

Limites na utilização de um modelo de balanço hídrico decendial em função da capacidade de água disponível no solo

Jorge Luiz Moretti de Souza* e Sigui Frid Gomes

Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Rua dos Funcionários, 1540, 80035-050, Curitiba, Paraná, Brasil. *Autor para correspondência. E-mail: jmoretti@ufpr.br

RESUMO. O presente trabalho consistiu na avaliação dos limites de utilização de um modelo de simulação do balanço hídrico climatológico decendial irrigacionista, em quatro regiões distintas no Estado do Paraná. Nas análises, 68 cenários de simulação do balanço hídrico foram testados para permitir o relacionamento entre a evapotranspiração da cultura (ET_c), chuva provável a 75%, diferentes capacidades de água disponível no solo (CAD) e deficiência hídrica anual (DEF). As análises realizadas mostraram que: o modelo consegue obter melhores estimativas de seus componentes para maiores valores de água disponível (AD) no solo; o valor ideal de CAD para processar as análises de irrigação em função das variações da ET_0 , K_c e ET_c deve de preferência ser estabelecida no próprio modelo. Porém, se a condição "maior ET_0 decendial $\leq AD$ " do período for válida, o balanço hídrico apresenta resultados consistentes para periodicidade igual a 10 dias.

Palavras-chave: simulação, CAD , água disponível, irrigação, agricultura irrigada.

ABSTRACT. Limitations in the use of a ten-day water balance model, based on available water capacity in the soil. The objective of this work was to evaluate the limitations of a ten-day climatic water balance model to simulate irrigation in four different Paraná State regions. Sixty-eight water balance scenarios were tested to allow the relationship among crop evapotranspiration (ET_c), probable precipitation at 75% level ($P75\%$), soil available water capacity (AWC) and annual water deficiency (DEF). The results showed that: the model estimates its components better for greater values of available water (AW) in the soil; the ideal AWC value to process the irrigation analyses based on variations of ET_0 , K_c and ET_c should be established in the model itself. However, if the condition "larger ten-day $ET_0 \leq AW$ " of the period is valid, the water balance produces consistent results for 10 days periodicity.

Key words: simulation, AWC , available water, irrigation, agricultural irrigation.

Introdução

O desenvolvimento e a utilização de modelos de simulação do balanço hídrico voltado às 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, deixaram de ser obstáculos. A evolução das técnicas de programação e o surgimento de linguagens de programação mais acessíveis, associadas à grande capacidade de processamento dos computadores pessoais estão permitindo a evolução da modelagem.

A literatura tem indicado que o desenvolvimento e aprimoramento de modelos de simulação de balanço hídrico têm resultado em interessantes ferramentas para estimar alternativas de planejamento, dimensionamento e manejo da irrigação. Gomes (2005), por exemplo, cita e

descreve uma relação de, pelo menos, 24 trabalhos que envolveram direta ou indiretamente a realização de balanços hídricos para auxiliar na composição de modelos computacionais, voltados à agricultura irrigada.

Pereira *et al.* (1997) comentam que 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 e Mather (1955), visto que o mesmo se baseia na dinâmica do armazenamento de água no solo e ainda pode ser realizado considerando apenas dados climáticos de precipitação e temperatura do ar.

O balanço hídrico climatológico de Thornthwaite e Mather (1955) foi desenvolvido para determinar o regime hídrico de um local, sem a necessidade de medidas diretas das condições do

solo. Para sua elaboração, há necessidade de se definir, para uma determinada região ou local a capacidade de água disponível (*CAD*) no solo, os valores de precipitação (*P*) e evapotranspiração de referência (*ET₀*) para um período considerado. Com essas informações básicas, a metodologia permite estimar, para o mesmo período, o armazenamento da água no solo (*ARM*), a evapotranspiração real (*ER*), deficiência (*DEF*) e excedente hídrico (*EXC*) (Ometto, 1981; Pereira *et al.*, 1997).

Baseando-se nos inúmeros exemplos de modelos apresentados na literatura, a metodologia básica apresentada por Thornthwaite e Mather (1955) pode sofrer ajustes e aprimoramentos e, a partir do interesse do pesquisador, permitir o estabelecimento de condições e rotinas para estimar alternativas de planejamento, dimensionamento e manejo da irrigação na agricultura, entre outros, para um determinado período de tempo considerado.

Souza (2001) desenvolveu, em linguagem *Visual Basic (macros)*, um programa denominado “Modelo para a análise de risco econômico aplicado ao planejamento de projetos de irrigação para a cultura do cafeeiro (*MORETTI*)”, possuindo uma série de módulos destinados ao estudo do planejamento de projetos de irrigação de culturas agrícolas. Dentre eles, o módulo “Balanço hídrico climatológico decendial” desenvolvido baseou-se na metodologia de Thornthwaite e Mather (1955), porém contém uma série de adaptações e opções que tratam especialmente da prescrição e quantificação da irrigação suplementar, a fim de atender as necessidades de água no solo para qualquer tipo de cultura (perene ou anual). Dados edafoclimáticos podem ser inseridos pelo usuário, permitindo grande flexibilidade nas condições de manejo da irrigação e armazenamento de água no solo. A *ET₀* pode ser simulada por diferentes distribuições de probabilidade, baseando-se na metodologia de Monte Carlo, e modelos matemático-estatísticos de estimativa do armazenamento, em função do negativo acumulado, podem ser escolhidos para processar as análises de balanço hídrico. O referido módulo também está vinculado a outros módulos do modelo, possibilitando que dados de até 10.000 anos simulados de *ET_c*, irrigação (*I*), *ER* e deficiência participem da estimativa de custos com energia e água, produtividade, entre outros.

