A.A.; MARQUES, T.A.; COELHO, R.D. Programa Pupunha: software para avaliação econômica da irrigação de Pupunha. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola,** v.6, n.2, p.379-384, 2002.

MARTINS JÚNIOR., D.F.; BARRETO, M.L. Macro-epidemiologic aspects of schistosomiasis mansoni: analysis of the impacts of irrigation systems on the spatial profile of the endemic in Bahia, Brazil. **Cad. Saúde Pública.** , v.19, n.2, p.383-393, 2003.

- MATHER, J.R. Preface. **Publication in Climatology**. Centerton, v.6, n.3, p.247-248, 1958.
- McCULLOUGH, B. D., WILSON, B. On the accuracy of statistical procedures in Microsoft Excel 97. **Computational Statistics & Data Analysis**, Washington, n.31, p.27-37, 1999.
- MENDONÇA, J.C.et al. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) na região Norte Fluminense, RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.7, n.2, p.275-279, 2003.
- MOREIRA, H.J.C.; TORRES FILHO, D.R. **SAACI sistema agroclimático para o acompanhamento das culturas irrigadas: manual prático para manejo de irrigação**. Brasília: Secretaria Nacional de Irrigação, 1993.
- MOSTER, C.; LIMA, W.de P.; ZAKIA, M.J.B.; CÂMARA, C.D. **Determinação do ano hidrológico visando a quantificação do balanço hídrico em microbacias experimentais**. Circular Técnica IPEF (Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais). n.197. 2003.
- MOTA, F.S. **Meteorologia Agrícola**. 7. ed. São Paulo: Ed. Nobel, 1989.
- OLIVEIRA, J.L.B.; MARQUES JUNIOR S., PEREIRA, A.A.A. **Precipitação provável para localidades de Santa Catarina. Florianópolis: UFSC**. 1997. 20p. (Série Didática – Boletim Técnico do Departamento de Eng. Rural e Fitotecnia)
- OLIVEIRA, L.F.C. de; CARVALHO, D.F. de Regionalization of the supplementary irrigation depth and planting time of a bean crop in the State of Goiás, Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n.1, p.106-110, 2003.
- OMETTO, J.C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Ed. Agronômica Ceres, 1981.
- PACHECHENIK, P.E. **Caracterização hidrológica e da fragilidade ambiental na bacia do rio das pedras, Guarapuava-PR**. Curitiba, 2004. 79p. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) – Universidade Federal do Paraná.
- PACHECHENIK, P.E.; SOUZA, J.L.M. de; GOMES, S. Estudo da precipitação provável na bacia do rio das pedras – PR, utilizando cinco distribuições de probabilidade. In: **XXXIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**. São Pedro. 2004.
- PENMAN, H.L. Evaporation: an introductory survey. Netherlands. **Journal of Agricultural Science**, v.4, p.9-29, 1956.
- PEREIRA JUNIOR, A.R., FREITAS, M.E. de A., LACERDA, W.S. Geração de números aleatórios. **Revista Sinergia**, n. 2, v. 3, 2002.  
<<http://www.cefetsp.br/edu/sinergia/5p13c.html>>
- PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Ed. Agropecuária, 2002. 478p.
- PEREIRA, A.R.; CAMARGO, A. PAES. An analysis of the criticism of the Thornthwaite's equation for estimating potential evapotranspiration. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.46, p.149-157, 1989.
- PEREIRA, A.R.; VILA NOVA, N. A.; SEDYAMA, G.C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: ESALQ, 1997. 183p.
- PICINI; A.G. et al. Desenvolvimento e teste de modelos agrometeorológicos para a estimativa de produtividade do cafeeiro. **Bragantia**, Campinas, n. 58, v. 1, p.157-170, 1999.

POPULATION REFERENCE BUREAU. **World Population Data Sheet of the Population Reference Bureau**, Washington D. C., 1997. 17p <<http://www.prb.org>>

POPULATION REFERENCE BUREAU. **World Population Data Sheet of the Population Reference Bureau**, Washington D. C., 2004.17p <<http://www.prb.org>>

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.

