

ADÃO WAGNER PÊGO EVANGELISTA

**METODOLOGIA PARA DIMENSIONAMENTO E
MANEJO DE SISTEMAS DE DRENAGEM AGRÍCOLA**

**VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2003**

ADÃO WAGNER PÊGO EVANGELISTA

**METODOLOGIA PARA DIMENSIONAMENTO E
MANEJO DE SISTEMAS DE DRENAGEM AGRÍCOLA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de “*Doctor Scientiae*”.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL

2003

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

E92m
2003

Evangelista, Adão Wagner Pêgo, 1966-
Metodologia para dimensionamento e manejo de sistemas de drenagem agrícola / Adão Wagner Pêgo Evangelista. – Viçosa : UFV, 2003.

102p. : il.

Orientador: Paulo Afonso Ferreira

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa

1. Drenagem - Simulação por computador. 2. Sistemas de drenagem - Balanço hídrico. 3. Sistemas de drenagem - Dimensionamento. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 19.ed. 631.62

CDD 20.ed. 631.62

ADÃO WAGNER PÊGO EVANGELISTA

**METODOLOGIA PARA DIMENSIONAMENTO E
MANEJO DE SISTEMAS DE DRENAGEM AGRÍCOLA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de “*Doctor Scientiae*”.

APROVADA: 26 de setembro de 2003.

Prof. Mauro Aparecido Martinez

Dr. José Geraldo Ferreira da Silva

Prof. Gilberto Chohaku Sedyama
(Conselheiro)

Prof. Fernando Falco Pruski
(Conselheiro)

Prof. Paulo Afonso Ferreira
(Orientador)

Não se pode ensinar tudo a alguém, pode-se apenas ajudá-la a encontrar por si mesmo.

Galileu Galilei

À minha querida esposa, Neuzeni; à minha filha Valéria e aos meus pais e irmãos, pelo estímulo, amizade, paciência, orientação e amor, dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo.

À Universidade Federal de Viçosa, por meio do Departamento de Engenharia Agrícola (DEA), pela oportunidade de realização do curso.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo apoio financeiro.

Ao professor Paulo Afonso Ferreira, pela orientação segura, pelo apoio e pelo incentivo na condução deste trabalho.

Aos professores conselheiros Fernando Falco Pruski e Gilberto C. Sedyama, pela colaboração e assistência durante os trabalhos.

Aos colegas do curso de pós-graduação, em especial ao Luiz Gonzaga, João Carlos, Édio, Felizardo, Ricardo e Solon, pelo apoio, amizade e companheirismo ao longo do curso.

Aos eternos amigos Roberto Vitarelli Andrade, Rosângela Alves Pinto Andrade, Maria Ester Vivas Carvalho e Isabel Costa.

Ao José Mauro, Edna, Marcos, Sr. Antônio, Chicão e a todos os técnicos e funcionários do DEA.

À minha família.

Enfim, a todos os amigos e colaboradores que, direta ou indiretamente, contribuíram para o sucesso deste trabalho.

BIOGRAFIA

ADÃO WAGNER PÊGO EVANGELISTA, filho de Geraldo Gomes Evangelista e Darci Pêgo Evangelista, nasceu em Teófilo Otoni, MG, em 24 de janeiro de 1966.

Em dezembro de 1989 diplomou-se em Engenharia Agrícola pela Escola Superior de Agricultura de Lavras, em Lavras, Minas Gerais.

Em outubro de 1990 foi contratado pela empresa PATRUMEC, como Engenheiro Agrícola Encarregado de Obras, para exercer atividades ligadas à drenagem de terras agrícolas.

Em outubro de 1993 foi contratado pela Mearim Agro-industrial S/A para atuar como Engenheiro Projetista e Consultor (irrigação e drenagem).

Em julho de 1997 iniciou o Curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, área de concentração em Irrigação e Drenagem, na Universidade Federal de Lavras, concluindo-o em agosto de 1999.

Em setembro 1999 iniciou o Doutorado em Engenharia Agrícola, área de concentração em Irrigação e Drenagem, na Universidade Federal de Viçosa.

CONTEÚDO

	Página
LISTA DE SÍMBOLOS	viii
RESUMO	xii
ABSTRACT	xiv
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. Modelos para avaliação do desempenho de sistemas de drenagem.....	4
2.2. Balanço de água no solo.....	6
2.2.1. Componentes do balanço hídrico	7
2.2.1.1. Precipitação.....	7
2.2.1.2. Infiltração da água no solo.....	9
2.2.1.3. Evapotranspiração.....	13
2.2.1.4. Drenagem profunda e ascensão capilar	14
2.2.1.5. Armazenamento de água no solo	15
2.3. Características do solo relacionadas com a drenagem.....	15
2.4. Índice de estresse de água no solo.....	16
2.5. Critérios de drenagem agrícola	17
2.6. Equações de drenagem agrícola.....	19

2.7. Análise de sensibilidade.....	20
3. MATERIAL E MÉTODOS	22
3.1. Desenvolvimento da metodologia.....	22
3.2. Base de dados climáticos	24
3.2.1. Precipitação total diária.....	25
3.2.2. Temperatura diária do ar	28
3.2.3. Radiação solar	28
3.2.4. Temperatura do ponto de orvalho	29
3.3. Balanço de água no solo.....	29
3.3.1. Infiltração da água no solo	29
3.3.1.1. Perfil de precipitação	30
3.3.2. Evapotranspiração de referência (ET_0)	32
3.3.3. Evapotranspiração da cultura (ET_c)	33
3.3.4. Fluxo ascendente máximo.....	33
3.3.4.1. Comparação entre fluxo ascendente máximo e a evapotranspiração real	35
3.4. Descrição do balanço hídrico na zona radicular	36
3.5. Posição diária do lençol freático	37
3.6. Soma do excesso de água (SEW_{30})	39
3.7. Programa computacional.....	40
3.8. Aplicação da metodologia.....	41
3.8.1 Base de dados.....	42
3.9. Análise de dados climáticos	45
3.10. Sensibilidade do modelo aos parâmetros de entrada	45
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	48
4.1. Apresentação do programa computacional	48
4.1.1. Telas para entrada de dados	48
4.1.1.1. Dados climáticos.....	49
4.1.1.2. Dados relativos ao solo.....	51
4.1.1.3. Dados relativos ao sistema de drenagem.....	53
4.1.1.4. Dados relativos à cultura	53

4.1.1.5. Resultados fornecidos pelo programa computacional.....	54
4.2. Dados climáticos sintéticos	56
4.2.1. Número de dias chuvosos	56
4.2.2. Probabilidades condicionais da cadeia de Markov	58
4.2.2.1. Probabilidade de um dia ser chuvoso, tendo sido o dia anterior chuvoso.....	58
4.2.2.2. Probabilidade de um dia ser chuvoso tendo sido o dia anterior seco	61
4.2.3. Precipitação total diária.....	63
4.2.4. Duração da precipitação, intensidade máxima de precipitação padronizada e tempo de ocorrência padronizado da intensidade máxima.....	65
4.2.5. Temperaturas máxima, mínima e do ponto de orvalho.....	69
4.2.6. Radiação solar e velocidade do vento	73
4.2.7. Considerações sobre o modelo CLIGEN	76
4.3. Avaliação da metodologia com vistas ao dimensionamento e ao manejo de culturas em áreas providas de sistemas de drenagem.....	76
4.3.1. Valores de precipitação e evapotranspiração de referência.....	77
4.3.2. Armazenamento de água na região radicular	78
4.3.3. Efeitos da evapotranspiração sobre o rebaixamento do lençol freático.....	81
4.3.4. Somatório do excesso de água no solo (SEW_{30}) e oscilações do lençol freático	83
4.3.5. Comparações entre dimensionamentos realizados com base na metodologia desenvolvida e aqueles com base na metodologia tradicional.....	86
4.4. Análise de sensibilidade.....	89
5. RESUMO E CONCLUSÕES	94
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97

LISTA DE SÍMBOLOS

- a, b, c e d = parâmetros da função dupla exponencial.
- A_k = frequência acumulada para o intervalo de classe, decimal
- Arm = armazenamento de água na zona radicular, mm.
- b_r = duração da recarga do lençol freático, d.
- CC_i = lâmina de água na zona radicular correspondente à capacidade de campo no dia “i”, mm.
- D_p = duração do evento de precipitação, h.
- D_d = distância vertical entre o plano que contém os drenos e a camada impermeável, m.
- deq = espessura do estrato equivalente de Hooghoudt, m.
- D_{ip} = tempo de ocorrência da intensidade máxima instantânea de precipitação, minutos.
- DP_n = desvio padrão da temperatura mínima mensal, °C.
- DP_{rs} = desvio padrão da radiação solar diária, $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$.
- DP_x = desvio padrão da temperatura máxima mensal, °C.
- e_a = pressão parcial de vapor, kPa.
- e_s = pressão de saturação de vapor, kPa.
- ET_0 = evapotranspiração de referência, $mm\ d^{-1}$.
- ET_c = evapotranspiração da cultura no dia “i”, mm.

f_a	= fluxo ascendente de água no solo, cm h^{-1} .
g	= coeficiente de assimetria da precipitação total diária, adimensional.
G	= fluxo de calor no solo, $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$.
h_{lf}	= altura do lençol freático sobre o plano que passa pelos drenos em resposta a uma dada recarga, m.
H_0	= carga hidráulica acima da superfície do solo, L.
h_f	= potencial matricial na frente de umedecimento, m.c.a..
I	= infiltração acumulada, mm.
$i(t)$	= intensidade de precipitação padronizada, decimal.
IS	= índice de sensibilidade do modelo aos parâmetros de entrada
I_1	= menor valor de entrada do modelo..
I_{12}	= média dos valores de entrada do modelo.
I_2	= maior valor de entrada do modelo.
i_b	= intensidade média de precipitação, mm h^{-1} .
i_p	= intensidade máxima instantânea de precipitação, mm h^{-1} .
i_p^*	= intensidade máxima de precipitação padronizada, adimensional.
IC	= intervalo de confiança da média.
J	= fator de armazenamento, d,
$K(h)$	= condutividade hidráulica do solo não saturado, em função do potencial matricial, m d^{-1} .
K_0	= condutividade hidráulica do solo saturado, m d^{-1} .
K_c	= coeficiente de cultura.
K_z	= condutividade hidráulica na zona de transmissão, L T^{-1} .
L	= espaçamento entre drenos, m.
m	= parâmetro da equação de van Genuchten, adimensional.
n	= número total de eventos de precipitação registrados na estação.
K	= número de classes.
R_1	= resultado obtido com o modelo para o menor valor de entrada.
O_{12}	= média dos resultados obtidos com o menor e o maior valores de entrada.
R_2	= resultado obtido com o modelo para o maior valor de entrada.
P	= precipitação total diária, mm.

$P(W/W)$	= probabilidade de ocorrência de dia chuvoso, tendo o dia anterior sido chuvoso, valor mensal.
$P(W/D)$	= probabilidade de ocorrência de dia chuvoso, tendo o dia anterior sido seco, valor mensal.
$P(D/W)$	= probabilidade de ocorrência de dia seco, tendo o dia anterior sido chuvoso, valor mensal.
$P(D/D)$	= probabilidade de ocorrência de dia chuvoso, tendo o dia anterior sido chuvoso, valor mensal.
P_{mo}	= perímetro molhado, m.
PM_i	= lâmina de água na zona radicular correspondente ao ponto de murcha permanente no dia “i”, mm.
r	= raio efetivo do tubo de drenagem, m.
rec	= recarga efetiva de intensidade constante, $m\ d^{-1}$.
R_h	= resistência hidráulica horizontal, m.
R_n	= saldo de radiação, $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$.
r_p	= intensidade máxima de precipitação, $mm\ h^{-1}$.
R_r	= resistência hidráulica radial, m.
R_s	= radiação solar, $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$.
\bar{R}_s	= radiação solar média mensal, $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$.
s	= declividade da curva de pressão de saturação de vapor, $kPa\ ^\circ C^{-1}$.
SEW_{30}	= somatório dos excedentes de água acima da profundidade de 30 cm, cm.d.
$t_{0,025}$	= valor de t crítico bilateral ao nível de 5,0%
t_{rec}	= período de tempo contado desde o início da recarga, d.
T	= temperatura média do ar, $^\circ C$.
T_n	= temperatura mínima do ar, $^\circ C$.
\bar{T}_{po}	= temperatura do ponto de orvalho média mensal, $^\circ C$.
\bar{T}_x	= temperatura média máxima mensal do ar, $^\circ C$.
\bar{T}_n	= temperatura média mínima mensal do ar, $^\circ C$.
t_p^*	= tempo padronizado de ocorrência da intensidade máxima de precipitação, adimensional.
T_{PO}	= temperatura do ponto de orvalho diária, $^\circ C$.

T_x	= temperatura máxima do ar, °C.
U_2	= velocidade média do vento a 2 m de altura, $m s^{-1}$.
x'	= variável normal padronizada, adimensional.
X_j	= profundidade média do lençol freático durante o dia j, cm.
z	= distância da frente de umedecimento a superfície do solo, L.
$\alpha_{0,5}$	= razão entre a precipitação máxima ocorrida em 30 minutos e a precipitação total diária, adimensional.
λ	= parâmetro empírico do modelo de van Genuchten, adimensional.
b	= parâmetro do modelo de van Genuchten com dimensão igual ao inverso da tensão, cm^{-1} .
μ_d	= porosidade drenável do solo, decimal.
θ_i	= umidade do solo no início do processo de infiltração, $m^3 m^{-3}$.
θ_s	= umidade do solo saturado, $m^3 m^{-3}$.
q_r	= umidade residual do solo, $m^3 m^{-3}$.
$q(h)$	= umidade em equilíbrio com o potencial matricial, $m^3 m^{-3}$.
h	= parâmetro da equação de van Genuchten, adimensional.

RESUMO

EVANGELISTA, Adão Wagner Pêgo, D.S., Universidade Federal de Viçosa, Setembro de 2003. **Metodologia para dimensionamento e manejo de sistemas de drenagem agrícola.** Orientador: Paulo Afonso Ferreira. Conselheiros: Gilberto Chohaku Sedyama e Fernando Falco Pruski.

As condições climáticas dos trópicos vêm despertando a necessidade do desenvolvimento de novas tecnologias, que contribuam para o aprimoramento dos métodos até então empregados no dimensionamento e manejo de sistemas de drenagem agrícola. Tendo em vista que as regiões brasileiras de clima úmido e subúmido incluem-se neste contexto, foi desenvolvida uma metodologia fundamentada no critério de drenagem conhecido como somatório dos excessos de água no solo acima de 30 cm (SEW_{30}), que se tem mostrado eficaz para estas condições climáticas. A metodologia proposta constou das seguintes etapas: geração de série sintética de precipitação, expandida, a partir de uma base de dados pluviográficos e pluviométricos, com o auxílio do programa CLIGEN - Climate Generator; geração de dados diários de evapotranspiração de referência, a partir de séries sintéticas de elementos meteorológicos, empregando, também, o programa CLIGEN; simulação da posição diária do lençol freático; e estimativa dos valores do SEW_{30} , ao longo do ciclo da cultura. O balanço de água na zona radicular foi realizado, considerando-se a fração da precipitação total diária, ou

de irrigação, infiltrada que, efetivamente, provoca a recarga do lençol freático, a evapotranspiração real diária e o fluxo ascendente máximo proveniente do lençol freático. Calculou-se a posição diária do lençol freático, em resposta às recargas efetivas, utilizando a equação de recarga intermitente de Krayjenhoff van Leur-Maasland, durante o período crítico de drenagem, para uma determinada profundidade dos drenos e coeficiente de armazenamento do solo. O efeito do espaçamento e profundidade dos drenos sobre a produtividade das culturas, para o período crítico de drenagem, foram caracterizados com base nos valores do SEW_{30} calculado a partir do hidrograma freático, gerado durante o período de desenvolvimento da cultura. Numa segunda etapa, o valor de SEW_{30} calculado foi comparado com os valores experimentais, determinados para a cultura e tipo de solo de várzea em questão. Quando os valores calculados de SEW_{30} não coincidem com os experimentais, um novo valor de espaçamento é testado, de forma iterativa, até obter uma diferença aceitável. Procurando facilitar o uso desta metodologia pelos usuários, foi desenvolvido um programa computacional, em linguagem Delphi, contendo telas de entrada e saída de dados. Os espaçamentos entre drenos obtidos pela aplicação da metodologia foram maiores do que àqueles resultantes da aplicação de critérios tradicionais de drenagem. As simulações realizadas com o modelo mostraram ser este bastante sensível aos parâmetros de entrada, apresentando alta sensibilidade à precipitação total diária, à profundidade de instalação dos drenos, à condutividade hidráulica do solo saturado e aos valores de evapotranspiração de referência. O modelo CLIGEN mostrou um bom desempenho em gerar os elementos climáticos.

ABSTRACT

EVANGELISTA, Adão Wagner Pêgo, D.S., Universidade Federal de Viçosa, September de 2003. **Methodology for design and management of agricultural drainage systems.** Adviser: Paulo Afonso Ferreira. Committee members: Gilberto Chohaku Sedyama e Fernando Falco Pruski.