Por outro lado, aliado as facilidades que o aprimoramento de modelos de simulação de balanço hídrico trouxe, tem-se verificado também que muitos erros estão sendo cometidos nas análises de trabalhos científicos envolvendo a sua utilização. Principalmente, quando os limites e as condições de

contorno utilizadas para possibilitar a composição do modelo são desconsiderados, o que pode promover a obtenção de resultados totalmente inconsistentes com a realidade. Souza (2001) e Frizzone *et al.* (2005), dentro do contexto de seus trabalhos, fazem uma série de considerações finais sobre os cuidados que se deve ter na interpretação dos resultados alcançados nas simulações com o modelo trabalhado, para uma eventual aplicação prática.

A utilização de modelos de balanço hídrico aprimorados, que empreguem apenas a simulação da evapotranspiração de referência (*ET₀*) e chuva provável, pode proporcionar níveis tecnicamente aceitáveis de erro de estimativa dos seus parâmetros (*ARM*, *ER*, *DEF* e *EXC*). No entanto, o acompanhamento das condições de armazenamento de água no solo, associado ao entendimento das necessidades da cultura e das irrigações realizadas no processo de simulação do modelo, são fundamentais no estabelecimento de alternativas e estratégias de planejamento mais eficientes para utilização das reservas de água do solo para agricultura irrigada (Souza, 2001; Frizzone *et al.*, 2005).

Como nos cultivos agrícolas, as culturas, normalmente, exploram diferentes profundidades de solo, em função do sistema radicular, estágio de desenvolvimento, tipo e estrutura de solo, entre outros, a capacidade de água disponível pode estar sujeita a uma variação contínua (Ometto, 1981; Pereira *et al.*, 1997). Nesse sentido, a verificação dos limites de utilização dos modelos de balanço hídrico, para realizar estimativas de armazenamento e irrigações para um determinado período (diário, pântada, semana, decêndio, quinzena, mês entre outros), é sempre importante para uma região e cultura, pois permite identificar e estabelecer até que ponto os resultados obtidos são coerentes com as opções escolhidas nos formulários do modelo e com a realidade.

Cardoso *et al.* (2003), realizando a simulação de um balanço hídrico agroclimático para um período de 20 anos na região de Lages, Estado de Santa Catarina, a partir de valores médios de precipitação e evapotranspiração, verificaram, para as condições de *CAD* iguais a 75 e 100 mm, que a probabilidade de ocorrência de déficits hídricos é muito baixa. Para valores de *CAD* de 50 mm, os autores encontraram que a probabilidade de não ocorrer déficit hídrico é superior a 50% na maioria dos decêndios do ano. Para a condição de *CAD* igual a 25 mm, a probabilidade de ocorrência de déficits hídricos foi significativamente alta, apresentando magnitudes expressivas, principalmente no verão, o que justificaria a necessidade do uso da irrigação nestas

situações.

Análises de balanço hídrico decendial para fins irrigacionistas, realizadas no trabalho de Gomes (2005), com os dados climáticos (precipitação provável a 75% e ET_0 simulada) e solos (argiloso e arenoso) da região de Ponta Grossa, Estado do Paraná, evidenciaram, para a condição de CAD igual a 25 mm no solo (baixos valores de CAD), que se deve ter cuidado e atenção na interpretação dos resultados obtidos nas simulações para um período decendial, em modelos e regiões que apresentem condições semelhantes. O autor acrescenta que balanços hídricos simulados para regiões/locais em que os solos não possuam armazenamento compatível com o período de realização das irrigações do modelo (diário, pântada, semana, decêndio, quinzena e mês) podem resultar em valores totalmente inconsistentes de ER , irrigação (I) e DEF . Tal inconsistência pode comprometer também outros valores estimados nos modelos, como a produtividade a partir de funções de produção, volume de água utilizado nas irrigações, contabilização dos custos com bombeamento, energia, agricultura irrigada, entre outros.

Mediante as considerações dispostas, o objetivo do presente trabalho consistiu em avaliar os limites de utilização de um programa voltado ao cálculo do balanço hídrico climatológico decendial irrigacionista, a partir da variação da capacidade de água disponível no solo, para as cidades de Apucarana, Cascavel, Morretes e Ponta Grossa, localizadas em regiões distintas no Estado do Paraná.

Material e métodos

O presente trabalho foi realizado a partir de uma série de simulações de balanços hídricos, realizadas com auxílio de um programa denominado "MORETTI - Módulo: Balanço hídrico climatológico decendial irrigacionista, Versão 2.0" (Souza, 2005a), que foi extraído e melhorado a partir do modelo original realizado por Souza (2001) - Modelo para a análise de risco econômico, aplicado ao planejamento de projetos de irrigação para a cultura do cafeeiro (MORETTI).

As cidades de Apucarana, Cascavel, Morretes e Ponta Grossa, localizadas em regiões distintas, no Estado do Paraná, foram escolhidas para compor cenários de simulação do balanço hídrico, visando contrastar relações entre a ET_c , chuva provável a 75%, diferentes condições de água disponível no solo (AD) e deficiência hídrica anual (DEF). A realização deste estudo dá continuidade à proposta de desenvolvimento do modelo constituído inicialmente por Souza (2001) e às verificações, considerações e sugestões apontadas em

trabalhos de Souza e Frizzone (2003), Gomes (2005), Trentin (2005), Frizzone *et al.* (2005) e Souza e Frizzone (2007).