QUEIROZ, E.F.de; SILVA, R.J.B. da; OLIVEIRA, M.C.N.de Modelo de análise de regressão periódica da precipitação mensal, da bacia atlântico sudeste, no Estado do Paraná. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, n.5, 2001.

RASSINI, J.B. Manejo da água na irrigação num Latossolo Vermelho-Amarelo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, n.4, p. 503-507, 2002.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.12, p.211-216, 1988.

REICHARDT, K. **Dinâmica da matéria e energia em ecossistemas**. 6. ed. Piracicaba: Depto. Física e Meteorologia (USP/ESALQ), 1996. 505p.

RIBEIRO, A.M.de A.; LUNARDI, D.M.C. A precipitação mensal provável para Londrina - PR, através da função gama. **Revista Energia na Agricultura**. V. 12, n.4, p.37-44, 1997b.

RIBEIRO, A.M.de A.; LUNARDI, D.M.C. A precipitação quinzenal provável para Londrina - PR através da função gama. In: **X CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA**. Piracicaba - SP, SBA/ ESALQ-USP/ CNPq/ FAPESP/FINEP, 1997a.

RIJTEMA, P.E.; ABOUKHALED, A. Crop water use. In: ABOUKHALED, A.; ARAR, A., BALBA, A.M.; BISHAY, B.G.; KADRY, L.T.; RIJTEMA, P.E. & TAHER, A. **Research on crop water use, salt affected soils and drainage in the Arab Republic of Egypt**. FAO Regional Office for the Near East, 1975. p.5-61.

RODRIGUES ANIDO, N.M. **Caracterização hidrológica de uma bacia experimental visando identificar indicadores de monitoramento ambiental**. Piracicaba, 2002. 69p. Dissertação (mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

SAAD, J.C.C. **Estudo das distribuições de frequência da evapotranspiração de referência e da precipitação pluvial para fins de dimensionamento de sistemas de irrigação**. Piracicaba, 1990. 124p. Tese (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

SAMPAIO, S.C et al. Precipitação provável para o município de Lavras-MG, utilizando a distribuição log-normal. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.23, n.2, p.382-389, 1999.

SAMPAIO, S.C. et al. Estudo da precipitação efetiva para o município de Lavras, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.4, n.2, p.210-213, 2000.

SANTANA, D.P.; NAIME, U.J. Solos mais favoráveis para a cafeicultura. **Informe Agropecuário**, v.4, n. 44, p.9-11, 1978.