The tropical climatic conditions are rousing a necessity for developing a new technology that contribute for the improvement of the methods still employed in design and management of agricultural drainage systems. Considering the Brazilian humid and subhumid climates regions it was developed a methodology well based on the drainage criteria known as the total amount of exceeding water on soil above 30 cm (SEW_{30}) that has showed efficient for those climate conditions. The proposed methodology was reported in the following stages: formation of synthetic series of precipitation, expanded from a basic part of pluviometer and pluviograph data with the support of CLIGEN program-CLIMATE GENERATOR; production of daily data of reference evapotranspiration , from synthetic series of meteorological elements, using CLIGEN program; simulation of daily position of water table and estimative value of SEW_{30} along cycle of culture. The water balance in the root zone was realized considering a fraction of total daily precipitation or irrigation, infiltrated, that effectively recharge the water table, actual daily

evapotranspiration and maximum upward flow from water table. The daily position of the water table, in response to a effective recharge, was calculated by using the equation of intermittent recharge of Krayjenhoff van Leur Maasland, during critical drainage period, to determine the depth of drains and storing coefficient. The effect of spacing and depth of drains on productivity of cultures for a critical period of drainage were characterized basing on the value of SEW_{30} calculated from the water table hydrogram during development period of the culture. In the second stage the calculated value of SEW_{30} was compared with the experimental value determined on the culture and soil type. When the calculated values of SEW_{30} do not match with the experimental values, a new value of spacing is tested in the iterative form until agreeable difference is obtained. To facilitate the use of this methodology for users, a new computational program was developed in Delphi Language with input and output data screen. The space between drains obtained through application of methodology was larger than that obtained by traditional criteria of drainage. Simulations accomplished with the model showed to be sufficient sensible to input parameters, showing high response to daily total precipitation, installation depth of drains, hydraulic conductivity of saturated soil and the reference evapotranspiration values. The CLIGEN model showed a good performance to generate the climatic elements.

1. INTRODUÇÃO

O objetivo principal da drenagem agrícola é criar um ambiente favorável ao crescimento das plantas e preservar as propriedades físicas e químicas do solo. A necessidade de drenagem varia de acordo com o clima da região. A drenagem é necessária, em regiões de clima úmido e subúmido, para eliminar o excesso de água na superfície e no perfil do solo e, em regiões de clima árido e semi-árido, para manter a concentração de sais na solução do solo em níveis toleráveis para as plantas (Ferreira, 2003).

Uma das maiores limitações aos projetos de drenagem agrícola implementados em regiões tropicais tem sido a ausência de metodologias confiáveis que representem os requerimentos de drenagem do solo para o desenvolvimento das diversas culturas sob condições locais.

Os projetos de drenagem agrícola que vêm sendo executados no Brasil nas últimas décadas são dimensionados por meio de metodologias tradicionais de drenagem, desenvolvidas para os Estados Unidos e Europa, onde as condições climáticas diferem bastante da brasileira. Assim, na maioria das vezes, a utilização dessas metodologias resulta na implementação de um projeto superdimensionado, o que inviabiliza sua execução quanto ao aspecto econômico. Por esta razão, o engenheiro menospreza o conhecimento teórico de

drenagem, preferindo basear-se em sua experiência prática a fim de tornar a execução do projeto economicamente, viável.

A limitada aplicação de procedimentos científicos no dimensionamento dos sistemas de drenagem pode ser atribuída a vários fatores. Entre eles, a complexibilidade das relações entre a produtividade das culturas e o potencial de água no solo; a dificuldade em prever a distribuição da água no perfil do solo em relação à intensidade de drenagem; o custo das investigações de campo, necessárias a um dimensionamento mais racional (Bower, 1974), dentre outros.

As principais fontes que contribuem para o excesso de água no solo são as precipitações e as infiltrações provenientes de canais de irrigação e represas. Em regiões de clima árido e semi-árido, comumente, a principal fonte causadora do excesso de água no solo é a irrigação, enquanto em regiões de clima úmido e subúmido é a precipitação (Bernardo, 1995).

Para relacionar o excesso de água no solo à movimentação do lençol freático, alguns métodos foram desenvolvidos com o objetivo de avaliar a dinâmica da água no solo, bem como relacioná-la aos aspectos climáticos, aos parâmetros físico-hídricos do solo e da cultura e aos parâmetros geométricos do sistema de drenagem. Esses métodos são importantes ao dimensionamento e implantação de projetos eficientes de drenagem (Sabbagh et al., 1993).

Nos últimos anos, mediante o desenvolvimento acelerado dos recursos computacionais, foi possível construir modelos baseados nas teorias de drenagem agrícola, a fim de simular a movimentação do lençol freático e o escoamento subterrâneo e superficial em função dos elementos climáticos, das características do solo e do sistema de drenagem. Dentre esses modelos, merecem destaque: DRAINMOD (Skaggs, 1981), SWATREN (Workman & Skaggs, 1989), SIMDRENO (Duarte, 1997), SISDRENA (Miranda, 1997) e o PRODREN (Borges Júnior, 2000).

Tendo em vista a necessidade de desenvolver, para as condições de clima subúmido e úmido das regiões tropicais, metodologias em drenagem agrícola compatíveis com o clima, solos e culturas dessas regiões, este trabalho teve como objetivos:

- desenvolver uma metodologia para dimensionamento e manejo de sistemas de drenagem agrícola, fundamentada no balanço hídrico diário e nos tipos de solo e cultura;
- comparar os espaçamentos de drenos, calculados pela metodologia desenvolvida com aqueles resultantes da aplicação da metodologia tradicional;
- avaliar o desempenho do modelo CLIGEN em gerar os principais dados climáticos de entrada para a metodologia; e
- realizar análise de sensibilidade do modelo aos parâmetros de entrada.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Modelos para avaliação do desempenho de sistemas de drenagem

Considerando o grande número de variáveis que envolvem e dificultam a avaliação de um sistema de drenagem agrícola em diferentes situações, a utilização de modelos torna-se desejável, pois proporciona rapidez para a análise dos resultados, além de permitir que um grande número de fatores e efeitos sejam contabilizados. A modelagem assume um papel importante, pois permite ao projetista prever o desempenho e propor a otimização de sistemas de drenagem agrícola. Este desempenho resulta da complexa interação existente entre as condições de clima, solo, planta e do próprio sistema.

Os fundamentos do dimensionamento de sistemas de drenagem subterrânea, que possibilitam antever o desempenho destes e motivaram a estruturação de modelos de simulação, foram aplicados, pela primeira vez, por Shilfgaarde (1965). Esses modelos fundamentam-se no balanço hídrico, realizado ao longo da região onde situa-se o sistema radicular e no cálculo da fração da lâmina precipitada que infiltra no solo e que, efetivamente, constitui recarga do lençol freático. Após realizar a simulação, o modelo calcula o número de dias em que o lençol freático permanece acima de uma determinada profundidade. A eficácia dessas simulações incentivou novas linhas de pesquisa voltadas para o

desenvolvimento de metodologias de dimensionamento baseadas em simulação a partir de séries de dados climáticos, propriedades do solo e equações de drenagem de recarga intermitente (Shilfgaarde, 1974).

Em 1978, na Universidade do Estado da Carolina do Norte, EUA, foi desenvolvido um modelo computacional denominado DRAINMOD, com o objetivo de projetar e avaliar sistemas de drenagem agrícola e relacionar os efeitos da deficiência da drenagem sobre as culturas e propriedades do solo. O modelo caracteriza a resposta do regime de água no solo a várias combinações de manejo de águas superficiais e subterrâneas, e estima a movimentação do lençol freático e a variação da umidade na região não-saturada do solo em resposta aos dados de precipitação, evapotranspiração, drenagem superficial e subterrânea e ao uso de práticas de controle do lençol freático ou subirrigação (Skaggs, 1981).

Outro modelo, denominado SWATREN, foi desenvolvido com base na solução da equação de Richards por diferenças finitas para calcular o movimento vertical da água na região não-saturada do solo. O modelo requer dados de precipitação, evaporação e transpiração potenciais em períodos de 24 horas. A profundidade radicular, que pode ser variável com o tempo, é um dado de entrada do modelo. O sistema solo pode ser dividido em várias camadas, sendo a curva de retenção da água no solo e a função condutividade hidráulica, para cada camada, são também dados de entrada (Workman & Skaggs, 1989).

Duarte (1997) desenvolveu um modelo computacional denominado SIMDRENO, que simula a posição do lençol freático e a umidade do solo na zona radicular a partir de séries históricas de dados diários de precipitação, evapotranspiração, parâmetros físico-hídricos do solo, cultura e geometria do sistema de drenagem. O modelo estima a fração de precipitação que esco superficialmente empregando o método do número da curva, calcula a posição do lençol freático e estima a umidade do solo na zona radicular, com base no balanço hídrico. Por meio de valores experimentais que expressam a sensibilidade das culturas ao excesso e à falta de umidade no solo, o modelo estima a produtividade relativa esperada, realiza uma análise econômica e informa qual o sistema de drenagem mais viável para a situação.

O modelo SISDRENA, desenvolvido por Miranda (1997), com base em séries históricas de dados diários de precipitação e evapotranspiração potencial, características físico-hídricas do solo, dados de sensibilidade da cultura ao excesso de água, profundidade do sistema radicular e características do sistema de drenagem, permite simular a posição do lençol freático, a evapotranspiração real e o armazenamento da água na zona radicular, contabilizando ou não o escoamento superficial. O escoamento superficial é estimado por uma modificação do método do número da curva que considera a porosidade drenável do solo e a profundidade do lençol freático. A posição do lençol freático é estimada pela equação de Zeeuw e Helinga. O modelo calcula as produtividades relativas esperadas devido ao excesso ou déficit de umidade no solo, as quais permitem uma avaliação do comportamento da cultura ao longo do seu ciclo e estima a produtividade relativa anual. Estas estimativas permitem determinar, realizando-se uma análise econômica, o melhor espaçamento entre drenos.

Borges Júnior (2000) visando suprir lacunas em relação aos modelos DRAINMOD e SIMDRENO, principalmente no que tange à disponibilidade de dados de entrada no Brasil e à facilidade na comunicação com o usuário, desenvolveu um modelo computacional denominado PRODREN. O modelo simula a posição do lençol freático contabilizando diariamente os principais componentes do balanço hídrico em um volume de controle de base unitária, situado à meia distância entre dois drenos paralelos. Os principais dados de saída do modelo são a posição diária do lençol freático acima da linha dos drenos, o escoamento superficial, a produtividade relativa da cultura, considerando os efeitos do excesso e da deficiência de água no solo e o valor presente, que é o parâmetro resultante da análise econômica do sistema de drenagem.

2.2. Balanço de água no solo

Balanço de água no solo é a contabilidade das quantidades de água que entram e saem de um volume de solo, limitado acima pela superfície do solo e abaixo pelo plano localizado, normalmente, imediatamente abaixo do sistema

radicular da cultura. Na superfície do solo ocorrem as adições de água por precipitação pluvial ou irrigação e as perdas por evapotranspiração e escoamento superficial. No plano localizado abaixo da zona radicular ocorrem as perdas por drenagem profunda e ganhos por ascensão capilar da água proveniente do lençol freático. A contabilidade de todos estes componentes do balanço reflete a quantidade de água que fica retida no solo, isto é, seu armazenamento. Quando as perdas são maiores que os ganhos, o armazenamento diminui e, em caso contrário, aumenta. O balanço hídrico é, portanto, importante para um acompanhamento da quantidade de água armazenada no solo. Esta quantidade deve ser mantida em níveis adequados para otimizar a produtividade agrícola. Assim, por meio do balanço de água, é possível o estabelecimento de critérios para drenagem de um solo, no caso de excesso de água, ou para a irrigação no caso de déficit de água (Reichardt, 1996).

O suprimento de água ao solo é realizado, primordialmente, pela precipitação e irrigação. O solo, recebendo água, aos poucos vai tendo os seus poros preenchidos. Em relação à precipitação pluvial, da lâmina que atinge a superfície do solo, a fração que infiltra depende da intensidade e da duração da chuva. Além da intensidade e duração da chuva, a água armazenada no perfil do solo depende da textura, da profundidade da camada impermeável e da inclinação da superfície.

2.2.1. Componentes do balanço hídrico

2.2.1.1. Precipitação

As precipitações podem ser classificadas de acordo com as condições que promovem o movimento vertical do ar e, nesse sentido, existem três tipos principais: frontal, orográfica e convectiva.

O processo de formação das precipitações frontais é proporcionado pelo deslocamento vertical de uma massa de ar de densidade diferente de outra que se encontra em deslocamento horizontal. Normalmente, ocasionam chuvas de baixa intensidade e longa duração, abrangendo grandes áreas; entretanto, em condições

particulares, podem também originar eventos de grande intensidade e curta duração.

As precipitações orográficas ocorrem devido às condições da topografia local, sendo que as massas de ar úmidas sofrem uma ascensão forçada sobre as grandes elevações, como ocorre nas regiões montanhosas. No Brasil, este tipo de precipitação é mais comum nas regiões costeiras, proporcionando chuvas com intensidades variando geralmente de baixa a moderada.

As precipitações convectivas são típicas de regiões tropicais. A sua formação se dá por meio do aquecimento desigual da superfície terrestre e pela ascensão brusca do ar menos denso. Essas precipitações caracterizam-se pela alta intensidade e curta duração e normalmente se concentram em pequenas bacias (Villela & Mattos, 1975).

A precipitação é o principal fator para a recarga dos aquíferos. Por isso, em projetos de drenagem agrícola, é muito importante conhecer suas características (Pizarro, 1985).

Segundo Tucci (2000) as principais características da precipitação são o seu total, a sua duração e distribuições temporal e espacial. O total precipitado não tem significado se não estiver ligado à duração. A ocorrência da precipitação é um processo aleatório que não permite uma previsão determinística com grande antecedência, sendo o tratamento dos dados de precipitação, para a maioria dos problemas hidrológicos e agrônômicos, estatístico.

Dados de precipitação e outros elementos climáticos podem ser estimados utilizando-se geradores climáticos. Os geradores climáticos são modelos matemáticos que simulam a ocorrência de elementos climáticos e têm por objetivo a geração de um conjunto de dados com as mesmas características estatísticas da série histórica.

Na década de 1990, o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) desenvolveu um modelo gerador de dados climáticos, denominado CLIGEN, capaz de produzir séries sintéticas de elementos climáticos para uso no GLEAMS (Leonard et al., 1987) e WEPP (Nicks et al., 1995), modelos estes destinados ao estudo de erosão e movimento da água no solo.

O modelo CLIGEN gera dados diários de temperaturas máxima e mínima do ar, radiação solar, direção e velocidade do vento e temperatura do ponto de orvalho, além dos dados relacionados às características da precipitação, ou seja, o total diário precipitado, a duração da precipitação, a intensidade máxima de precipitação e o tempo no qual ela ocorre.

As características das chuvas de uma dada região podem determinar a maior parte dos efeitos que elas produzem. A variação da intensidade, durante a chuva, é uma dessas importantes características; entretanto, pouco se sabe sobre os padrões de chuva que ocorrem no Brasil.

Alguns modelos buscam representar os padrões de chuvas por meio do perfil da precipitação. O CLIGEN utiliza um modelo baseado na função dupla exponencial para representar os padrões de chuvas que ocorrem em uma determinada região. A função dupla exponencial consiste numa função exponencial crescente do início do evento até o momento em que ocorre a intensidade de precipitação máxima e, a partir deste momento, uma outra função exponencial decrescente descreve o comportamento do perfil até o fim do evento (Nicks et al., 1995).

Diversos pesquisadores (Yu, 2000; Flanagan et al., 2001; Scheele et al., 2001) encontraram erros no código fonte da versão 4.2 do programa CLIGEN. Esses erros são referentes à inconsistência de unidades do parâmetro $R_{0,5}$ (razão entre a lâmina máxima precipitada em 30 minutos ($R_{0,5}$) e a precipitação total diária (R)); à metodologia utilizada para determinação do valor de $R_{0,5}$; ao cálculo da duração dos eventos e à conversão dos dados de precipitações originais da estação para o ambiente do software. Esses erros foram corrigidos na versão 5.0 do programa (Yu, 2000; Flanagan et al., 2001) e, segundo os autores, as modificações propostas contribuíram consideravelmente para melhorar o desempenho do modelo.

2.2.1.2. Infiltração da água no solo

Infiltração é a passagem de água no solo através da interface atmosfera-solo (Libardi, 1995). Segundo Bernardo (1995), a taxa de infiltração é alta no

início e vai diminuindo gradativamente, até um valor quase constante. Neste momento em que a variação da taxa de infiltração é muito pequena, ela é chamada de infiltração final ou taxa de infiltração mínima.

São vários os fatores que afetam a taxa de infiltração da água no solo. Dentre eles destacam-se as condições da superfície, o teor inicial de água, o tempo de infiltração, o tipo de preparo, a presença de ar aprisionado nos poros, a viscosidade e a temperatura da água nele existente, a topografia do terreno e as propriedades físicas (Bernardo, 1995; Hillel, 1970). De acordo com estes autores, o teor de água é a principal variável que afeta a taxa de infiltração inicial da água.

Caracterizar todas as variáveis que influenciam a infiltração da água no solo é um processo demorado e difícil. A intensidade com que algumas variáveis a afetam ainda não é bem definida e, sendo assim, diversas equações têm sido propostas visando simplificar o seu estudo.

Segundo Skogerboe e Walker (1987) muitos modelos matemáticos têm sido desenvolvidos para descrever o escoamento em meios porosos, particularmente a taxa de infiltração. De acordo os mesmos autores, as equações de infiltração podem ser agrupadas em três categorias:

- equações baseadas em relações gerais para escoamento em meios porosos;
- equações fundamentadas na suposição de um modelo simplificado (equações fundamentadas fisicamente); e
- equações ajustadas a dados de campo (equações empíricas).

Na primeira categoria têm-se as equações baseadas na equação de Richards. Ela faz a suposição de que o potencial total da água no solo é igual à soma dos potenciais gravitacional e matricial. Como resultado, tem-se a equação na forma:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(\theta) \left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) \right) \quad (1)$$

em que

- $\theta =$ umidade volumétrica, $L^3 L^{-3}$;
- $h =$ carga total de pressão, L;
- $K =$ condutividade hidráulica, $L T^{-1}$; e
- $z =$ distância vertical, L.