O programa "MORETTI - Módulo: Balanço hídrico climatológico decendial irrigacionista", assim como qualquer outra programa que se destina à realização de balanços hídricos, necessita ser alimentado com uma série de dados e opções. A Figura 1 apresenta um fluxograma simplificado, contendo a estrutura lógica de algumas partes do programa, sendo possível verificar: os dados de entrada para identificação do local e realização das análises; opções de realização do balanço hídrico; leitura das opções e dados para análise; lógica do processo de simulação; e, resultados que são obtidos na saída.

Os parâmetros climáticos de entrada no modelo (Tabela 1) foram obtidos a partir das seguintes seqüências de dados climáticos diários de temperatura média do ar e chuva: (a) 36 anos de dados coletados na Estação Climatológica da região de Apucarana; (b) 32 anos de dados coletados na Estação Climatológica da região de Cascavel; (c) 31 anos de dados coletados na Estação Climatológica da região de Morretes, e (d) 50 anos de dados coletados na Estação Climatológica da região de Ponta Grossa, Estado do Paraná. Maiores detalhes sobre a metodologia para tratamento dos dados, cálculo da ET_0 decendial, cálculo da chuva provável, obtenção dos parâmetros estatísticos e processo de simulação podem ser verificados no trabalho de Gomes (2005), e complementados em Souza (2001), Souza (2004), Frizzone *et al.* (2005).

Sendo assim, as análises de simulação foram realizadas a partir da seguinte série de dados de entrada e dos seguintes procedimentos de cálculo disponíveis nas rotinas do modelo:

(a) Dados gerais referentes ao local/propriedade

Os balanços hídricos foram realizados para as cidades paranaenses de Apucarana, Cascavel, Morretes e Ponta Grossa.

(b) Valores decendiais de chuva provável

Os valores decendiais de chuva, utilizados como entrada no programa foram prováveis a 75% (Tabela 1). Esses valores foram estimados em planilha eletrônica *Microsoft Excel* 2000, considerando-se os parâmetros estatísticos da distribuição de probabilidade que melhor se ajustou aos dados observados, com o teste de Kolmogorov-Smirnov ($\alpha = 0,05$). Os parâmetros estatísticos da distribuição de probabilidade de melhor ajuste foram obtidos com auxílio do programa "MORETTI - Modulo: Distribuição de frequência e teste de aderência,

Versão 2.0” (Souza, 2005b) que também foi extraído do modelo *MORETTI*, originalmente realizado por Souza (2001). O programa realiza testes de aderência com as distribuições Gama, Normal, Exponencial, Triangular e Uniforme.

(c) Parâmetros decenciais para simulação e estimativa da *ET_o* decendial

Os valores decenciais de *ET_o*, utilizados na entrada do modelo (Tabela 1), foram simulados pelo

método de Thornthwaite (1948), considerando a temperatura média decendial do ar. Empregou-se a distribuição de probabilidade Normal para simular os valores de *ET_o* das quatro regiões, nos decêndios de cada ano de balanço hídrico simulado. Assumir que a *ET_o* segue esta distribuição foi necessário, porque o módulo “Balanço hídrico climatológico decendial irrigacionista” não possibilita a escolha de diferentes distribuições de probabilidade para os diferentes decêndios ao longo do ano.