- SANTOS, R.Z dos; ANDRE, R.G. B. Consumo de água nos diferentes estágios de crescimento da cultura do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, n. 27, v. 4, p.543-548, 1992.
- SARMA, P.B.S.; RAO, N.H.; RAO, K.V.P. Calculation of water balance in the crop root zone by computer. **Journal of Hydrology**. n.45, p. 123-131, 1980.
- SEDIYAMA, G. **Necessidades de água para os cultivos**. Brasília: ABEAS (Associação Brasileira de Ensino Agrícola Superior), 1987. 143p. (Curso de engenharia da Irrigação, Módulo 4)
- SETTI, A.A. et al. **Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos**. 2. ed. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica e Agência Nacional das Águas, 2001. 328p.
- SHIKLOMANOV, I.A. Comprehensive Assessment of the Freshwater Resources of the World, **Assessment of Water Resources and Water Availability in the World**, WMO/SEI, 1997.
- SILVA, J.B. da Somas térmicas na precisão de duração da fase vegetativa do arroz irrigado. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA**, 5, 1987, Belém-PA, Resumos..., Belém: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1987. p. 86
- SILVA, S. C.; BRITES, R. S.; ASSAD, E. D. Identificação de risco climático para a cultura de arroz de sequeiro no Estado de Goiás. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, n.33, v.7, p.1005-101, 1998.
- SILVEIRA, C.S., SILVA JUNIOR, G.C. da O Uso de Isótopos Ambientais em Estudos Hidrogeológicos no Brasil: Uma Resenha Crítica. **Anuário do Instituto de Geociências** – UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro). n. 21, 1998
- SOUZA, J.L.M. de.; VILLA NOVA, N.A.; CASTRO NETO, P. Avaliação do efeito da energia advectiva na estimativa da evapotranspiração de referência para a região de Lavras-MG. **Revista do Setor de Ciências Agrárias**, v.13, n.1-2, p.41-47, 1994.
- SOUZA, J.L.M. de; FRIZZONE, J.A. Modelo aplicado ao planejamento da cafeicultura irrigada: I. Simulação do balanço hídrico e do custo com água. **Acta Scientiarum**, n.1, v.25, p.103-112, 2003.
- SOUZA, J.L.M.de **Modelo de análise de risco econômico aplicado ao planejamento de projetos de irrigação para cultura do cafeeiro**. Piracicaba, 2001. 253p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.
- SPIEGEL, M.R. **Estatística**. 3. ed., São Paulo: Makron Books, 1993.
- SRH – Secretaria de Recursos Hídricos. **Water Resources in Brazil**, Brasília: MMA – Ministério da Meio Ambiente e Amazônia legal, 1998.
- SRIVASTAVA, R.C. et al. Investment decision model for drip irrigation system. **Irrigation science**, v.22, n.2, p.79-84, 2003.
- TEIXEIRA, O.A.; LAGES, V.N. Do produtivismo à construção da agricultura sustentável: duas abordagens pertinentes à questão. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasília, v.13, n.3, p.347-368, 1996.
- THOM, H.C.S. A note on the gama distribution. **Monthly Weather Review**, Washinton, v.86, n. 117-222, 1958.

- THORNTHWAITE, C.W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical review**, New York, v.38, n.1, p.55-94, 1948.
- THORNTHWAITE, C.W. The moisture factor in climate. **Transactions of the American Geographical Union**, Washington, D.C., v.27, p.41-48, 1946.
- THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. The water balance. **Drexel Institute of Technology – Laboratory of Climatology, Publications in Climatology**, Centerton, N.J. v. 8, n. 1, 104p., 1955. 104p.
- THORNTHWAITE, C.W.; WILM, H.G. Report of the Commite on evapotranspiration and transpiration, 1943-1944. **Transactions of the American Geophysical Union**, Washington, D.C., p.686-693, 1944.
- 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.
- TRENTIN, C.V. **Diagnóstico voltado ao planejamento do uso de águas residuárias para irrigação nos cinturões verdes da região metropolitana de curitiba-PR**. Curitiba, 2005. 115p. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) – Universidade Federal do Paraná.
- TUBELIS, A.; NASCIMENTO, F.J.L. do **Meteorologia descritiva - fundamentos e aplicações brasileiras**. São Paulo: Editora Nobel, 1986.
- TUCCI, C.E.M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 2. ed, Porto Alegre: UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul) – Editora da Universidade, 1997.
- VAKSMANN, M. **Le modèle BIPODE: Logiciel**. Bamako: IRAT, 1990. Não paginado.
- VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the conductivity of unsaturated soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, n. 44, p. 892-898, 1980.
- VAN LIER, Q.J.; DOURADO NETO, D. **Balanço hídrico para culturas anuais de perenes: software aplicativo**. Piracicaba: ESALQ, 1991.
- VEIHMEYER, F.J.; HENDRICKSON, A.H. Methods of measuring field capacity and wiltin percentages of soils. **Soil Sci. Soc.**, Madison, v.68, p.75-94, 1949.
- VILLELA, S.M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975. 245p.
- WILLMOTT, C.J.; ROWE, C.M.; MINTZ, Y. Climatology of the terrestrial seasonal water cycle. **Journal of Climatology**, v.5, p.589-606, 1985.
- 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, 1971.
- WREGGE, M. S. Risco de deficiência hídrica na cultura do milho no estado do Paraná. **Pesquisa Agropecuária brasileira**, Brasília, v. 34, n.7, p. 1119-1124, 1999.