Não é fácil resolver equações desta primeira categoria usando métodos analíticos, sendo necessário recorrer a métodos numéricos.

As equações da segunda categoria podem ser derivadas da equação de Green e Ampt. Esta equação fundamenta-se na suposição de que o solo pode ser representado por um feixe de tubos capilares, dada por:

$$TI = K_z \left(1 + \frac{h_f (\theta_s - \theta_i)}{Z} \right) \quad (2)$$

em que

- $TI =$ taxa de infiltração, $L T^{-1}$;
- $K_z =$ condutividade hidráulica do solo saturado, $L T^{-1}$;
- $h_f =$ potencial matricial na frente de umedecimento, L;
- $\theta_s =$ umidade de saturação, $L^3 L^{-3}$;
- $\theta_i =$ umidade inicial, $L^3 L^{-3}$; e
- $z =$ profundidade da frente de umedecimento, L.

2.2.1.2.1. Equação de Green-Ampt modificada por Mein e Larson

Mein e Larson (1973) modificaram a equação de Green-Ampt para a sua aplicação em condições anteriores ao empoçamento e esta nova equação foi denominada equação de Green-Ampt modificada por Mein e Larson ou GAML, dada por:

$$TI = K_z \left[1 + \frac{h_f (\theta_s - \theta_i)}{I} \right] \quad (3)$$

Embora Mein e Larson (1973) tenham utilizado condições diferentes na derivação do modelo de infiltração, eles obtiveram uma equação idêntica àquela original, proposta por Green-Ampt. Na realidade, a equação 3 é simplesmente a equação de Green-Ampt com a escala de tempo trasladada para considerar a infiltração antes do empoçamento.

A equação original de Green-Ampt foi derivada considerando que a região acima da frente de umedecimento encontra-se saturada. Entretanto, diversos pesquisadores (Onstad et al., 1973; Slack, 1980; Zirbel et al., 1982) constataram que, no campo, a umidade de saturação não é atingida e sugerem, assim, utilizar valores menores para a umidade da zona de transmissão (θ_z) e também para a condutividade hidráulica (K_z) dessa região.

Slack (1980) constatou que θ_z varia de 0,8 (solo de textura arenosa) a $0,9\theta_s$ (solo de textura argilosa). Ele utilizou $0,9\theta_s$ para representar a infiltração em condições de irrigação. Brakensiek e Onstad (1977) obtiveram valores variando entre $0,85\theta_s$ e θ_s e Zirbel et al. (1982) constataram que θ_z varia de $0,79\theta_s$ para solo arenoso a $0,84\theta_z$ para solo argiloso.

Cecílio (2002) avaliou diversas proposições existentes na literatura para adequação dos parâmetros de entrada (θ_z , K_z e h_f) do modelo de Green-Ampt às condições reais de ocorrência da infiltração. O trabalho mostra que valores de θ_z variando entre $0,81\theta_s$ e $0,86\theta_s$ apresentaram os melhores resultados para o solo estudado. As proposições que melhor se adaptaram aos dados experimentais foram: K_z igual a $0,5K_0$ associado a um potencial matricial igual a $h_f(\theta_i)$; K_z igual a K_0 associado a h_f igual à média entre $h_f(\theta_s)$ e $h_f(\theta_i)$; e K_z igual a TIB (taxa de infiltração básica) associado a h_f calculado com base na textura e porosidade do solo.

Moore e Eigel (1981) utilizaram a equação de GAML para estimar a infiltração em um solo estratificado. Os resultados obtidos utilizando a equação de GAML foram comparados a dados observados em campo e a valores simulados a partir da solução numérica da equação de Richards. Em face dos resultados, os autores concluíram que a equação de Green-Ampt pode ser utilizada em condições de solo estratificado.

A terceira categoria (equações empíricas) é o resultado do ajustamento aos dados observados, como funções explícitas, dependentes do tempo (t). As constantes destas equações não têm significado físico. Dentre essas equações, tem-se o modelo empírico, proposto por Kostiakov, que tem a forma:

$$I = kt^\alpha \quad (4)$$

em que I é a infiltração acumulada e k e α são constantes que dependem do solo e das condições iniciais.

2.2.1.3. Evapotranspiração

A evaporação e a transpiração são processos físicos semelhantes. A evaporação é definida como o processo físico de mudança de estado líquido para gasoso. Segundo Matzenauer et al. (1991) a intensidade de evaporação da água do solo está condicionada à quantidade de energia e à velocidade do vento, interagindo com o tipo de solo, profundidade do lençol freático e cobertura vegetal. O processo de evaporação da água que passa através da planta é chamado de transpiração. Os vegetais, através de suas raízes, absorvem a água do solo necessária às suas atividades vitais, restituindo a maior parte dela à atmosfera em forma de vapor.

Culturas de clima tropical são, freqüentemente, cultivadas durante o ano todo, especialmente na estação chuvosa. Assim, a época de plantio deve ser criteriosamente planejada para coincidir com a estação chuvosa, possibilitando que as culturas se beneficiem das chuvas durante seu ciclo fenológico. Durante o verão, a evapotranspiração é alta, contribuindo para evitar a ocorrência de excesso de água no solo e a conseqüente elevação do lençol freático (Smedema & Rycroft, 1983).

Segundo Upadhyaya e Chauhan (2000), o efeito da evapotranspiração no rebaixamento do lençol freático, em regiões úmidas, deve ser considerado no dimensionamento de sistemas de drenagem agrícola, por proporcionar um aumento expressivo no espaçamento entre os drenos. Os autores relatam um

aumento de aproximadamente 13,75% no espaçamento entre os drenos, quando o solo possui condutividade hidráulica de 3 m d^{-1} e a evapotranspiração é 8 mm d^{-1} .

A evapotranspiração de referência (ET_0) pode ser determinada de diferentes maneiras. De acordo com Burman et al. (1983), ela pode ser obtida a partir de medidas diretas ou estimada a partir de elementos climáticos, utilizando-se modelos ou métodos empíricos. O método direto de medições baseia-se no balanço de água no solo, obtido por meio de diferentes tipos de lisímetros; o segundo caso compreende modelos como os de Penman, Thornthwaite, Blaney e Criddle, Jensen e Haise, Priestley e Taylor, Hargreaves, dentre outros.

Segundo Pereira et al. (1997), em reunião realizada em 1990 com a presença de mais de 14 especialistas em evapotranspiração, a FAO decidiu rever o "Irrigation and Drainage - paper 24", preparado por Doorenbos e Pruitt (1977). Numa primeira etapa, a nova proposta da FAO consiste na adoção do modelo de Penman-Monteith, como método-padrão para estimativa da evapotranspiração de referência.

2.2.1.4. Drenagem profunda e ascensão capilar

Dependendo do valor do potencial total da água no limite inferior da camada de solo considerada no balanço hídrico, o fluxo pode ser ascendente ou descendente. Quando o potencial total da água no limite inferior da camada de solo considerada no balanço é menor que o potencial total das camadas de solo superiores, a água movimenta-se verticalmente para baixo, deixando a camada de solo considerada no balanço hídrico. Quando o inverso ocorre, ou seja, quando o potencial total da água no solo no limite inferior da camada de solo considerada no balanço hídrico é maior que o potencial total das camadas de solo superiores, a água movimenta-se verticalmente para cima. Neste caso, trata-se de um fluxo de água de baixo para cima, denominado de ascensão capilar, decorrente da inversão do gradiente hidráulico. Quando o lençol freático encontra-se próximo à superfície do solo, a contribuição da ascensão capilar pode ser significativa (Reichardt, 1996).

2.2.1.5. Armazenamento de água no solo

O armazenamento de água no solo corresponde à massa d'água que o solo retém ou armazena, contra a ação gravitacional, num dado instante (Bernardo, 1995).

A água armazenada no solo resulta do equilíbrio entre as saída (perdas) e as entradas (ganhos) na rizosfera, podendo variar segundo o tipo de solo e a profundidade da rizosfera. Como o solo raramente é homogêneo em toda sua profundidade, sua capacidade de armazenamento é a soma do armazenamento nas diferentes camadas que o compõem (Doorenbos e Pruitt, 1977).

2.3. Características do solo relacionadas com a drenagem

A caracterização das propriedades físicas do solo é muito importante no dimensionamento de um sistema de drenagem agrícola. Dentre essas propriedades, as mais importantes são a condutividade hidráulica do solo saturado (K_0) e a porosidade drenável (μ_d). A condutividade hidráulica é necessária para o cálculo do espaçamento entre drenos, tanto em regime de escoamento permanente quanto variável. A porosidade drenável é imprescindível no cálculo do espaçamento quando a equação usada é de regime de escoamento variável (Pizarro, 1985).

Segundo Ferreira (2003) a condutividade hidráulica do solo, sob determinado conteúdo de água, é o quociente entre o fluxo de água através do solo e o gradiente hidráulico e, fisicamente, representa a capacidade do solo em permitir a passagem da água pelo seu perfil. Qualitativamente, a condutividade hidráulica é importante para caracterizar os meios porosos em permeáveis ou condutivos, semipermeáveis e pouco permeáveis, quando seus valores resultam altos, médios e baixos, respectivamente.

Porosidade drenável ou porosidade efetiva é o volume de poros drenados por unidade de volume de um solo previamente saturado, quando o teor de água no solo decresce de saturado, potencial matricial zero, para um teor de água em

equilíbrio com um potencial matricial, h_m , de $-0,60$ a $-1,00$ m.c.a. (Ferreira, 2003).

2.4. Índice de estresse de água no solo

A complexibilidade das relações envolvendo produtividade das culturas e conteúdo de água no solo não é bem entendida, constituindo-se um empecilho ao estabelecer critérios de drenagem agrícola (Bower, 1974).

Segundo Cox e McFarlane (1995), Sieben, em 1964, introduziu o conceito de SEW_p (somatório dos excedentes de água acima da profundidade p), para determinar os efeitos da flutuação do lençol freático sobre culturas de cereais, durante a estação de inverno. O SEW_p é definido pela área entre a hidrógrafa do lençol freático e o plano que representa a profundidade crítica (p), que segundo Wesseling (1974), Sieben considerou como sendo de 30 cm e passou a utilizar a sigla SEW₃₀.

Segundo Bengtson et al. (1984), Sieben observou que a produção da maioria das culturas começa a decrescer quando os valores de SEW₃₀ encontram-se entre 100 a 200 cm.d.

Carter e Camp (1994) constataram que a ocorrência de valores de SEW₃₀ acima de 242 cm.d durante o período de repouso vegetativo da cana-de-açúcar pode ser considerada uma indicação de problemas de aeração do solo e, conseqüentemente, de necessidade de drenagem. Valores de SEW₃₀ abaixo de 200 cm.d, durante o ciclo vegetativo da cultura do milho, geralmente podem ser considerados aceitáveis (Skaggs, 1981).

Vildoso (1995) verificou que a produtividade máxima da cultura da cenoura foi de $69,3 \text{ t ha}^{-1}$, obtida para um valor de SEW₃₀ estimado de 122,45 cm.d. A partir deste valor qualquer incremento nos valores do SEW₃₀ provocará queda da produção.

A importância e necessidade de estudos concernentes à influência das condições de excesso de água no solo sobre a produtividade das culturas são enfatizadas por vários autores como subsídio fundamental para o manejo do

sistema solo-água-plantas, especialmente em projetos de drenagem agrícola (Gayle et al., 1987; Shirmohammadi et al., 1991; Carter & Camp, 1994; Vildoso, 1995; Costa & Cruciani, 1998; Figueiredo, 2002).

2.5. Critérios de drenagem agrícola

Segundo Ferreira (2003), os critérios de drenagem são estabelecidos com o objetivo de capacitar o sistema de drenagem a realizar as seguintes funções:

- promover aeração adequada na zona radicular;
- permitir o tráfego de máquinas e equipamentos agrícolas na área logo após um prolongado período de chuvas;
- prevenir a deterioração da estrutura do solo; e
- promover ambiente adequado aos processos biológicos, microbiológicos e bioquímicos, especialmente aqueles relacionados à disponibilidade de oxigênio e nitrogênio para as plantas.

O critério de drenagem geralmente expressa as exigências integradas baseadas em um ou mais destes objetivos, embora o peso dado aos objetivos individuais variem de caso para caso (Smedema e Rycroft, 1983).

A metodologia normalmente empregada para o cálculo do espaçamento entre drenos depende, entre outros fatores, da taxa de remoção de água no solo (coeficiente de drenagem - q_d), da profundidade mínima do lençol freático, da permeabilidade do solo e da profundidade do perfil do solo a ser drenado. As equações desenvolvidas para este fim, a partir daquela originalmente proposta por Hooghoudt, na Holanda, envolvem esses parâmetros e são aplicadas em condições em que as hipóteses de escoamento permanente sejam aceitáveis. Nesse caso, a relação entre o coeficiente de drenagem (q_d) e a altura do lençol freático (h_{lf}) acima dos drenos à distância média entre dois drenos paralelos constitui o critério de drenagem para regime de escoamento permanente (Cruciani, 1989).

Em regiões com clima tropical, onde os padrões de precipitação são caracterizados por chuvas de alta intensidade e curta duração, como ocorre em quase toda totalidade do território brasileiro, normalmente em áreas com deficiência de drenagem, o lençol freático eleva-se com frequência até a superfície do solo. Neste caso, os critérios de drenagem devem ser formulados em termos da velocidade de descida do lençol freático, após uma recarga motivada por chuva ou irrigação. Um critério normalmente utilizado nos Estados Unidos para este caso estabelece que o lençol freático deve descer da superfície do solo até a profundidade de 30 e 50 cm, em 24 e 48 horas, respectivamente (Ulzurrún et. al., 1978).

Pizarro (1985) apresenta critérios de drenagem para o regime de escoamento variável para períodos chuvoso e de irrigação. O critério de drenagem para período chuvoso estabelece que, em consequência da ocorrência de uma lâmina de chuva superior àquela provável de ocorrer em média cinco vezes ao ano, o lençol freático eleva-se até atingir uma profundidade $p \geq 0$. Cessada a precipitação, o lençol freático começa a descer com o tempo, até atingir uma profundidade adequada a cada tipo de cultura. Para período de irrigação, o critério de drenagem estabelece que N dias após a irrigação, o lençol freático deve atingir uma profundidade p.

O critério de drenagem proposto por Cruciani (1989) para regime de escoamento variável baseia-se numa lâmina de precipitação de 24 horas com um período de retorno de cinco anos.

Por meio das equações de drenagem em regime de escoamento variável, que descrevem a movimentação do lençol freático e de séries históricas de dados diários de chuvas, é possível calcular hidrógrafas do lençol freático. Essas hidrógrafas mostram a frequência com a qual o lençol freático eleva-se acima de uma dada profundidade durante o ciclo fenológico das culturas e as correspondentes descargas produzidas nos drenos (Smedema e Rycroft, 1983).

De acordo com Ferreira (2003), o critério de drenagem é dependente da porosidade drenável (μ_d) e da profundidade dos drenos (P_d). Isto ocorre em razão da influência destes parâmetros no armazenamento de água no solo. Durante o período de estiagem, o lençol freático desce, podendo chegar ao nível dos drenos

(P_d) e, eventualmente, ir abaixo deles. Se o valor da P_d é alto, o lençol estará, em média, mais profundo quando ocorrer a próxima chuva e, conseqüentemente, maior será o armazenamento de água no perfil do solo sem que o lençol freático se eleve a uma profundidade prejudicial à cultura, além de reduzir a descarga nos drenos.

O fato de o lençol freático elevar menos quando μ_d aumenta explica a razão pela qual os valores de q_d diminuem quando μ_d é aumentada. Contudo, o contrário não se aplica, ou seja, embora o lençol freático suba rapidamente quando o valor de μ_d é baixo (< 5%), ele também desce rapidamente quando a μ_d assume valores baixos, sem que o valor da descarga q_d tenha, necessariamente, que aumentar (Smedema e Rycroft, 1983).

2.6. Equações de drenagem agrícola

Do ponto de vista hidrológico, o dimensionamento do sistema de drenagem do solo consiste em determinar a relação entre o espaçamento e a profundidade dos drenos laterais, de modo que o sistema satisfaça a um determinado critério de drenagem. Para determinação da relação entre profundidade e o espaçamento dos drenos empregam-se equações de drenagem considerando as características hidrodinâmicas e geométricas do perfil do solo, as características das plantas, os critérios de drenagem e o regime de escoamento (Ferreira, 2003).

Quando a descarga do sistema iguala-se à recarga do lençol freático, o balanço de água na região saturada é zero e a posição do lençol freático não varia com o tempo. A essa condição denomina-se regime permanente. Quando a descarga difere da recarga, o balanço não é zero e o lençol freático flutua, sendo a carga hidráulica função da posição e do tempo. Essa condição corresponde ao regime variável (Beltran, 1986).

Segundo Ferreira (2003), conforme o regime de escoamento, as equações de drenagem podem ser agrupadas em:

- equações de drenagem para o regime de escoamento permanente ou equações de equilíbrio; e
- equações de drenagem para o regime de escoamento variável ou não equilíbrio.

As equações de regime permanente não são adequadas para o dimensionamento de sistemas de drenagem, em regiões onde os padrões de precipitação são caracterizados por chuvas de alta intensidade e curta duração, como é o caso da quase totalidade do território brasileiro. O estabelecimento de critérios torna-se difícil, em face da heterogeneidade das precipitações. As equações de drenagem para o regime variável são especialmente indicadas para o dimensionamento de sistemas de drenagem em áreas irrigadas e regiões onde as chuvas predominantes são de alta intensidade e pequena duração (Ferreira, 2003).