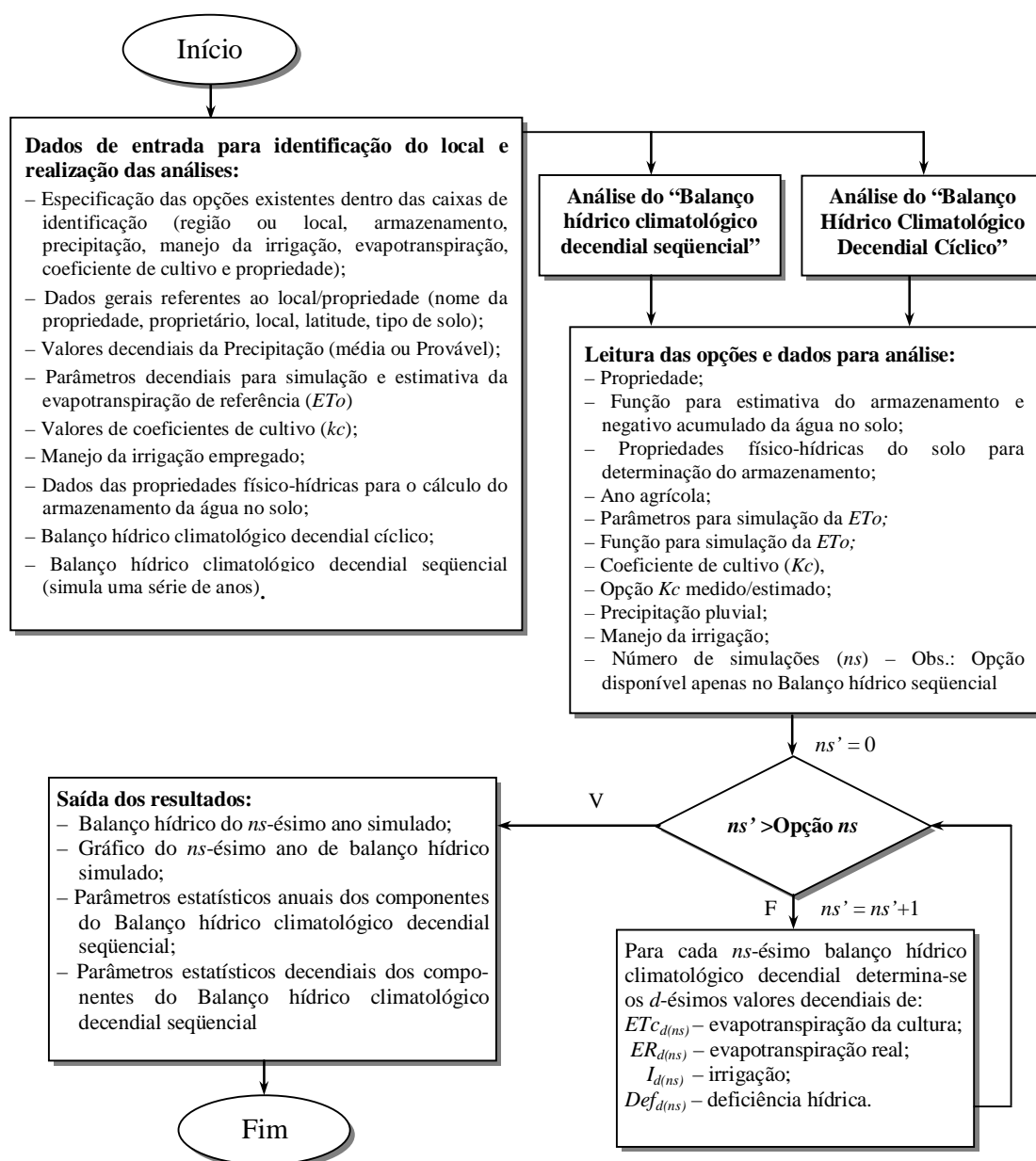


Figura 1. Fluxograma contendo a estrutura lógica de algumas partes do programa “*MORETTI* - Módulo: Balanço hídrico climatológico decendial irrigacionista”.

Tabela 1. Parâmetros estatísticos, média e desvio padrão da ET_0 estimada, e chuva a 75% de probabilidade para quatro localidades no Estado do Paraná (Gomes, 2005).

Decêndios	Apucarana			Cascavel			Morretes			Ponta Grossa		
	ET_0 Média (mm)	Desvio- Padrão (mm)	Chuva 75% (mm)	ET_0 Média (mm)	Desvio- Padrão (mm)	Chuva 75% (mm)	ET_0 Média (mm)	Desvio- Padrão (mm)	Chuva 75% (mm)	ET_0 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 (31/01 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
Total do ano	965,0		488,6	932,4		584,0	981,8		746,7	835,3		466,6
Média do ano	26,1		13,2	25,2		15,8	26,5		20,2	22,6		12,6

Fonte: Gomes (2005).

Maiores informações sobre o tratamento dos dados climáticos (precipitação e temperatura média do ar) e análises realizadas com os mesmos para se chegar aos parâmetros estatísticos apresentados na Tabela 1, podem ser encontrados em Gomes (2005).

(d) Valores de coeficientes de cultivo (K_c)

Para transformar a ET_0 em Evapotranspiração da Cultura (ET_c), ao longo dos decêndios do ano, considerou-se o cultivo hipotético de uma cultura perene, possuindo coeficiente de cultivo (K_c) igual a 1,0 ao longo de todo o ano.

(e) Manejo da irrigação empregado

O programa utilizado sempre considera que o manejo da irrigação, empregado nas irrigações dos decêndios, é suplementar. Desta forma, a irrigação, em um determinado decêndio, ao longo do ano, somente é realizada se duas condições forem satisfeitas, ou seja: se a irrigação, no decêndio, foi habilitada (realizado em um formulário do programa); e se o armazenamento e a fração água disponível no solo acusarem a necessidade

de irrigação (verificada na simulação do balanço hídrico). No presente trabalho, empregou-se um manejo que considera o uso da irrigação suplementar ao longo de todo o ano.

(f) Propriedades físico-hídricas para o cálculo do armazenamento da água no solo

O formulário de entrada dos parâmetros físico-hídricos do solo, no programa balanço hídrico, permite que os mesmos possam ser alterados. Assim, diferentes valores de capacidade de água disponível (CAD) podem ser obtidos (Equação 1). Nas análises de simulação realizadas, os valores de umidade de capacidade de campo (U_{CC}), ponto de murcha (U_{PMP}) e densidade (d) foram assumidos como invariáveis. Desta forma, a profundidade efetiva do sistema radicular (z) foi ajustada convenientemente de forma a proporcionar 17 valores de CAD , variando de 20 mm a 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). Cada um dos 17 valores de CAD foi utilizado para gerar 10.000 análises de

simulação, com irrigação suplementar, ao longo de todo ano, para as localidades de Apucarana, Cascavel, Morretes e Ponta Grossa.

Os valores da capacidade de água disponível no solo (CAD) e água disponível do solo (AD) são calculados no programa, a partir das Equações 1 e 2. Foram considerados valores de fração água disponível (p) igual a 0,5, para uma cultura hipotética ao longo de todo o ano.

$$CAD = 0,01 \cdot (U_{CC} - U_{PMP}) \cdot d \cdot z \quad (1)$$

$$AD = CAD \cdot p \quad (2)$$

sendo, CAD a capacidade de água disponível (mm); U_{CC} a umidade do solo na capacidade de campo, com base em peso (%); U_{PMP} a umidade do solo no ponto de murcha permanente, com base em peso (%); d a densidade aparente do solo ($g\ cm^{-3}$); z a profundidade do volume de controle ou profundidade efetiva do solo (mm); AD água disponível no solo (mm); e p fração água disponível, no solo, para uma determinada cultura (adimensional).