As equações de drenagem de regime permanente mais usadas são as de Donnam, Hooghoudt, Ernest e Kirkham, e, para regime variável, as de Glover-Dumm e Boussinesq (Beltran, 1986).

A variação no nível do lençol freático pode ser determinada utilizando-se equações de recarga intermitente. Na literatura, as mais citadas são: de van Schilfgaard (Armstrong et al., 1980), de Krayjenhoff van Leur (Pizarro, 1985) e de Zeeuw e Hellinga (Smedema & Raycroft, 1983). De acordo com Duarte (1997), a equação de Krayjenhoff van Leur apresenta um melhor desempenho na simulação da profundidade do lençol freático em comparação com as equações de Zeeuw e Hellinga e de Schilfgaard.

2.7. Análise de sensibilidade

Estudos de sensibilidade permitem verificar se um modelo produz resultados lógicos em função de alterações nos parâmetros de entrada. Resultados desses estudos fornecem informações sobre o comportamento do modelo e, também, sobre falhas na metodologia utilizada no desenvolvimento do modelo e na sua aplicabilidade a diferentes cenários e escalas (Gowda et al., 1999).

Segundo Goldenfum (1991), para modelos simples é possível obter expressões das saídas em função dos dados de entrada, expressando a sensibilidade do modelo como funções explícitas. No entanto, à medida que os modelos se tornam mais complexos, a sensibilidade é expressa mais facilmente na forma de mudanças relativas, gráficos e tabelas, em vez de funções. O autor afirma que essa análise auxilia o usuário a determinar quais parâmetros devem ser estimados com precisão e quais não requerem grande precisão em suas estimativas.

Borges Júnior (2000) realizou a análise de sensibilidade do modelo PRODREN aos seus parâmetros de entrada. Os resultados mostraram que os parâmetros profundidade média dos drenos, condutividade hidráulica do solo saturado, porosidade drenável, parâmetros climáticos, coeficiente CN e custo de instalação dos drenos subterrâneo exercem maior influência no cálculo do espaçamento econômico de drenos. Duarte (1997) realizou um estudo semelhante com o modelo SIMDRENO e os resultados da análise de sensibilidade revelaram que a profundidade dos drenos, a condutividade hidráulica do solo e os parâmetros hidrológicos da região foram os fatores cuja variação exerce maior efeito sobre o espaçamento mais econômico de drenos.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Desenvolvimento da metodologia

A metodologia proposta para o dimensionamento e manejo de sistemas de drenagem agrícola fundamenta-se no critério de drenagem SEW_{30} - somatório dos excessos de água no solo acima da profundidade de 30 cm, no balanço de água no solo e na equação de drenagem de Krayjenhoff van Leur-Maasland. Para obtenção do índice SEW_{30} , são realizados um balanço hídrico diário no solo, na região do sistema radicular e o cálculo da posição diária do lençol freático.

Os componentes do balanço hídrico (Figura 1) são contabilizados diariamente em um volume de controle de base unitária, localizado equidistante a dois drenos paralelos, estendendo-se desde a camada impermeável até a superfície do solo. Estes componentes são: o total precipitado diário, a infiltração, o armazenamento de água na zona radicular, o fluxo ascendente máximo proveniente do lençol freático para a zona radicular, a evapotranspiração diária e a drenagem.

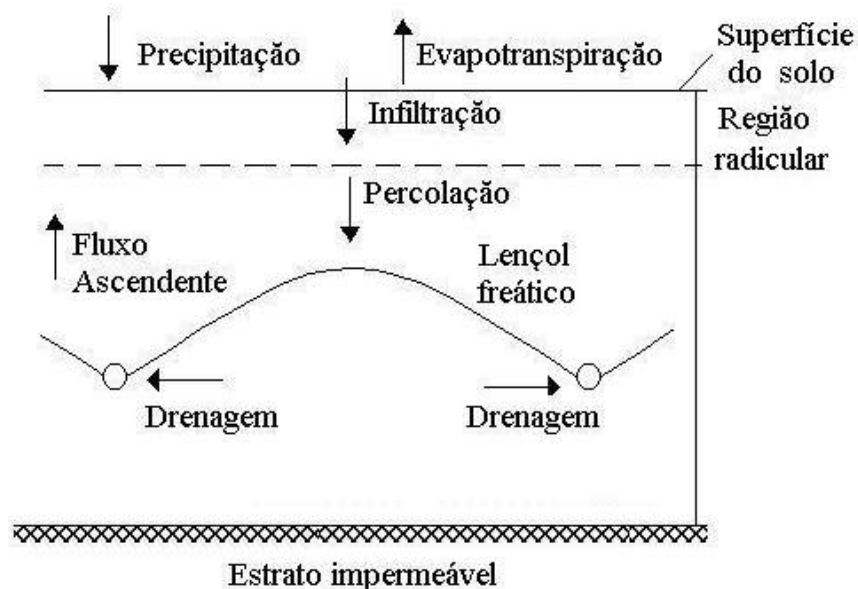


Figura 1 - Componentes do balanço hídrico considerados na metodologia.

O balanço de água na zona radicular é realizado, considerando-se a fração da precipitação pluvial diária, ou lâmina de irrigação, infiltrada, que efetivamente provoca a recarga do lençol freático, a evapotranspiração real diária e o fluxo ascendente máximo proveniente do lençol freático.

A posição diária do lençol freático (Figura 2) em resposta às recargas efetivas é calculada utilizando-se a equação de recarga intermitente de Krayjenhoff van Leur-Maasland, durante o ciclo da cultura, para uma determinada profundidade dos drenos e coeficiente de armazenamento.

Os efeitos da relação entre a profundidade do lençol freático e a produtividade da cultura são caracterizados com base no valor de SEW_{30} , calculado a partir do hidrograma freático, gerado durante o período de desenvolvimento da cultura (Figura 2). Numa segunda etapa, o valor calculado de SEW_{30} é comparado com valores experimentais determinados para a cultura e tipo de solo em questão. Quando o valor calculado de SEW_{30} não coincide com os experimentais, um novo valor de espaçamento é testado, de forma iterativa, até obter-se uma diferença aceitável.

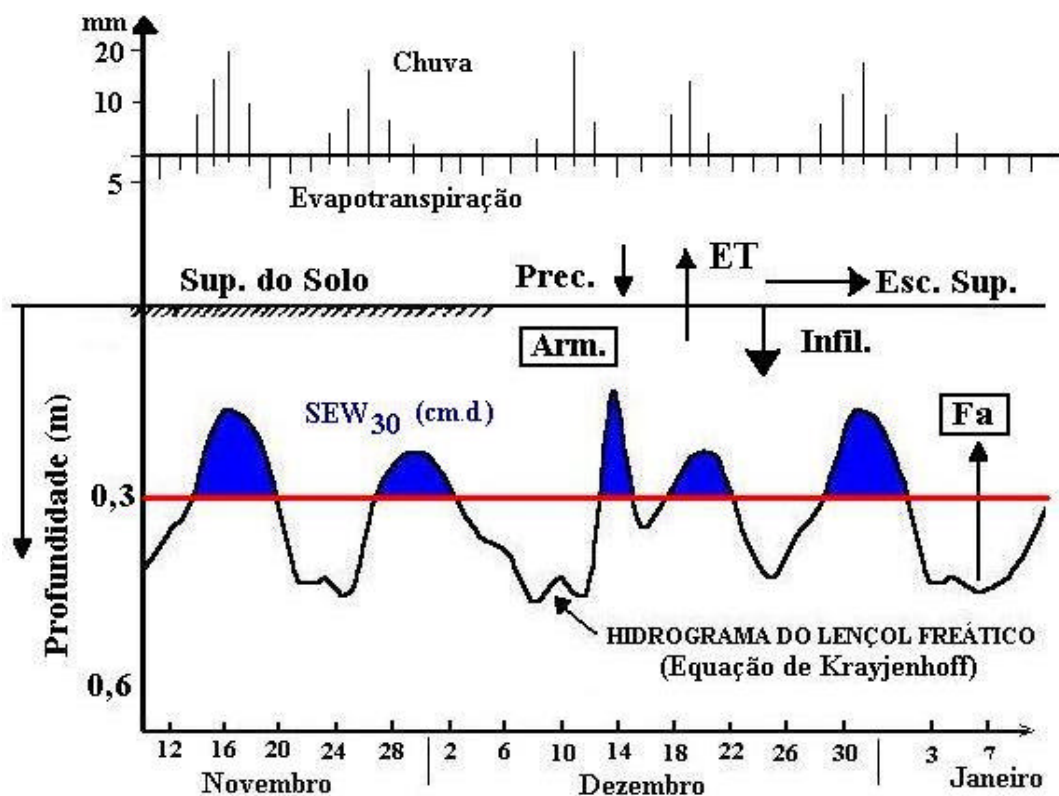


Figura 2 - Hidrograma freático e índice SEW_{30} .

3.2. Base de dados climáticos

A base de dados climáticos requeridos pela metodologia inclui séries sintéticas diárias dos elementos climáticos: temperaturas máxima e mínima do ar, radiação solar, velocidade do vento, temperatura do ponto de orvalho, lâmina total precipitada, duração da precipitação, intensidade máxima de precipitação e seu tempo de ocorrência. Esses dados são gerados utilizando-se o programa gerador de dados climáticos CLIGEN, desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA).

Os dados de entrada do gerador climático são: probabilidade de ocorrência de dia chuvoso, tendo o dia anterior sido chuvoso, valor mensal; probabilidade de ocorrência de dia chuvoso, tendo o dia anterior sido seco, valor mensal; média mensal de intensidade máxima de precipitação; frequência acumulada de ocorrência do tempo de pico; média mensal, desvio-padrão e coeficiente de assimetria do total diário precipitado, das temperaturas máxima e mínima do ar,

da radiação solar e da temperatura do ponto de orvalho, obtidos de séries históricas.

A metodologia utilizada no modelo CLIGEN para gerar os elementos meteorológicos é descrita a seguir (Nicks et al., 1995):

3.2.1. Precipitação total diária

O número e a ocorrência de eventos de precipitação total diária são determinados utilizando-se a primeira ordem da cadeia de Markov, com dois estados. O método da cadeia de Markov baseia-se no cálculo de duas probabilidades condicionais: probabilidade de um dia ser chuvoso, desde que o dia anterior seja seco $P(W/D)$ e probabilidade de um dia ser chuvoso, desde que o dia anterior seja chuvoso $P(W/W)$. As probabilidades condicionais de precipitação são calculadas por meio das seguintes relações:

$$P(W/D) = \alpha \quad (5)$$

$$P(D/D) = 1 - \alpha \quad (6)$$

$$P(D/W) = \beta \quad (7)$$

$$P(W/W) = 1 - \beta \quad (8)$$

em que

$P(W/D)$ = probabilidade de ocorrência de dia chuvoso, tendo o dia anterior sido seco, valor mensal;

$P(D/D)$ = probabilidade de ocorrência de dia seco, tendo o dia anterior sido seco, valor mensal;

$P(D/W)$ = probabilidade de ocorrência de dia seco, tendo o dia anterior sido chuvoso, valor mensal; e

$P(W/W)$ = probabilidade de ocorrência de dia chuvoso, tendo o dia anterior sido chuvoso, valor mensal.

Se o dia anterior ao dia simulado for chuvoso, a probabilidade de ocorrência de chuva é $P(W/W)$; caso contrário, é $P(W/D)$. Para determinar a ocorrência de um dia seco ou chuvoso é utilizado, para cada dia de simulação, um número aleatório. Se o número aleatório for menor ou igual à probabilidade de ocorrência de chuva para aquele dia, o dia é considerado chuvoso; caso contrário, é considerado seco.

A precipitação total diária é estimada a partir de uma equação originada da distribuição Pearson tipo III, expressa por:

$$P = \mu + \frac{2s}{g} \left(\left[\frac{g}{6} \left(x' - \frac{g}{6} \right) + 1 \right]^3 - 1 \right) \quad (9)$$

em que

- $P =$ precipitação total diária, mm;
- $\mu =$ média mensal da precipitação total diária, mm;
- $s =$ desvio padrão da precipitação total diária, mm;
- $g =$ coeficiente de assimetria da precipitação diária, adimensional; e
- $x' =$ variável normal padronizada, adimensional.

Os valores diários de x' são obtidos a partir da padronização do número aleatório correspondente àquele dia. A padronização consiste em um procedimento matemático que transforma os números aleatórios de tal forma que apresentem média igual a zero e desvio padrão igual a um.

A duração das precipitações diárias é estimada conforme proposto por Arnold et al. (1990), considerando-se a precipitação máxima em 30 minutos, ou seja:

$$D_p = \frac{9,212}{-2 \ln(1 - \hat{\alpha}_{0,5})} \quad (10)$$

em que

- $D_p =$ duração da precipitação, h; e

$\alpha_{0,5}$ = razão entre a precipitação máxima ocorrida em 30 minutos e a precipitação total diária, adimensional.

A intensidade máxima instantânea de precipitação é estimada pela equação proposta por Arnold e Williams (1989), expressa por:

$$i_p = -2 P \ln(1 - \hat{\alpha}_{0,5}) \quad (11)$$

em que i_p é a intensidade máxima instantânea de precipitação (mm h^{-1}).

A obtenção do tempo compreendido entre o início do evento de chuva até o tempo de ocorrência da intensidade máxima instantânea de precipitação é realizada por meio estudo de frequência dos valores obtidos na série histórica considerada. Conforme metodologia proposta por Nicks et al. (1995), são gerados doze intervalos de classes de mesma amplitude, variando de 0,0 a 1,0.

A obtenção da distribuição acumulada do tempo de ocorrência da intensidade máxima instantânea de precipitação é realizada por meio da equação:

$$A_k = \frac{N_k}{N} \quad (12)$$

em que

A_k = frequência acumulada para o intervalo de classe, decimal;

N_k = total acumulado de eventos com tempos de ocorrência da intensidade máxima instantânea de precipitação até o limite superior do intervalo; e

N = número total de eventos de precipitação registrados na estação.

Os valores diários de radiação solar, temperaturas máxima e mínima do ar e temperatura do ponto de orvalho são gerados utilizando-se a distribuição normal padrão.

3.2.2. Temperatura diária do ar

A temperatura diária do ar depende da ocorrência de precipitação no dia anterior. Normalmente, durante um dia seco seguido de um dia seco, as temperaturas diárias tendem a serem maiores e, no entanto, durante um dia chuvoso seguido de um dia chuvoso, as temperaturas diárias tendem a serem menores (Richardson, 1981).

As equações utilizadas para a estimativa das temperaturas máxima e mínima do ar são:

$$T_x = \bar{T}_x + DP_x v \quad (13)$$

$$T_n = \bar{T}_n + DP_n v \quad (14)$$

em que

T_x = temperatura máxima do ar, °C;

T_n = temperatura mínima do ar, °C;

\bar{T}_x = temperatura média máxima mensal do ar, °C;

\bar{T}_n = temperatura média mínima mensal do ar, °C;

DP_x = desvio padrão da temperatura máxima mensal, °C;

DP_n = desvio padrão da temperatura mínima mensal, °C; e

v = variável reduzida ou padronizada.

3.2.3. Radiação solar

A radiação solar diária é estimada por meio da equação:

$$R_s = \bar{R}_s + DP_{rs} v \quad (15)$$

em que

R_s = radiação solar, MJ m⁻² d⁻¹;

\bar{R}_s = radiação solar média mensal, MJ m⁻² d⁻¹; e

DP_{rs} = desvio padrão da radiação solar diária, $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$.

3.2.4. Temperatura do ponto de orvalho

A temperatura do ponto de orvalho é estimada por:

$$T_{po} = \bar{T}_{po} + DP_n v \quad (16)$$

em que

T_{po} = temperatura do ponto de orvalho diária, °C; e

\bar{T}_{po} = temperatura do ponto de orvalho média mensal, °C.

3.3. Balanço de água no solo

A simulação do balanço de água na zona radicular é realizada diariamente, durante o ciclo da cultura, a partir de dados climáticos e propriedades físicas do solo. Os métodos utilizados para a determinação dos componentes do balanço hídrico são mostrados a seguir:

3.3.1. Infiltração da água no solo

A infiltração da água no solo é calculada a partir da equação de Green-Ampt modificada por Mein e Larson (GAML), dada a seguir (Mein & Larson, 1973):

$$TI = K_z \left[1 + \frac{h_f (\theta_s - \theta_i)}{I} \right] \quad (17)$$

em que

TI = taxa de infiltração de água no solo, $mm\ h^{-1}$;

K_z = condutividade hidráulica do solo, na direção vertical, $mm\ h^{-1}$;

- h_f = componente matricial do potencial da água no solo na frente de umedecimento, mm.c.a.;
- θ_s = teor de água no solo correspondente à saturação, decimal;
- θ_i = teor de água no solo no início do processo de infiltração, decimal; e
- I = infiltração acumulada, mm.

Os valores dos parâmetros K_z e h_f utilizados foram os recomendados por Cecílio (2002), ou seja, K_z igual a $0,5 K_0$ associado a h_f igual a $h_f(\theta_i)$.

Durante a precipitação, quando a intensidade da chuva (i_p) é menor que a capacidade de infiltração da água no solo (CI), a lâmina infiltrada é considerada igual à lâmina precipitada no intervalo de tempo. Caso contrário, a lâmina infiltrada é calculada integrando-se a função da taxa de infiltração no intervalo de tempo considerado.

3.3.1.1. Perfil de precipitação

O perfil instantâneo de precipitação, necessário ao cálculo da infiltração da água no solo, é gerado a partir do modelo proposto por Nicks et al. (1995). O modelo utiliza para este fim uma função dupla exponencial. A função baseia-se em duas variáveis padronizadas, ou seja, a intensidade máxima instantânea de precipitação (i_p^*) e o tempo de ocorrência da intensidade máxima instantânea de precipitação (t_p^*), determinadas pelas equações:

$$i_p^* = \frac{r_p}{i_b} \quad (18)$$

em que

- i_p^* = intensidade máxima instantânea de precipitação padronizada, adimensional;
- r_p = intensidade máxima de precipitação, mm h^{-1} ; e
- i_b = intensidade média de precipitação, mm h^{-1} .

$$t_p^* = \frac{D_{ip}}{D_p} \quad (19)$$

em que

t_p^* = tempo padronizado de ocorrência da intensidade máxima instantânea de precipitação, adimensional;

D_{ip} = tempo de ocorrência da intensidade máxima instantânea de precipitação, minutos; e

D_p = duração da precipitação, minutos.

A função dupla exponencial compreende as seguintes equações:

$$i(t) = \begin{cases} a e^{bt} & \dots\dots\dots 0 \leq t \leq t_p \\ c e^{-d t} & \dots\dots\dots t_p < t \leq 1,0 \end{cases} \quad (20)$$

em que

$i(t)$ = intensidade de precipitação padronizada, decimal; e

a, b, c e d = parâmetros do modelo a serem determinados.

Os parâmetros $a, b, c,$ e d são obtidos para os dias chuvosos, empregando-se as seguintes equações:

$$1 - e^{-b t_p^*} = \frac{b t_p^*}{i_p^*} \quad (21)$$

$$a = i_p^* e^{-b t_p^*} \quad (22)$$

$$c = i_p^* e^{d t_p^*} \quad (23)$$

$$d = \frac{b t_p^*}{(1 - t_p^*)} \quad (24)$$

O valor de b é determinado solucionando-se a equação 21 pelo método iterativo de Newton-Raphson. Os demais parâmetros são calculados por meio da aplicação direta das equações 22, 23 e 24.

Para obtenção dos valores reais da duração e intensidade instantânea, para quaisquer pares de valores padronizados (t_p^* , $i(t)$), multiplica-se o valor do tempo padronizado (t_p^*) pela duração do evento (D) e o valor da intensidade padronizada ($i(t)$) pela intensidade média (i_b).

3.3.2. Evapotranspiração de referência (ET_0)

A evapotranspiração de referência (ET_0) é estimada aplicando-se o modelo proposto por Penman - Monteith padrão FAO, conforme Allen et al. (1998), ou seja:

$$ET_0 = \frac{0,408s(R_n - G) + \gamma \frac{900}{(T + 273)} U_2 (e_s - e_a)}{s + \gamma(1 + 0,34U_2)} \quad (25)$$

em que

ET_0 = evapotranspiração de referência, mm d^{-1} ;

s = declividade da curva de pressão de saturação de vapor, $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$;

R_n = saldo de radiação, $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$;

G = fluxo de calor no solo, $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$;

γ = coeficiente psicrométrico, $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$;

T = temperatura média do ar, $^\circ\text{C}$;

U_2 = velocidade média do vento a 2 m de altura, m s^{-1} ;

e_a = pressão parcial de vapor, kPa ; e

e_s = pressão de saturação de vapor, kPa .

3.3.3. Evapotranspiração da cultura (ET_c)

A evapotranspiração da cultura (ET_c) é calculada pela equação (Doorenbos e Pruitt, 1977):

$$ET_c = ET_0 K_c \quad (26)$$

em que K_c é o coeficiente da cultura.

3.3.4. Fluxo ascendente máximo

A metodologia utilizada para calcular o fluxo ascendente máximo é semelhante àquela utilizada no modelo DRAINMOD, descrita por Skaggs (1981). Baseia-se na geração de uma tabela contendo valores do fluxo ascendente máximo do lençol freático em direção à zona radicular, para diferentes profundidades do lençol freático, empregando-se a equação de Darcy resolvida por diferenças finitas.

A equação utilizada para calcular o fluxo ascendente máximo oriundo do lençol freático em qualquer plano abaixo da zona radicular é:

$$fa = -K(h) \frac{dh}{dz} - K(h) \quad (27)$$

em que

fa = fluxo ascendente de água no solo, $cm\ h^{-1}$;

$K(h)$ = condutividade hidráulica do solo não saturado, $cm\ d^{-1}$;

h = potencial matricial, $cm.c.a$; e

z = coordenada vertical, positiva para baixo, cm .

A equação 27, escrita na forma de diferenças finitas, torna-se:

$$fa = -K(h_i) \frac{(h_{i+1} - h_i)}{\Delta z} - K(h_i) \quad (28)$$

ou

$$h_{i+1} = h_i - \Delta z - fa \frac{\Delta z}{K(h_i)} \quad (29)$$

Para determinar o fluxo ascendente máximo (fa), em função da profundidade do lençol freático, são realizadas as seguintes etapas:

- obter as funções $K(\theta)$ e $\theta(h)$ para o solo em questão;
- estabelecer valores de fa, para os quais serão calculadas as respectivas posições do lençol freático;
- considerar, como condição de contorno, que a umidade do solo junto ao plano que passa pela base da zona radicular é baixa em relação à capacidade de campo. Conforme sugerido por Skaggs (1981), considera-se $h_1 = -50$ kPa;
- calcular h_2 pela equação 29, utilizando o valor de $K(-500)$ e um dos valores de fa já estabelecidos;
- calcular h_3 utilizando o valor de $K(h_2)$ na equação 29 e assim sucessivamente; e
- a posição do lençol freático será aquela correspondente a $h = 0$.

Os valores de $\theta(h)$ são determinados pelo modelo de van Genuchten (1980):

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\beta h)^\eta\right]^m} \quad (30)$$

em que

$\theta(h)$ = teor de água, base volume, em equilíbrio com o potencial matricial h , $m^3 m^{-3}$;

θ_r = teor de água residual, base volume, do solo, $m^3 m^{-3}$;

θ_s = teor de água do solo saturado, base volume, $m^3 m^{-3}$;

m, η = parâmetros adimensionais da equação; e

β = parâmetro com dimensão igual ao inverso da tensão, m^{-1} .

Os parâmetros do modelo de van Genuchten (1980) foram obtidos utilizando-se o programa de ajuste de curvas de retenção de Dourado Neto et al. (1990).

A função $K(\theta)$ é obtida a partir da condutividade hidráulica do solo saturado, K_0 , e da curva de retenção de água no solo, aplicando-se o modelo de Mualem (1976):

$$K(\theta) = K_0 \bar{\omega}^\lambda \left[1 - (1 - \bar{\omega}^{1/m})^m \right]^2 \quad (31)$$

em que

$K(\theta)$ = condutividade hidráulica do solo não saturado, $cm\ h^{-1}$;

K_0 = condutividade hidráulica do solo saturado, $cm\ h^{-1}$;

λ = parâmetro empírico, aproximadamente igual a 0,5 para a maioria dos solos; e

m = parâmetro adimensional da equação.

O parâmetro $\bar{\omega}$ é obtido pela equação:

$$\bar{\omega} = \left[\frac{1}{1 + (\beta h)^n} \right]^m \quad (32)$$

3.3.4.1. Comparação entre fluxo ascendente máximo e a evapotranspiração real

Nesta etapa, é calculada, para cada dia, a fração da evapotranspiração real que será suprida pela ascensão capilar proveniente do lençol freático. Quando a evapotranspiração real (ET_r) for menor que o fluxo ascendente máximo, a ET_r é suprida integralmente pelo lençol freático, portanto, não provocando diminuição no conteúdo de água na zona radicular. Caso contrário, quando o fluxo

ascendente máximo satisfaz apenas uma fração da ETr, a fração restante provocará redução no conteúdo de água da zona radicular.

3.4. Descrição do balanço hídrico na zona radicular

Nesta etapa são calculados o armazenamento diário de água no solo (Arm), a evapotranspiração real diária (ETr) e a fração da precipitação diária infiltrada que efetivamente percola até o lençol freático (Rec).

Em função da profundidade do lençol freático relativa ao dia corrente, podem ocorrer três situações:

a) Lençol freático na superfície ou acima da superfície do solo

O Arm corresponde à saturação completa da zona radicular e a ETr é igual à evapotranspiração potencial. Quando o armazenamento de água na zona radicular, no dia anterior, estiver em equilíbrio com uma tensão igual ou maior que 0,6 mca (tensão considerada para o cálculo da porosidade drenável), considera-se que toda precipitação que infiltrou atingiu o lençol freático. Caso contrário, Rec é considerada igual à parcela da precipitação que infiltrou no dia “i” menos a lâmina consumida para elevar o teor de água do solo no dia anterior até θ_{pd} . Se a Rec obtida for negativa, faz-se Rec igual a zero.

b) Lençol freático dentro da zona radicular

Calcula-se Arm considerando que a parte da zona radicular que está acima do lençol freático encontra-se com umidade correspondente à tensão de 6 kPa. A ETr é igual à evapotranspiração potencial e Rec é calculada do mesmo modo como no caso anterior.

c) Lençol freático abaixo da zona radicular

Calcula-se Arm realizando um balanço de umidade na zona radicular. Caso o valor do armazenamento calculado corresponda a uma lâmina maior do que aquela correspondente à θ_{pd} (DR), faz-se Rec igual a Arm, subtraído de DR. Caso contrário, Rec é considerada igual a zero

A evapotranspiração real é determinada com base no teor de água da zona radicular, utilizando a equação apresentada por Bernardo (1995), isto é:

$$ETr_i = \frac{\ln(\text{arm}_i - PM_i + 1)}{\ln(CC_i - PM_i + 1)} ET_c \quad (33)$$

em que

PM_i = lâmina de água na zona radicular correspondente ao ponto de murcha permanente no dia “i”, mm;

CC_i = lâmina de água na zona radicular correspondente à capacidade de campo dia “i”, mm; e

ET_c = evapotranspiração da cultura no dia “i”, mm.

3.5. Posição diária do lençol freático

A posição diária do lençol freático em resposta às recargas efetivas é calculada utilizando-se a equação de recarga intermitente de Krayjenhoff van Leur-Maasland, durante o período crítico de drenagem, isto é:

$$h_{lf} = \frac{4rec}{\pi\mu_d} j \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{n^3} \left(e^{\frac{n^2}{j} b_r} - 1 \right) e^{-\frac{n^2}{j} t_{rec}} \quad (34)$$

em que

h_{lf} = altura do lençol freático sobre o plano que passa pelos drenos em resposta a uma dada recarga, m;

$rec =$ recarga efetiva de intensidade constante, $m.d^{-1}$;
 $\mu_d =$ porosidade drenável do solo, $cm^3.cm^{-3}$;
 $b_r =$ duração da recarga, d;
 $t_{rec} =$ período de tempo contado desde o início da recarga, d; e
 $j =$ fator de armazenamento, d, calculado por meio da expressão:

$$j = \frac{\mu_d L^2}{\pi^2 K_0 D_0} \quad (35)$$

em que

$L =$ espaçamento entre drenos, m; e
 $K_0 =$ condutividade hidráulica do solo saturado, $m d^{-1}$.

$$D_0 = deq + hm \quad (36)$$

em que

$deq =$ espessura do estrato equivalente de Hooghoudt, m; e
 $h_m =$ altura do lençol freático acima do plano que passa pelos drenos no tempo b_r , m.

O valor do estrato equivalente de Hooghoudt "deq", é calculado por meio da equação:

$$deq = \frac{D_d}{2,51 \frac{D_d}{L} \ln \frac{D_d}{Pmo} + 1} \quad (37)$$

para drenos abertos, e:

$$deq = \frac{D_d}{8(R_h + R_r)} \quad (38)$$

para drenos cobertos.

em que

D_d = distância vertical entre o plano que contém os drenos e a camada impermeável, m;

P_{mo} = perímetro molhado, m;

R_h = resistência hidráulica horizontal, m; e

R_r = resistência hidráulica radial, m.

R_h e R_r são calculados utilizando-se as equações:

$$R_h = \frac{(L - 1.4D_d)^2}{8D_dL} \quad (39)$$

e

$$R_r = \frac{1}{\pi} \ln \frac{0.7D_d}{r} \quad (40)$$

em que r é o raio do tubo de drenagem, m.

3.6. Soma do excesso de água (SEW_{30})

O SEW_{30} é um índice utilizado para quantificar as condições de excesso de água na zona radicular durante o ciclo da cultura. É expresso por:

$$SEW_{30} = \sum_{j=1}^m (30 - X_j) \quad (41)$$

em que

SEW_{30} = somatório dos excedentes de água acima da profundidade de 30 cm, cm.d;

X_j = profundidade média do lençol freático durante o dia j , cm; e

m = número de dias em que o lençol freático permanece acima da profundidade de 30 cm, durante o ciclo da cultura.

O método tem por critério desconsiderar números negativos dentro do somatório, ou seja, somente são computados valores de X_j menores que 30 cm.

3.7. Programa computacional

O programa computacional objetivou realizar os cálculos pertinentes a cada etapa da metodologia, além de integrá-la de modo a conseguir uma comunicação amigável com o usuário. Foi desenvolvido em linguagem Delphi, contendo telas de entrada e saída de dados. A Figura 3 apresenta o fluxograma resumido do programa.

Os parâmetros de entrada são: precipitação total diária, mm; duração da precipitação, h; intensidade máxima de precipitação padronizada, adimensional; tempo padronizado de ocorrência da intensidade máxima de precipitação, adimensional; temperatura máxima do ar, °C; temperatura mínima do ar, °C; temperatura do ponto de orvalho, °C; radiação solar, MJ m⁻² d⁻¹; velocidade do vento a 2 m de altura, m s⁻¹; condutividade hidráulica do solo saturado, m d⁻¹; profundidade da camada impermeável, m; valor inicial de espaçamento entre drenos, m; profundidade de instalação dos drenos, m; raio efetivo dos drenos, m; curva de retenção de água no solo; data do plantio e colheita da cultura; valor de SEW₃₀ experimental, cm.d; profundidade efetiva do sistema radicular da cultura, m e teor de água no solo no dia inicial, adimensional.

Após a simulação, o programa apresenta os seguintes parâmetros de saída: SEW₃₀ calculado, cm.d; produtividade relativa em função do excesso de água no solo, decimal e espaçamento entre drenos paralelos, m;

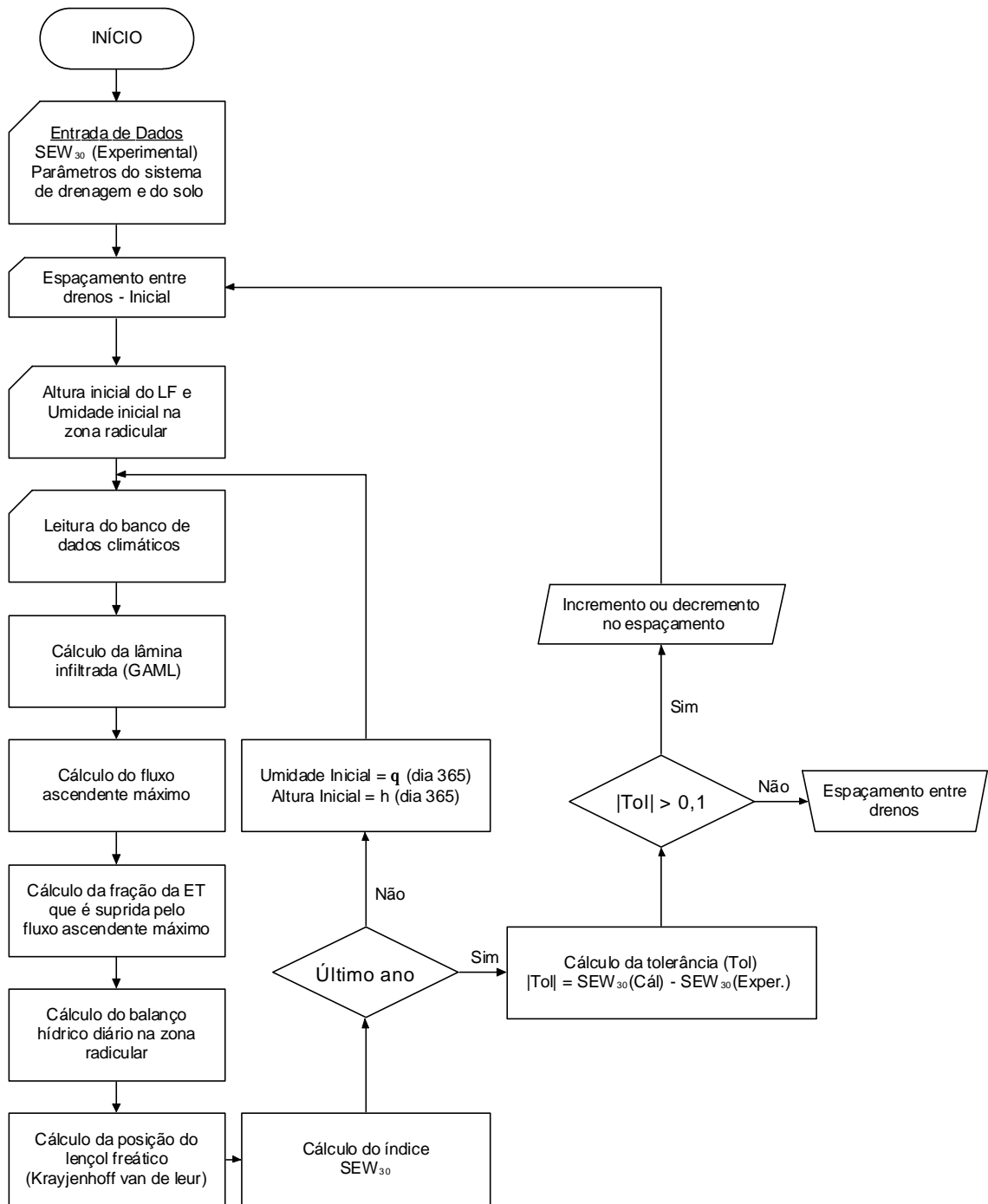


Figura 3 - Fluxograma do programa computacional.