No programa utilizado, a estimativa do armazenamento de água no solo e, ou “negativo acumulado”, para o cálculo do balanço hídrico, ao longo do ano, pode ser realizada a partir de cinco equações. No entanto, por causa dos resultados obtidos por Dourado Neto e Van Lier (1993) e Gomes (2005), optou-se por utilizar a equação Cosenoidal, que considera a fração p e realiza as estimativas a partir das seguintes condições:

Quando $CAD \cdot (1 - p) < ARM \leq CAD$, ou seja, na zona úmida,

$$ARM = CAD - L \quad (3)$$

Quando $0 < ARM \leq CAD \cdot (1 - p)$, ou seja, na zona seca,

$$ARM = (1 - p) \cdot CAD \cdot \left\{ 1 - \frac{2}{\pi} \cdot \arctg \left[\frac{\pi}{2} \left(\frac{|L| - CAD \cdot p}{(1 - p) \cdot CAD} \right) \right] \right\} \quad (4)$$

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); e p a fração água disponível no solo para uma determinada cultura no decêndio (adimensional).

(g) Outras opções:

- as simulações foram realizadas com a opção “Balanço hídrico climatológico decendial irrigacionista seqüencial” (simula uma série de anos);
- número de simulações: as análises de cada um

dos 68 cenários de balanço hídrico foram realizadas, empregando-se 10.000 simulações. Os cenários foram constituídos a partir da consideração de quatro localidades, um tipo de solo, um manejo de irrigação, uma função de armazenamento de água no solo e 17 capacidades de água disponíveis (CAD) no solo.

Resultados e discussão

Os valores decendiais de chuva provável e ET_0 média, estimados para servir de entrada no programa e compor os cenários de balanço hídrico nas localidades de Apucarana, Cascavel, Morretes e Ponta Grossa, podem ser visualizados e contrastados na Figura 2.

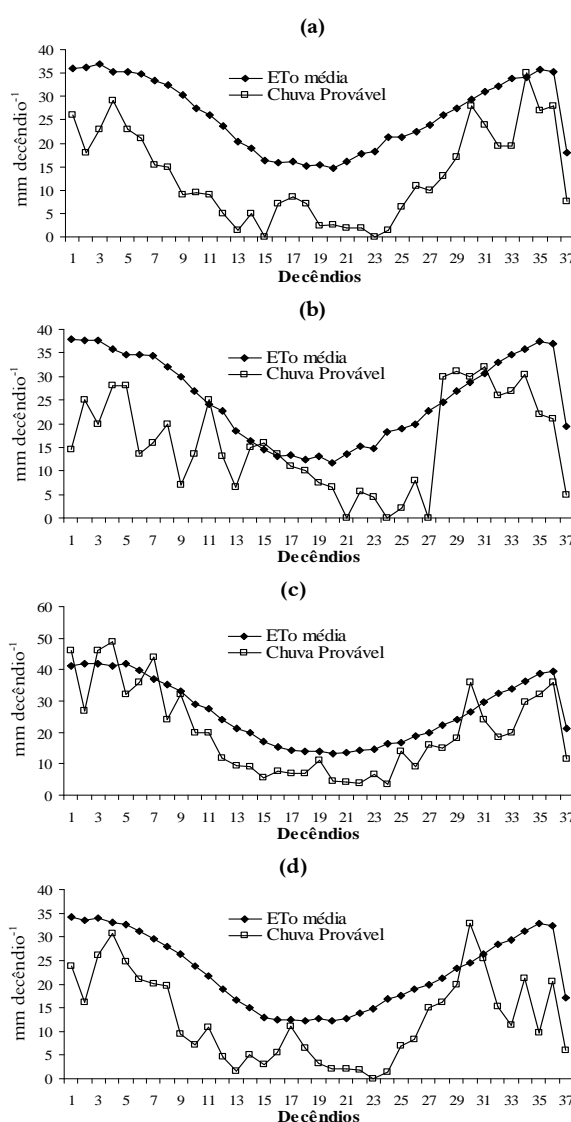


Figura 2. Valores decendiais de ET_0 , média, estimada pelo método de Thornthwaite (1948), e chuva provável (75%) estimada com a distribuição de probabilidade de melhor ajuste, para as localidades: (a) Apucarana, (b) Cascavel, (c) Morretes e (d) Ponta Grossa, Estado do Paraná.

Considerando-se os dados da Tabela 1 e Figura 2, é possível observar que:

- as quatro localidades apresentaram, predominantemente, valores de ET_0 maiores que a chuva provável a 75%. A região de Apucarana, Estado do Paraná, apresentou saldo positivo (1 mm decêndio⁻¹) entre a chuva provável e a ET_0 média apenas para o decêndio 34 (27/11 a 06/12). A região de Cascavel apresentou sete decêndios com chuva provável maior que a ET_0 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 cinco decêndios com ET_0 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, Estado do Paraná, apresentou chuva maior que a ET_0 (+8,27 mm decêndio⁻¹) somente para o decêndio 30 (18/10 a 27/10);

- O valor acumulado da diferença entre chuva provável e ET_0 média foi de -476,4 mm ano⁻¹ para Apucarana, -348 mm ano⁻¹ para Cascavel, -235 mm ano⁻¹ para Morretes e -368,7 mm ano⁻¹ para Ponta Grossa.