3.8. Aplicação da metodologia

A fim de comparar os espaçamentos entre drenos obtidos por meio da metodologia proposta com àqueles obtidos por meio de metodologias de dimensionamento tradicionais, foram realizadas simulações por meio do

programa, utilizando-se dados climáticos da região de Viçosa, MG. A base de dados utilizada nas simulações é descrita a seguir:

3.8.1 Base de dados

a) Clima

Foram utilizadas séries sintéticas de dados diários de radiação solar, temperatura máxima e mínima do ar, temperatura do ponto de orvalho, velocidade do vento, precipitação total diária, duração da precipitação, intensidade máxima de precipitação e o tempo para sua ocorrência. Esses dados foram gerados utilizando-se o modelo CLIGEN, para um período de 50 anos.

Os dados de entrada do modelo CLIGEN, ou seja, a média mensal, o desvio padrão e o coeficiente de assimetria da precipitação total, das temperaturas máxima e mínima do ar, da temperatura do ponto de orvalho, da velocidade do vento, além da probabilidade de um dia ser chuvoso, tendo sido o anterior chuvoso e da probabilidade de um dia ser chuvoso, tendo sido o anterior seco, foram obtidos a partir da série histórica da região de Viçosa, para o período de 1972 a 2001, num total de 30 anos. As informações relativas à duração dos eventos de precipitação, a intensidade máxima instantânea de precipitação e o tempo para a sua ocorrência foram extraídas de dados pluviográficos.

b) Solo e cultura

Características físicas de cinco solos foram usadas como parâmetros de entrada no programa.

Os solos foram:

- Solo 1: Latossolo Vermelho Amarelo Álico - Viçosa
- Solo 2: Podzólico Vermelho Amarelo - Leopoldina
- Solo 3: Latossolo Vermelho Amarelo - Viçosa
- Solo 4: Podzólico Vermelho Amarelo - Viçosa
- Solo 5: Podzólico Vermelho Amarelo Câmbico - Ponte Nova

As culturas usadas foram: milho, cana-de-açúcar e a cenoura.

As função que relaciona a produtividade relativa com os valores de SEW_{30} , assim com os respectivos valores de SEW_{30} experimentais utilizados neste trabalho, foram obtidos por Skaggs (1978), Carter e Camp (1994) e Vildoso (1995), ou seja, 242, 200, e 122,45 cm.d para as culturas do milho, cana-de-açúcar e cenoura, respectivamente.

O Quadro 1 apresenta os teores volumétricos de água relativos à saturação, capacidade de campo, ponto de murcha permanente e em equilíbrio com o componente matricial de -0,6 m.c.a., para os cinco solos.

Quadro 1 - Teores volumétricos de água (m^3m^{-3}) relativos à saturação (θ_s), capacidade de campo (θ_{cc}), ponto de murcha permanente (θ_{pm}) e em equilíbrio com o componente matricial de -0,6 m.c.a. (θ_{pd}) para diferentes solos

Solo	Teor de água			
	θ_s	θ_{pd}	θ_{cc}	θ_{pm}
Solo 1	0,450	0,352	0,331	0,255
Solo 2	0,674	0,636	0,611	0,329
Solo 3	0,312	0,255	0,239	0,206
Solo 4	0,542	0,487	0,460	0,409
Solo 5	0,360	0,270	0,250	0,169

O Quadro 2 apresenta os parâmetros necessários ao modelo de van Genuchten (1980), empregado para se estimar o fluxo ascendente máximo oriundo do lençol freático.

Quadro 2 - Parâmetros do modelo de van Genuchten

Solo	θ_s (m^3m^{-3})	θ_r (m^3m^{-3})	m	η	β (cm^{-1})
Solo 1	0,450	0,248	0,3377	1,5098	0,0549
Solo 2	0,674	0,246	0,2492	1,3350	0,0210
Solo 3	0,312	0,203	0,3224	1,4758	0,1018
Solo 4	0,542	0,214	0,0576	1,0611	0,3323
Solo 5	0,360	0,159	0,3050	1,4389	0,0580

Obs: os parâmetros m e η são adimensionais.

Os valores de condutividade hidráulica do solo saturado, para os solos de 1 a 5, são 0,50; 1,50; 1,00; 1,42 e 0,80 m d⁻¹, respectivamente.

A profundidade da camada impermeável (D_{CI}) foi 5 m.

c) Sistemas de drenagem

O programa foi rodado para sistemas de drenagem que apresentam as seguintes características: profundidade dos drenos de 1,4 m nas áreas cultivadas com milho e cana-de-açúcar, e 1,2 m nas áreas cultivadas com cenoura; e diâmetros de drenos laterais de 0,10 m.

Os espaçamentos obtidos utilizando-se a metodologia proposta foram comparados com os espaçamentos obtidos com os métodos de dimensionamento propostos por Pizarro (1985) e Cruciani (1989).

Na metodologia proposta por Pizarro (1985), para cada tipo de cultura, são estabelecidas profundidades mínimas nas quais o lençol freático deve estar em um, dois e três dias, transcorridos após uma chuva de um dia, com probabilidade de ser igualada ou superada, em média, cinco vezes ao ano. Esta altura de chuva para a região de Viçosa é de 40 mm. Neste critério não é considerado o escoamento superficial, ou seja, considera-se que toda precipitação se infiltra no solo.

Pelo critério proposto por Cruciani (1989), conforme o tipo de cultura, são estabelecidas taxas de rebaixamento do lençol freático após uma chuva de 24 horas, com um período de retorno igual a cinco anos. Para a região de Viçosa, essa precipitação é 98,2 mm. No cálculo da recarga efetiva do lençol freático, esse autor sugere ainda a possibilidade de abater da precipitação total uma fração correspondente ao escoamento superficial. No cálculo do espaçamento entre drenos utilizando o método sugerido por Cruciani (1989) na condição de existência de escoamento superficial, segundo a metodologia, foram subtraídos 50%, 35%, 40%, 37%, e 45% da chuva de projeto, para os solos 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente. Esses valores correspondem à ordem de grandeza dos coeficientes de escoamento superficial “C”, relativos à Fórmula Racional.

3.9. Análise de dados climáticos

Para possibilitar uma análise dos elementos meteorológicos gerados pelo modelo CLIGEN, os valores gerados foram comparados com os valores observados. A metodologia adotada para a comparação dos resultados fundamenta-se na análise de regressão linear simples, nos coeficientes de determinação (r^2) e angular (a) das respectivas regressões e na comparação visual dos resultados por meio de gráficos e tabelas.

Utilizou-se também o cálculo do intervalo de confiança, a 95% de significância para as médias mensais, com o objetivo de se avaliar estatisticamente os valores gerados pelo CLIGEN, pela visualização de gráficos de barras de erros. O intervalo de confiança foi obtido por

$$IC = \bar{X} \pm t_{0,025} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (60)$$

em que

IC = intervalo de confiança;

\bar{X} = média gerada pelo modelo;

$t_{0,025}$ = valor de t crítico bilateral ao nível de 5,0%;

s = desvio padrão dos valores observados; e

n = número de dados da amostra.

Foram também calculadas as variações percentuais (δ) entre as médias mensais dos valores gerados pelo CLIGEN e os observados na série histórica. A partir do módulo dos valores das variações percentuais (δ) foi calculado também o valor médio das variações percentuais (VMVP).

3.10. Sensibilidade do modelo aos parâmetros de entrada

A análise de sensibilidade do modelo foi conduzida para os parâmetros relativos à geometria do sistema de drenagem, às características físico-hídricas

do solo, aos elementos meteorológicos e à sensibilidade da cultura ao déficit de água no solo. Para quantificar o impacto de um intervalo de valores de um dado parâmetro de entrada sobre os resultados obtidos com o programa, foi utilizado o índice de sensibilidade relativo (IS), determinado conforme McCuen e Snyder (1986), pela equação:

$$IS = \frac{\frac{R_1 - R_2}{R_{12}}}{\frac{I_1 - I_2}{I_{12}}} \quad (61)$$

em que

IS = índice de sensibilidade do modelo aos parâmetros de entrada;

R_1 = resultado obtido com o modelo para o menor valor de entrada;

R_2 = resultado obtido com o modelo para o maior valor de entrada;

R_{12} = média dos resultados obtidos com o menor e o maior valores de entrada;

I_1 = menor valor de entrada;

I_2 = maior valor de entrada; e

I_{12} = média dos valores de entrada.

Conforme McCuen e Snyder (1986), o valor de IS representa a mudança normalizada gerada na saída do modelo para uma mudança normalizada na entrada dos dados, a qual permite comparar a sensibilidade a diferentes magnitudes dos parâmetros de entrada, representando uma função dos parâmetros de entrada para uma resposta não-linear. Quanto maiores forem os índices obtidos, mais sensível será o modelo ao parâmetro; já os valores próximos a zero indicam que o modelo não apresenta sensibilidade ao parâmetro.

Para realização da análise de sensibilidade, utilizou-se a cultura da cana-de-açúcar e séries sintéticas de 50 anos de elementos meteorológicos gerados pelo programa CLIGEN para a região de Viçosa, MG. O tipo de solo foi o Latossolo Vermelho-Amarelo.

O Quadro 3 apresenta os valores dos parâmetros geométricos do sistema de drenagem e os físico-hídricos do solo utilizados na análise de sensibilidade.

Quadro 3 - Parâmetros, físico-hídricos do solo e geométricos do sistema de drenagem, utilizados na análise de sensibilidade

Parâmetro	Valor
Condutividade hidráulica do solo saturado	1,00 m d ⁻¹
Porosidade drenável	0,06 m ³ m ⁻³
Teor de água do solo saturado	0,31 m ³ m ⁻³
Teor de água do solo na capacidade de campo	0,24 m ³ m ⁻³
Teor de água do solo no ponto de murcha permanente	0,21 m ³ m ⁻³
Teor de água do solo no dia inicial	0,25 m ³ m ⁻³
Profundidade do sistema radicular	1,10 m
Profundidade do perfil (camada impermeável)	5 m
Profundidade dos drenos	1,4 m
Raio efetivo dos drenos	0,05 m
Umidade residual	0,2030 m ³ m ⁻³
M	0,3224
η	1,4758
β	0,1018 cm ⁻¹

m e η são parâmetros adimensionais.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Apresentação do programa computacional

Um programa computacional, objetivando possibilitar a aplicação da metodologia desenvolvida, foi elaborado utilizando o ambiente de programação Delphi. O programa roda em computadores com sistema operacional Microsoft Windows 95 ou superior. As Figuras 4 a 13 representam as telas de entrada de dados e de resultados por ele fornecidos.

4.1.1. Telas para entrada de dados

Na Figura 4 é apresentada a tela principal do programa computacional. O menu “Entrada de dados” permite ao usuário acessar todas as telas para entrada de dados.



Figura 4 - Tela principal do programa computacional.

4.1.1.1. Dados climáticos

A entrada de dados é feita por meio da leitura de arquivo de dados diários de evapotranspiração de referência (ET_0) e de arquivo contendo informações pertinentes à precipitação, ou seja, o total diário precipitado, a duração da precipitação, a intensidade máxima de precipitação e o tempo para sua ocorrência. Estes procedimentos são realizados com o uso das telas “Dados de Precipitação” e “Dados de evapotranspiração de referência”. Na Figura 5 é apresentada a tela de entrada de dados de evapotranspiração de referência (ET_0), calculada por meio da equação 25, utilizando os elementos climáticos gerados pelo CLIGEN. Nesta tela, os valores contidos na coluna 1 (ET_1) correspondem aos valores da evapotranspiração de referência (ET_0) ocorridos no ano um. A Figura 6 representa a tela de entrada de dados referentes às características da precipitação, ou seja, valores diários do total precipitado, da duração da precipitação, da intensidade de precipitação padronizada e do tempo de pico. Ainda nesta tela deve-se clicar no ícone “ip” para gerar o perfil instantâneo de precipitação (subitem 3.3.1.1.) necessário ao cálculo da infiltração da água no

solo. A Figura 7 representa o perfil instantâneo de precipitação, gerado com os dados referentes ao primeiro dia chuvoso da série sintética.

Dados diários de Evapotranspiração de Referência (mm)

Dia	ET1	ET2	ET3	ET4	ET5	ET6	ET7	ET8
1	2.45	1.39	2.75	1.76	2.45	3.04	2.3	3.32
2	3.22	3.15	2.98	2.51	2.51	2.78	2.43	2.35
3	2.92	2.34	2.9	3.05	2.93	2.13	2.61	3.01
4	1.99	1.51	2.31	2.65	2.79	2.56	2.19	2.88
5	2.25	3.15	1.84	2.06	3.49	2.91	2.66	1.95
6	1.53	3.13	3.42	3.05	1.53	2.69	2.31	3.1
7	2	2.14	3.19	3.17	3.24	1.71	2.23	2.41
8	1.74	2.4	1.97	1.21	2.92	2.96	1.86	3.48
9	2.13	2.09	2.83	2.72	2.39	1.83	2.84	2.02
10	3.71	2.61	2.06	2.39	2.82	2.94	0.7	2.45
11	3	1.89	2.6	3.12	2.48	2.72	2.84	1.85
12	2.52	2.7	2.64	2.98	1.97	2.74	2	2.39

Figura 5 - Tela “Dados de evapotranspiração de referência (ET₀)”.

Padrões de Precipitação

Núm. de dias	Lâmina	Duração	tp	ip
62	0	0	0	0
63	4.6	1.62	0.26	2.08
64	4.7	3.17	0.19	5.42
65	6.2	1.75	0.84	1.86
66	5.2	3.43	0.07	5.26
67	0	0	0	0
68	0	0	0	0
69	6	5.43	0.68	12.61
70	14.7	1.79	0.04	3.21
71	0	0	0	0
72	0	0	0	0
73	0	0	0	0
74	0	0	0	0

Figura 6 - Tela “Dados de precipitação, duração da precipitação, intensidade de precipitação padronizada e tempo de pico padronizado”.

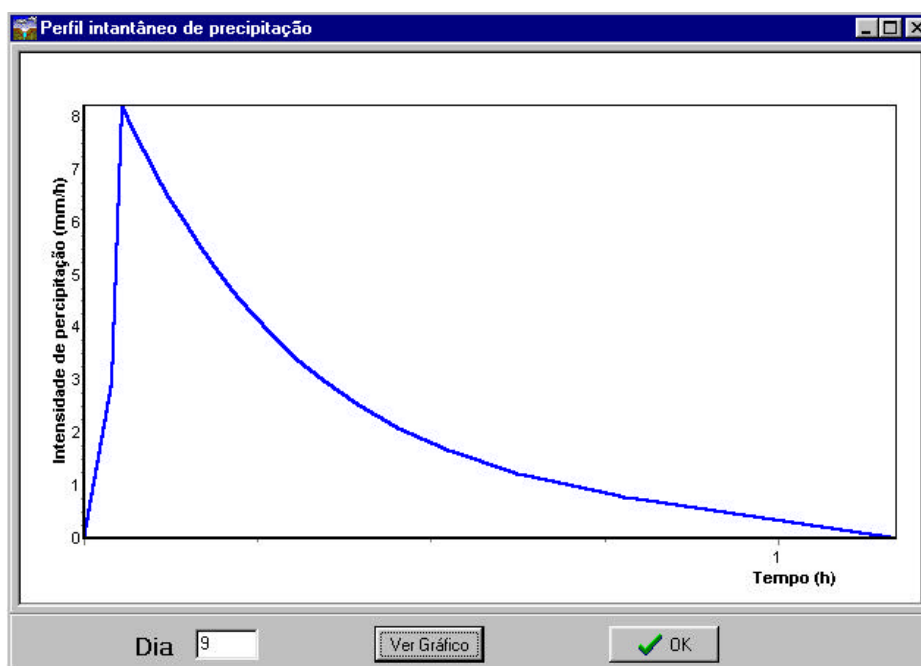


Figura 7 - Perfil instantâneo de precipitação, gerado utilizando-se os valores das características da precipitação ocorrida no primeiro dia chuvoso da série.

Os arquivos contendo os dados de evapotranspiração de referência e os referentes às características da precipitação devem ser organizados em formato .txt, considerando o dia 1 como sendo o dia 1^o de julho e o dia 365 como sendo o 30^o dia de junho do ano seguinte.

4.1.1.2. Dados relativos ao solo

Quanto às propriedades físicas do solo, os dados de entrada no programa são: θ_s , θ_{cc} , θ_{pm} , θ_{pd} e K_o . São também necessários os parâmetros de entrada do modelo de van Genuchten (1980): θ_r , m , n , β , D_{CI} e θ_0 .

A entrada desses dados é realizada por digitação, diretamente na tela “Dados de solo”, representada na Figura 8. Esta tela já contém dados para vários tipos de solo normalmente encontrados na região de Viçosa, MG. Para a realização de simulações utilizando outros tipos de solo, basta que o usuário selecione a opção “outros” no campo “Tipos de solo” presente na tela.

A tabela de fluxo ascendente máximo (subitem 3.3.4.) pode ser gerada por meio dos dados fornecidos ou digitados. Neste caso deve-se ativar o botão

“Digitar”, do campo “Fluxo ascendente máximo”. A Figura 9 representa a tabela contendo os valores de fluxo ascendente máximo gerados para o solo podzólico vermelho amarelo - Leopoldina.

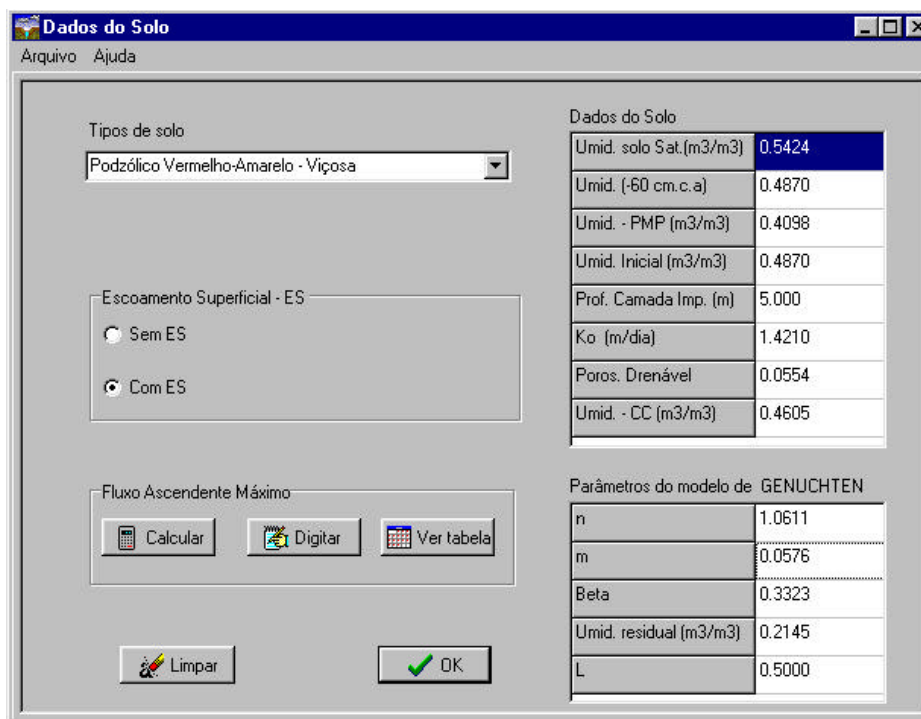


Figura 8 - Tela “Dados do solo”.

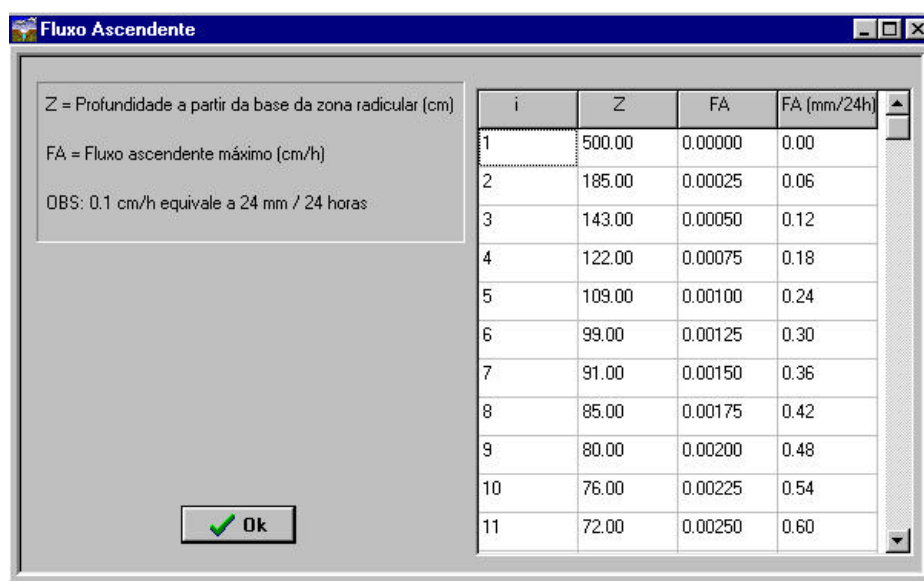


Figura 9 - Valores de fluxo ascendente máximo, gerados para o solo podzólico vermelho amarelo – Leopoldina.

4.1.1.3. Dados relativos ao sistema de drenagem

A tela apresentada na Figura 10 corresponde à entrada de dados referente ao sistema de drenagem. As simulações podem ser realizadas considerando sistemas de drenagem constituídos por drenos abertos de seção trapezoidal ou fechados. Quando o sistema de drenagem é composto por drenos abertos, deve-se fornecer os dados relativos à geometria da seção transversal do dreno, ou seja, a base menor e a declividade do talude e, no caso de sistema de drenagem fechado, deve-se fornecer o valor do raio efetivo dos drenos.

São também requeridos os valores de profundidade de instalação dos drenos e do espaçamento inicial entre estes.

A imagem mostra uma janela de software intitulada "Dados do Sistema de Drenagem". No topo, há uma barra de menu com o texto "Arquivo". O conteúdo principal da janela contém os seguintes elementos:

- Um campo de entrada para "Espaçamentos inicial entre drenos (m)" com o valor "40.0".
- Um campo de entrada para "Profundidades dos drenos (m)" com o valor "1.20".
- Um campo de entrada para "Raio efetivo dos drenos (m)" com o valor "0.05".
- Um grupo de botões para "Tipo de Dreno" com duas opções: "Drenos abertos" (selecionada com um botão de rádio) e "Drenos cobertos" (desselecionada).
- Um campo de entrada para "Base Menor (m)" com o valor "0.50".
- Um campo de entrada para "Declividade do Talude" com o valor "0.75:1".

Na base da janela, há três botões: "Confirmar", "OK" (com um ícone de seta verde) e "Limpar" (com um ícone de borracha).

Figura 10 - Tela “Dados do sistema de drenagem”.

4.1.1.4. Dados relativos à cultura

Os dados referentes à cultura são a profundidade do sistema radicular, os coeficientes de cultura (K_c) para as diferentes fases de desenvolvimento da cultura e o somatório do excesso de água no solo acima da profundidade de 30

cm (SEW_{30} - experimental). A Figura 11 representa a tela de entrada desses dados. Esta tela já contém dados para algumas culturas. A exemplo do tipo de solo, caso o usuário queira trabalhar com outras culturas, basta selecionar a opção “Outros”, no campo “Tipos de cultura”.

Coeficientes de cultura (Kc)	
Fase	Kc
Inicial	0.40
Desenvolvimento	0.70
Intermediária	1.05
Final	0.80

Figura 11 - Tela “Dados referentes à cultura”.

4.1.1.5. Resultados fornecidos pelo programa computacional

Após o preenchimento das telas de entrada de dados, o programa realiza os cálculos clicando-se no ícone processar, da tela principal do programa.

Na Figura 12 é apresentada a tela referente aos resultados fornecidos pelo programa computacional, indicando o espaçamento recomendável entre drenos para o valor experimental de SEW_{30} , relacionado com uma produtividade da cultura próxima de 100%. Nesta tela são também apresentadas as informações pertinentes aos tipos de cultura e solo utilizados na simulação.

Resultados

Arquivo Menu Principal

Espaçamento

Espaçamento (m) Profundidade dos drenos (m)

SEW 30 - Calculado (cm-d) SEW 30 - Exper. (cm-d)

Cultura

Cultura Profundidade radicular (cm)

Dia do Plantio Final do ciclo

Solo

Tipo de solo Capacidade de Campo

Ponto de Murcha Permanente Prof. da camada de imp. (m)

Figura 12 - Tela “Resultados”.

4.1.4.5.1. Gráficos

A tela “Gráficos de variáveis”, mostrada na Figura 13, apresenta, graficamente, as variáveis relacionadas ao balanço hídrico e à profundidade do lençol freático. Nesta tela, o usuário deve escolher o ano para o qual ele deseja verificar o comportamento de uma determinada variável.

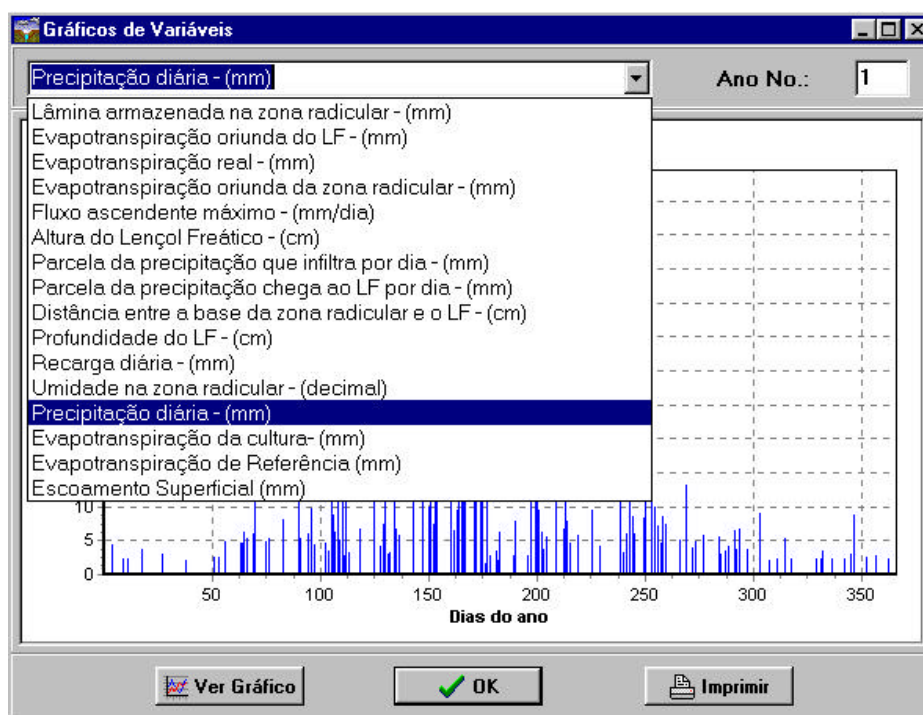


Figura 13 – Tela “Gráficos de variáveis”.

Acessando-se o menu “Gráficos – SEW₃₀” na tela principal do programa, têm-se à disposição as telas que apresentam gráficos relativos aos valores de SEW₃₀ calculados após a simulação.

4.2. Dados climáticos sintéticos

Os resultados obtidos pela geração de séries sintéticas de dados climáticos da região de Viçosa, MG, empregando o CLIGEN e o ajustamento destas séries às séries de dados observados por meio da análise estatística são apresentados a seguir.

4.2.1. Número de dias chuvosos

Os valores médios mensais do número de dias chuvosos, os respectivos desvios-padrão dos valores observados e gerados pelo CLIGEN, as variações percentuais dos valores gerados em relação aos valores observados e o valor médio destas variações encontram-se no Quadro 4.

Verifica-se, no Quadro 4, que, em julho, a média mensal gerada pelo CLIGEN superestimou os dados observados em 13,6% e em outubro a média mensal observada foi superestimada em 9,7%. Com relação aos desvios-padrão, em maio foi observada uma subestimativa igual a 44,4%, seguido do mês de janeiro, com uma subestimativa de 42,7%. O VMVP das médias mensais foi igual a 4,7%, demonstrando que o modelo CLIGEN estimou o número de dias chuvosos com boa precisão.

O número médio de dias chuvosos para cada um dos meses do ano (\bar{N}_W) observados e gerado pelo CLIGEN encontra-se na Figura 14. Pela comparação dos resultados gerados, verifica-se que as maiores variações percentuais ocorreram em julho e outubro.

Quadro 4 - Valores médios mensais do número de dias chuvosos (NW) e os respectivos desvios-padrão (s) dos valores observados e gerados pelo CLIGEN, variações percentuais (δ) em relação aos valores observados e o valor médio das variações percentuais (VMVP) para a região de Viçosa, MG.

Meses	Observado		CLIGEN			
	NW	s	NW	δ	s	δ
	(dias)	(dias)	(dias)	%	(dias)	%
Jan	17,0	5,5	16,4	-3,8	3,2	-42,7
Fev	12,1	3,9	12,2	0,2	3,4	-12,2
Mar	13,6	5,4	14,2	4,9	3,4	-36,6
Abr	9,7	3,7	9,6	-0,5	2,9	-23,2
Mai	9,0	5,1	8,5	-5,6	2,8	-44,4
Jun	6,5	5,0	6,7	3,3	2,9	-41,4
Jul	5,3	4,6	6,0	13,6	3,0	-34,2
Ago	5,0	3,3	5,4	7,8	2,1	-36,1
Set	7,7	4,7	7,8	0,9	3,0	-36,4
Out	13,1	4,1	14,3	9,7	3,4	-17,6
Nov	16,2	3,6	16,0	-1,5	2,4	-32,5
Dez	19,0	3,7	18,1	-4,7	3,8	3,3
VMVP				4,7		30,0

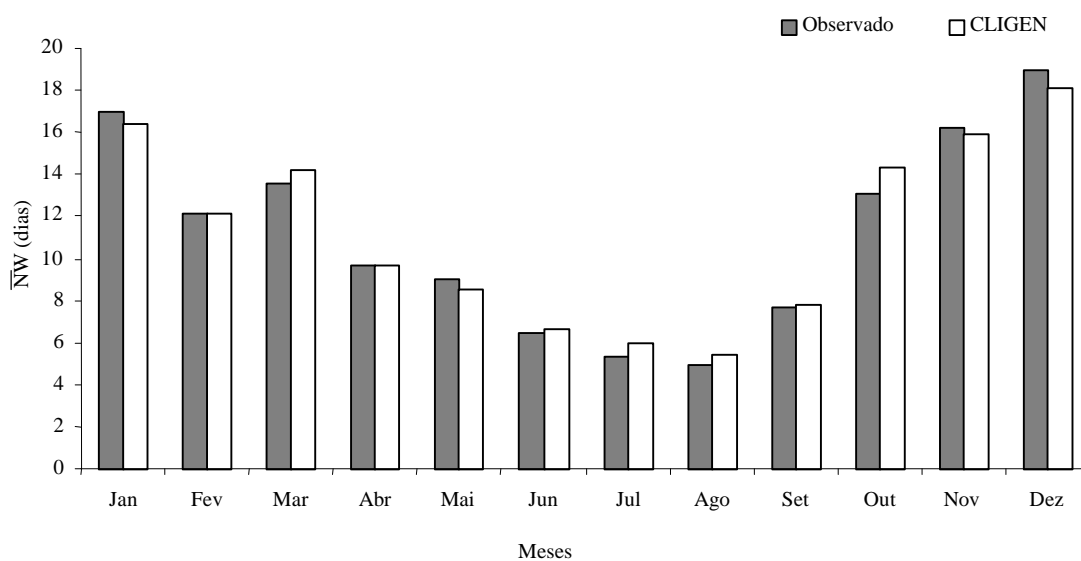


Figura 14 - Número de dias chuvosos, observados e gerados pelo CLIGEN, para cada um dos meses do ano, no período de 1972 a 2003, em Viçosa, MG.

Na Figura 15 encontra-se a relação entre os valores observados e os gerados pelo CLIGEN. A Figura mostra, ainda, as barras de erros, que indicam o intervalo de confiança associado ao nível de significância de 95% para cada

ponto de correspondência entre os valores observados e gerados pelo CLIGEN, nos meses do ano. A linha de equivalência ($X = Y$) representa uma condição de igualdade entre os valores observados e gerados.

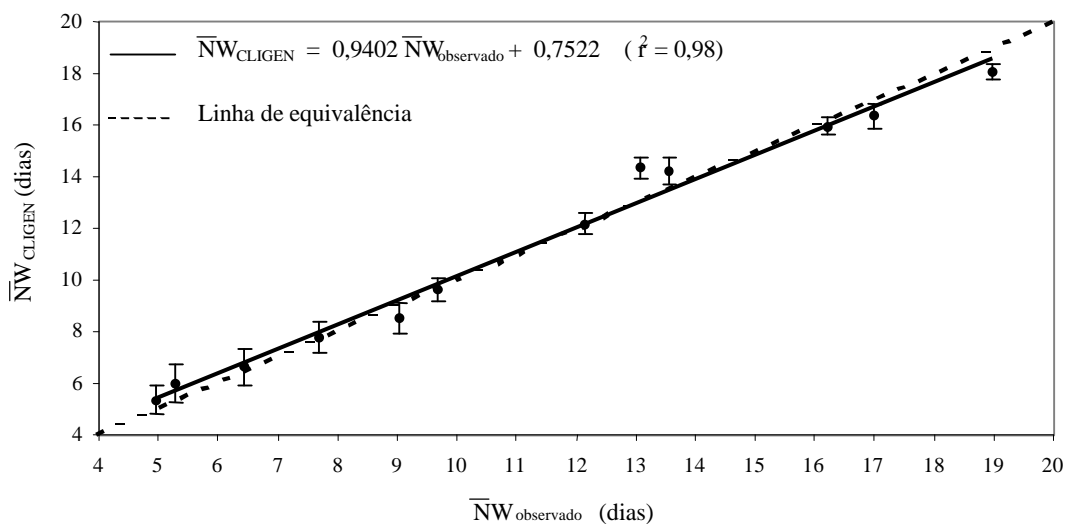


Figura 15 - Relação entre os valores observados e gerados pelo CLIGEN para o número médio de dias com precipitação (\bar{NW}), e o intervalo de confiança associado a um nível de significância de 95%.

O ajustamento da equação de regressão aos dados observados, realizado com o CLIGEN, pode ser considerado bom, ou seja, declividade $a = 0,9402$, $r^2 = 0,98$, e coeficiente linear $b = 0,7522$.

4.2.2. Probabilidades condicionais da cadeia de Markov

4.2.2.1. Probabilidade de um dia ser chuvoso, tendo sido o dia anterior chuvoso

Os valores médios mensais da probabilidade de um dia ser chuvoso tendo sido o anterior chuvoso e dos respectivos desvios-padrão dos valores observados e os gerados pelo CLIGEN, as variações percentuais dos valores gerados em relação aos valores observados e o valor médio destas variações encontram-se no Quadro 5.