- O maior valor de ET_0 decendial para a localidade de Apucarana, 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 ET_0 decendial foi de 14,7 mm para o decêndio 20 (10/07 a 19/07). A ET_0 decendial média, para a região de Apucarana, foi de 26,1 mm decêndio⁻¹. O valor de ET_0 decendial média, para a região de Cascavel, foi de 25,2 mm decêndio⁻¹ e, para a região de Ponta Grossa, foi de 22,6 mm decêndio⁻¹. O maior valor de ET_0 estimado, para Cascavel e Ponta Grossa, foi de 38 mm decêndio⁻¹ e 34,1 mm decêndio⁻¹, respectivamente, ambos ocorrendo no decêndio 1 (01/01 a 10/01). As regiões de Cascavel e Ponta Grossa apresentaram menor valor de ET_0 para o decêndio 20 (10/07 a 19/07), sendo 11,6 e 12,2 mm decêndio⁻¹, respectivamente. A ET_0 média, para a região de Morretes, foi de 26,5 mm decêndio⁻¹, a maior ET_0 estimada foi de 41,8 mm para os decêndios 3 (21/01 a 30/01) e 5 (10/02 a 19/02), e a menor ET_0 foi de 13,40 mm para o decêndio 20 (10/07 a 19/07).

As Tabelas 2, 3, 4 e 5 apresentam a média e desvio-padrão dos valores anuais de DEF , ER e I , obtidos nas simulações para as localidades de Apucarana, Cascavel, Morretes e Ponta Grossa, respectivamente. Para as mesmas condições, a Figura 3 ilustra a variação dos valores médios anuais de DEF , ER e I , obtidos com o módulo "Balanço hídrico climatológico decendial irrigacionista", considerando valores de água

disponível (AD) entre 10 e 50 mm, para as condições climáticas das quatro regiões.

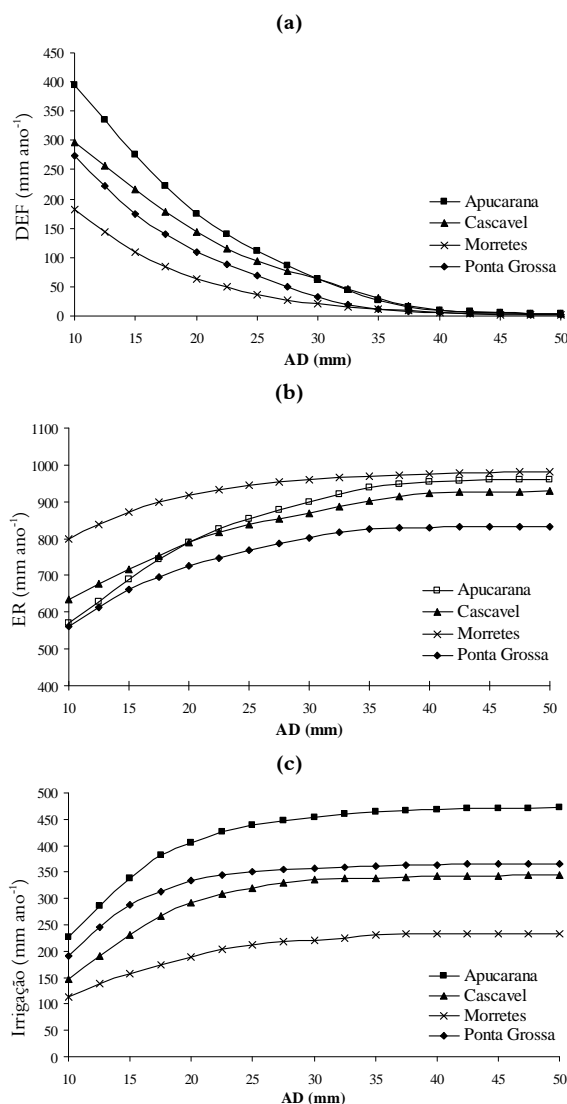


Figura 3. Valores médios anuais de DEF , ER e I , obtidos com o módulo "Balanço hídrico climatológico decendial irrigacionista", considerando valores de água disponível (AD) entre 10 e 50 mm, para quatro localidades no Paraná.

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 3). As deficiências de água foram maiores para os solos que apresentaram menor CAD e AD no solo. 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 1 e 2) 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).

Tabela 2. Média e desvio-padrão dos valores anuais de DEF, ER e I (mm ano⁻¹), simulados para a região de Apucarana, Estado do Paraná, considerando os valores de AD, variando entre 10 e 50 mm.

CAD	AD	z*	DEF		ER		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

* z - profundidade efetiva do sistema radicular.

Tabela 3. Média e desvio-padrão dos valores anuais de DEF, ER e I (mm ano⁻¹), simulados para a região de Cascavel, Estado do Paraná, considerando os valores de AD, variando entre 10 e 50 mm.

CAD	AD	z*	DEF		ER		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

* z - profundidade efetiva do sistema radicular.

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 3, em que a taxa de variação dos valores de DEF, ER e I pode 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; Souza, 2005a; Frizzone *et al.*, 2005); e, (b) da variabilidade do processo de geração dos números aleatórios (NA) nas simulações.

Tabela 4. Média e desvio-padrão dos valores anuais de DEF, ER e I (mm ano⁻¹), simulados para a região de Morretes, Estado do Paraná, considerando os valores de AD variando entre 10 e 50 mm.

CAD	AD	z*	DEF		ER		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

* z - profundidade efetiva do sistema radicular.

Tabela 5. Média e desvio-padrão dos valores anuais de DEF, ER e I (mm ano⁻¹), simulados para a região de Ponta Grossa, Estado do Paraná, considerando os valores de AD variando entre 10 e 50 mm.

CAD	AD	z*	DEF		ER		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

* z - profundidade efetiva do sistema radicular.

O presente trabalho não trata de geração de números aleatórios (NA), porém maiores informações sobre as verificações do processo metodológico de geração de NA, no balanço hídrico utilizado podem ser encontradas em Souza (2001), Frizzone *et al.* (2005), Gomes (2005) e Souza e Frizzone (2007). No entanto, é importante observar que Souza (2001) não encontrou diferenças maiores que 2% entre a ETo média

estimada, a partir de 80 simulações e 10.000 simulações, com a distribuição normal. Gomes (2005) também verificou que as seqüências de NA , geradas no módulo *Visual Basic (macro)* do *Microsoft Excel 2000*, utilizado no modelo, 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”. O autor acrescenta que as seqüências de NA geradas não apresentam tendências e concentrações de valores de acordo com o teste de “Análise do gráfico de dispersão”.

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 2 a 5 e Figura 3, 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 esse valor está condicionado aos valores de ET_c , que, por sua vez, tem a sua magnitude em função do clima da região, por meio da ET_0 , e dos valores de coeficiente de cultivo (K_c) da cultura, ao longo dos estádios de seu desenvolvimento.

Os resultados das Tabelas 2 a 5 e Figura 3 confirmam as evidências apontadas por Gomes (2005), quando afirma que se deve ter cuidado e atenção na interpretação dos resultados obtidos com balanços hídricos simulados para regiões/locais em que os solos não possuam CAD e AD compatível com a periodicidade do modelo (diário, pântada, semana, decêndio, quinzena e 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 apresentados na Tabela 6, os seguintes limites de utilização foram verificados nas quatro regiões analisadas: **(a)** 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 desse valor, a DEF média foi menor que 16,0 mm ano⁻¹ (0,43 mm decêndio⁻¹) 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%. Esse fato indica que entre os valores de AD de 30,0 e 37,5 mm a cultura hipotética (possuindo $K_c = 1$ e $p = 0,5$, ao longo de todo ano) ainda consome bastante água na zona seca do solo, ou seja, água que se encontra entre $ARM \leq CAD \cdot (1 - p)$; **(b)** os valores anuais de DEF e ER , simulados para Cascavel - Estado do Paraná, também apresentam relativa estabilidade para valores de AD maiores que 37,5 mm. A partir desse valor, as DEF foram inferiores a 17,0 mm (0,46 mm decêndio⁻¹). A curva da lâmina de irrigação suplementar necessária (I) também ficou estável antes, apresentando variações inferiores a 0,68%, a partir de AD acima de 32,5 mm; **(c)** seguindo a mesma tendência observada para Apucarana e Cascavel - Estado do Paraná, os valores anuais de DEF e ER simulados para Ponta Grossa, Estado do Paraná, apresentam relativa estabilidade para valores de AD maiores que 35,0 mm. A partir desse valor, a DEF média foi menor que 10,7 mm ano⁻¹ (0,29 mm decêndio⁻¹). 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; **(d)** 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 impressão falsa 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⁻¹), a partir de valores de AD maiores que 32,5 mm.

Tabela 6. Deficiência decendial média (DEF_m - mm decêndio⁻¹) e variação percentual dos valores de DEF , ER e I (%) entre os incrementos de AD no solo, obtidos com os dados das Tabelas 2 a 5, para as regiões de Apucarana, Cascavel, Morretes e Ponta Grossa, Estado do Paraná.

AD (mm)	Apucarana				Cascavel				Morretes			Ponta Grossa				
	DEF_m	DEF	ER	I	DEF_m	DEF	ER	I	DEF_m	DEF	ER	I	DEF_m	DEF	ER	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

Os maiores valores decendiais médios de ET_0 (Tabela 1), estimados para a região de Apucarana (36,9 mm decêndio⁻¹), Cascavel (38,0 mm decêndio⁻¹) e Ponta Grossa (34,1 mm decêndio⁻¹), 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 à 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_0 decendial (entre os 37 decêndios do ano) pode servir como um indicativo da AD mínima. Esta consideração é necessária para que o balanço hídrico climatológico decendial 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⁻¹). No entanto, quando os valores de K_c é menor do um ($K_c < 1$) e/ou a precipitação provável é diferente de zero, em todos os decêndios ao longo do ano, como no caso de Morretes, esse indicativo não é mais suficiente e o valor da AD mínima para realizar as análises, poderá ficar abaixo do maior valor médio decendial da ET_0 , aumentando a faixa de aplicação do modelo utilizado. Nessa situação, a estimativa do valor limite da AD mínima somente poderá ser obtida empregando-se a metodologia utilizada para constituir as Tabelas 2 a 5 e Figura 3 deste trabalho.

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_0 , ET_c e P), físico-hídricos do solo e à periodicidade para a qual o modelo foi desenvolvido (diária, semanal, decendial, quinzenal, mensal, entre outras). Em condições de campo não é possível variar os valores de CAD , AD , ET_0 , ET_c , P , entre outros, como é realizado no processo de simulação, portanto, a verificação para apontar se o modelo de balanço hídrico decendial irrigacionista é adequado à região e proporcionará resultados consistentes com os parâmetros físico-hídricos existente no solo, deverá recair sobre a sua periodicidade. Sendo assim, pode-se sugerir:

- se a maior ET_0 decendial média for $\leq AD \Rightarrow$ a periodicidade do balanço hídrico pode ser igual a 10 dias (o modelo decendial utilizado apresentará bons resultados);

- se a maior ET_0 decendial média for $> AD \Rightarrow$ a periodicidade do balanço hídrico terá de ser menor que 10 dias (o modelo decendial utilizado não apresentará resultados consistentes).

Respeitando a periodicidade para a 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, decendial, quinzenal, mensal, entre outras).

O módulo "Balanço hídrico climatológico decendial irrigacionista" não possibilita a alteração da periodicidade (decendial). Essa característica não é exclusiva do Módulo desenvolvido inicialmente por Souza (2001) e aprimorado em Souza (2005), mas muito comum à maioria dos modelos de balanço hídrico existentes na bibliografia. Desta forma, é

importante observar que o modelo apresenta facilidades e opções para realizar o estudo de um balanço hídrico destinado à agricultura irrigada, porém são necessárias melhorias no sentido de possibilitar a alteração da periodicidade. É importante observar, também, que independente das opções de periodicidade do modelo: **(a)** os cuidados com os limites de utilização do balanço hídrico por parte do usuário devem sempre existir, para evitar resultados de simulação distorcidos em relação à realidade estudada, conforme observado para algumas faixas de *AD* no solo nas localidades de Apucarana, Cascavel, Morretes e Ponta Grossa; **(b)** 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, pântadas) também podem aumentar a variabilidade (risco) dos resultados, dificultando ou não permitindo a realização de análises seguras, voltadas ao planejamento da agricultura irrigada.

Conclusão

A consistência dos resultados obtidos, a partir de um balanço hídrico irrigacionista, está intimamente relacionada aos parâmetros climáticos (*ET₀*, *ET_c* e *P*), físico-hídricos do solo e à periodicidade para a qual o modelo foi desenvolvido.

O modelo utilizado consegue obter melhores estimativas de seus componentes para maiores valores de *CAD* e *AD* no solo. Porém, pontos de inflexão nas curvas de *ER*, *I* e *DEF* caracterizam a formação de um patamar em que valores de *AD*, além desse limite, não representam maior precisão nas simulações realizadas.

O valor ideal de *CAD* para processar as análises de irrigação, em função das variações da *ET₀*, *K_c* e *ET_c*, deve, de preferência, ser estabelecida no próprio modelo. Porém, quando a condição “maior *ET₀* decendial média $\leq AD$ ” do período é válida, o balanço hídrico apresenta resultados consistentes para periodicidade igual a 10 dias.

Referências

CARDOSO, C.O. *et al.* Balanço hídrico agro - climático para Lages-SC. *Rev. Cienc. Agrovet.*, Lages, v. 2, n. 2, p. 118-130, 2003.

DOURADO NETO, D.; JONG VAN LIER, Q.

Estimativa do armazenamento de água no solo para realização de balanço hídrico. *Rev. Bras. Cienc. Solo*, Viçosa, v. 17, n. 1, p. 9-15, 1993.

FRIZZONE, J.A. *et al.* Planejamento da irrigação: análise de decisão de investimento. Brasília: Embrapa, 2005.

GOMES, S. *Ajuste e avaliação de um modelo de balanço hídrico decendial e estudo dos limites de sua utilização em algumas localidades no Estado do Paraná*. 2005. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)-Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

OMETTO, J.C. *Bioclimatologia vegetal*. São Paulo: Ceres, 1981.

PEREIRA, A.R. *et al.* *Evapo(transpi)ração*. Piracicaba: Esalq, 1997.

SOUZA, J.L.M. *Modelo de análise de risco econômico aplicado ao planejamento de projetos de irrigação para cultura do caféiro*. 2001. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem)-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

SOUZA, J.L.M. *Manual da disciplina Programação de Dados Ambientais*. Curitiba: UFPR, 2004.

SOUZA, J.L.M. *Programa MORETTI - Módulo: Balanço hídrico climatológico decendial irrigacionista, Versão 2.0*, 2005a. Disponível em: <<http://www.moretti.agrarias.ufpr.br/>>. Acesso em: 4 mar. 2006.

SOUZA, J.L.M. *Programa MORETTI - Módulo: Distribuição de frequência e teste de aderência, Versão 2.0*, 2005b. Disponível em: <<http://www.moretti.agrarias.ufpr.br/>>. Acesso em: 4 mar. 2006.

SOUZA, J.L.M.; FRIZZONE, J.A. Modelo aplicado ao planejamento da cafeicultura irrigada: I. Simulação do balanço hídrico e do custo com água. *Acta Sci. Agron.*, Maringá, v. 25, n. 1, p. 103-112, 2003.

SOUZA, J.L.M.; FRIZZONE, J.A. Simulação do balanço hídrico para a cultura do caféiro nas regiões de Lavras e Uberlândia. *Sci. Agr.*, Curitiba, v. 8, n. 3, p. 291-302, 2007.

THORNTHWAITE, C.W. An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Review*, New York, v. 38, n. 1, p. 55-94, 1948.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. *The water balance*. Centerton: Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology, 1955. (Publications in Climatology, v. 8, n. 1).

TRENTIN, C.V. *Diagnóstico voltado ao planejamento do uso de águas residuárias para irrigação nos cinturões verdes da região metropolitana de Curitiba - PR*. 2005. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)-Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

Received on July 07, 2006.

Accepted on July 09, 2007.