Quadro 5 - Valores médios mensais da probabilidade de um dia ser chuvoso tendo sido o anterior chuvoso (P(W/W)) e os respectivos desvios-padrão (s) dos valores observados e gerados pelo CLIGEN, variações percentuais (δ) em relação aos valores observados e o valor médio das variações percentuais (VMVP) para a região de Viçosa, MG.

Meses	Observado		CLIGEN			
	P(W/W)	s	P(W/W)	δ	s	δ
	(decimal)	(decimal)	(decimal)	%	(decimal)	%
Jan	0,69	0,15	0,68	-1,4	0,11	-26,7
Fev	0,59	0,18	0,60	1,7	0,16	-11,1
Mar	0,56	0,18	0,59	5,4	0,13	-27,8
Abr	0,41	0,14	0,40	-2,4	0,18	28,6
Mai	0,36	0,17	0,32	-11,1	0,17	0,0
Jun	0,29	0,25	0,33	13,8	0,19	-24,0
Jul	0,27	0,25	0,26	-3,7	0,27	8,0
Ago	0,28	0,24	0,22	-21,4	0,18	-25,0
Set	0,38	0,23	0,38	0,0	0,19	-17,4
Out	0,55	0,14	0,59	7,3	0,14	0,0
Nov	0,63	0,11	0,63	0,0	0,09	-18,2
Dez	0,71	0,09	0,69	-2,8	0,13	44,4
VMVP				5,9		19,3

Verificou-se que as variações percentuais entre os resultados obtidos utilizando o CLIGEN e os valores observados apresentaram amplitude de variação de -21,4% para o mês de agosto a 13,8% para o mês de junho. Os desvios-padrão calculados pelo CLIGEN apresentaram, em média, variações percentuais de 19,3%, em relação aos valores observados.

As probabilidades de um dia ser chuvoso tendo sido o anterior chuvoso P(W/W) observadas e geradas pelo CLIGEN são apresentados na Figura 16. Comparando-se os resultados gerados com os valores observados, verifica-se que as maiores variações percentuais ocorreram em junho e agosto. Em junho, a média mensal gerada pelo CLIGEN subestimou os dados observados em 21,4% e, em agosto, a média mensal observada foi superestimada em 13,8%. Com relação aos desvios-padrão, no mês de dezembro observou-se uma superestimativa de 44,4% e no do mês de fevereiro, de 28,6%.

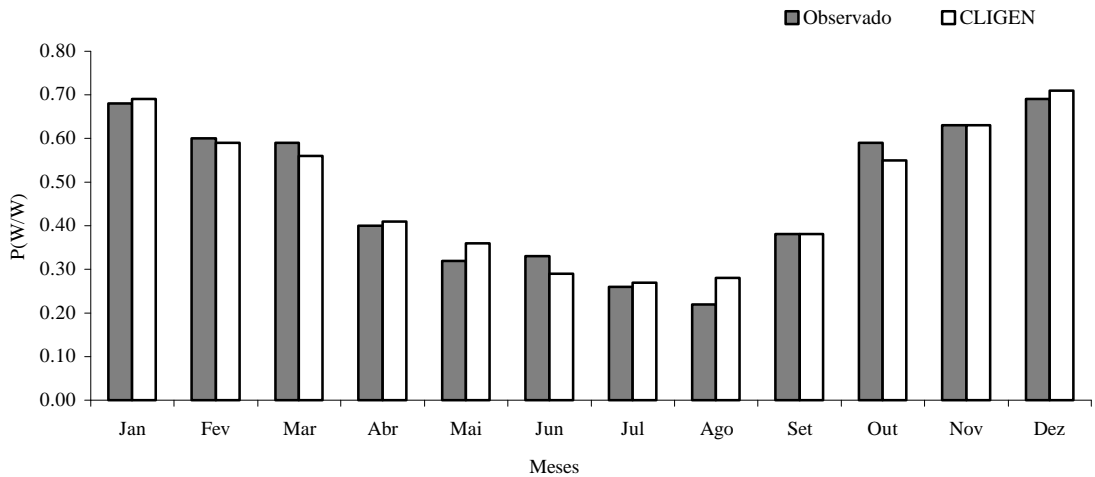


Figura 16 - Distribuição mensal da probabilidade de um dia ser chuvoso tendo sido o anterior chuvoso ($P(W/W)$), para o período de 1972 a 2003, em Viçosa, MG.

A Figura 17 mostra a relação entre os valores observados e os gerados pelo CLIGEN. O coeficiente de determinação igual a 0,97 indica que, apesar das diferenças observadas em alguns meses, houve alta correlação entre os valores observados e os gerados.

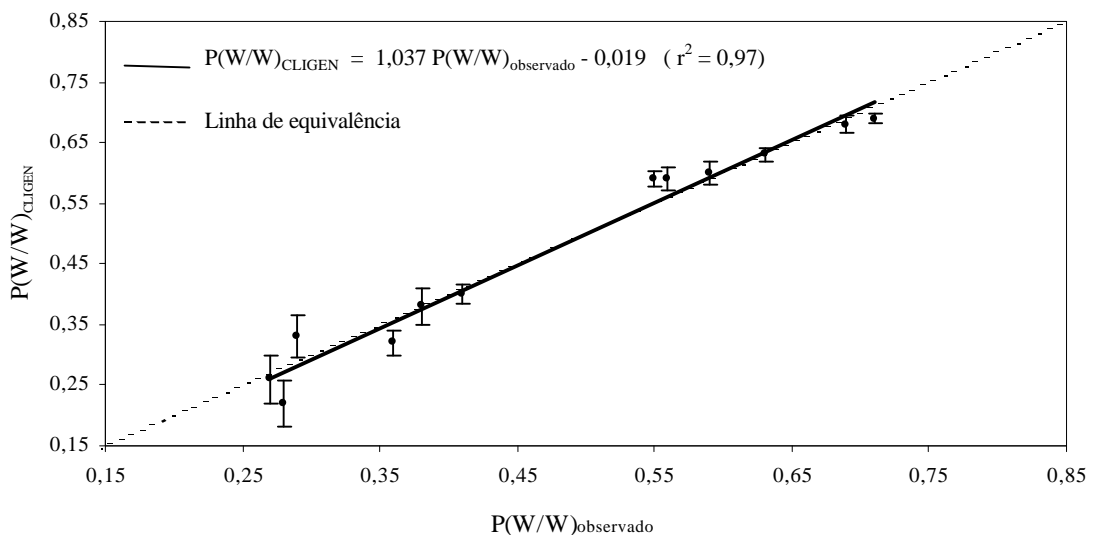


Figura 17 - Relação entre os valores observados e gerados pelo CLIGEN para a probabilidade de um dia ser chuvoso tendo sido o anterior chuvoso $P(W/W)$ e o intervalo de confiança associado a um nível de significância de 95%.

A maioria das barras de erros relativos às médias mensais interceptam as linhas de equivalência e de regressão. Pela análise dos resultados obtidos, evidencia-se que o CLIGEN mostrou bom desempenho ao estimar as probabilidades médias mensais de um dia ser chuvoso tendo sido o anterior chuvoso.

4.2.2.2. Probabilidade de um dia ser chuvoso tendo sido o dia anterior seco

Os resultados relativos aos valores médios mensais da probabilidade de um dia ser chuvoso tendo sido o anterior seco $P(W/D)$ e dos respectivos desvios-padrão dos valores gerados pelo CLIGEN. As variações percentuais em relação aos valores observados e o valor médio destas variações encontram-se no Quadro 6.

Quadro 6 - Valores médios mensais da probabilidade de um dia ser chuvoso tendo sido o anterior seco ($P(W/D)$) e os respectivos desvios-padrão (s) dos valores observados e gerados pelo CLIGEN, variações percentuais (δ) em relação aos valores observados e o valor médio das variações percentuais (VMVP) para a região de Viçosa, MG.

Meses	Observado		CLIGEN			
	$P(W/D)$ (decimal)	s (decimal)	$P(W/D)$ (decimal)	δ %	s (decimal)	δ %
Jan	0,38	0,18	0,37	-2,6	0,10	-44,4
Fev	0,31	0,12	0,30	-3,2	0,11	-8,3
Mar	0,34	0,17	0,35	2,9	0,13	-23,5
Abr	0,29	0,12	0,29	0,0	0,11	-8,3
Mai	0,28	0,17	0,26	-7,1	0,10	-41,2
Jun	0,20	0,14	0,19	-5,0	0,10	-28,6
Jul	0,17	0,13	0,18	5,9	0,07	-46,2
Ago	0,15	0,08	0,16	6,7	0,06	-25,0
Set	0,22	0,12	0,22	0,0	0,10	-16,7
Out	0,34	0,13	0,34	0,0	0,11	-15,4
Nov	0,42	0,14	0,43	2,4	0,11	-21,4
Dez	0,47	0,19	0,44	-6,4	0,14	-26,3
VMVP				3,5		25,4

A média das variações percentuais entre os resultados obtidos utilizando-se o CLIGEN e os valores observados foi 3,5% e os desvios-padrão apresentaram, em média, uma variação de 25,4% em relação aos valores observados.

Os valores de $P(W/D)$ observados, bem como os valores gerados pelo CLIGEN, são apresentados na Figura 18. Em maio, a média mensal gerada pelo CLIGEN subestimou os valores observados em 7,1% e em dezembro 6,4%.

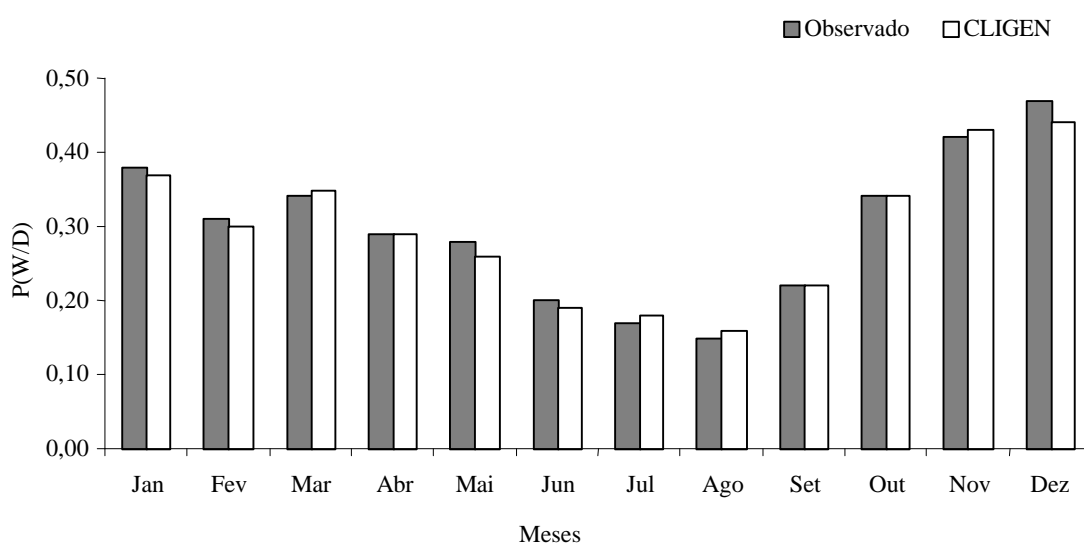


Figura 18 - Distribuição mensal da probabilidade de um dia ser chuvoso tendo sido o anterior seco $P(W/D)$ para o período de 1972 a 2003, em Viçosa, MG.

Pela análise de regressão entre o $P(W/D)_{CLIGEN}$ e o $P(W/D)_{observado}$ (Figura 19) observa-se alta correlação entre os valores observados e os gerados pelo CLIGEN.

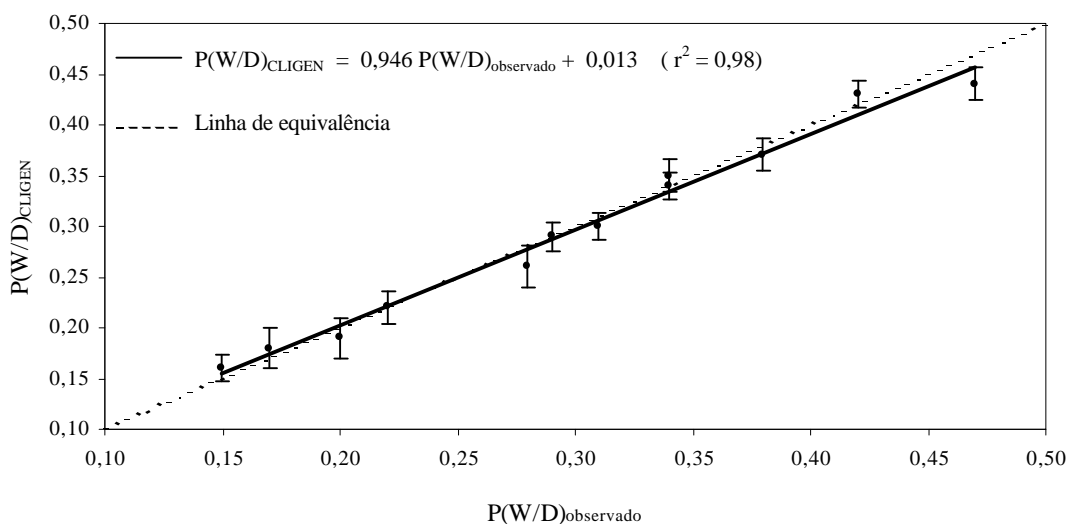


Figura 19 - Relação entre os valores observados e gerados pelo CLIGEN para a probabilidade de um dia ser chuvoso tendo sido o anterior seco $P(W/D)$ e o intervalo de confiança associado a um nível de significância de 95%.

4.2.3. Precipitação total diária

Os resultados relativos aos valores médios mensais da precipitação total diária e dos respectivos desvios-padrão dos valores gerados pelo CLIGEN, as variações percentuais em relação aos valores observados e o valor médio destas variações encontram-se no Quadro 7.

Pelos resultados, pode-se destacar que as médias mensais geradas pelo CLIGEN apresentaram pequenas variações em relação aos valores observados, apresentando uma variação média de 2,3% e os desvios-padrão apresentaram, em média, variações percentuais de 7,7%. Os valores observados de precipitação total diária são apresentados na Figura 20.

Quadro 7 - Valores médios mensais da precipitação total diária (P) e os respectivos desvios-padrão (s) dos valores observados e gerados pelo CLIGEN, variações percentuais (δ) em relação aos valores observados e o valor médio das variações percentuais (VMVP) para a região de Viçosa, MG.

Meses	Observado		CLIGEN			
	P (mm)	s (mm)	P (mm)	δ %	s (mm)	δ %
Jan	12,44	12,55	12,40	-0,3	11,91	-5,1
Fev	9,28	8,81	9,21	-0,8	8,45	-4,1
Mar	10,11	9,31	10,18	0,7	9,39	0,9
Abr	6,61	5,57	6,55	-0,9	5,91	6,1
Mai	4,15	3,54	3,91	-5,8	3,81	7,6
Jun	3,16	1,87	3,08	-2,5	2,10	12,3
Jul	3,48	2,36	3,31	-4,9	1,71	-27,5
Ago	3,16	1,83	2,95	-6,6	1,55	-15,3
Set	7,69	5,02	7,44	-3,3	4,70	-6,4
Out	8,62	7,71	8,64	0,2	7,84	1,7
Nov	12,72	12,93	12,86	1,1	12,40	-4,1
Dez	13,45	14,12	13,52	0,5	14,25	0,9
VMVP				2,3		7,7

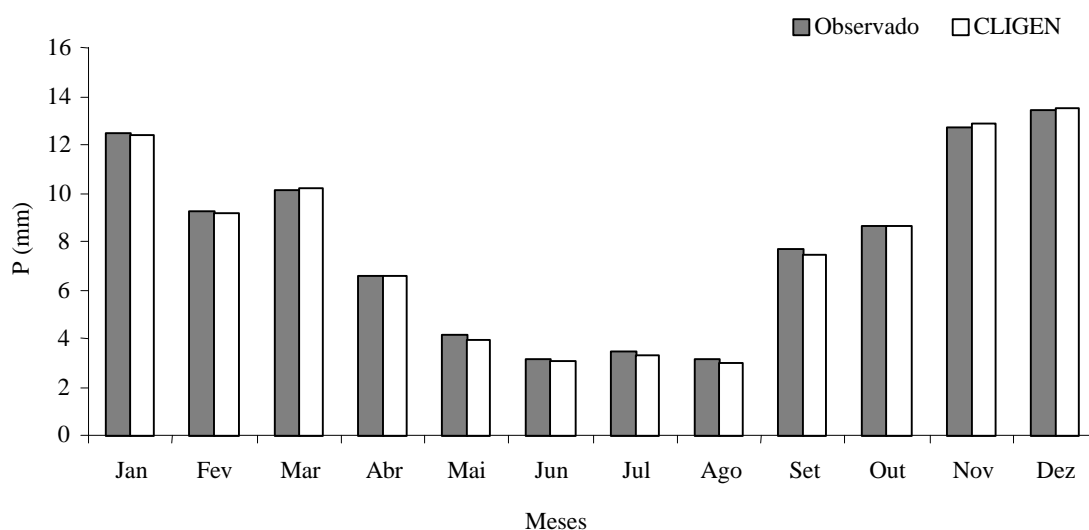


Figura 20 - Distribuição mensal da precipitação total diária (P), para o período de 1972 a 2003, em Viçosa, MG.

A Figura 21 mostra a relação entre os valores observados e os gerados pelo CLIGEN. O coeficiente de determinação igual a 0,99 indica alta correlação entre os valores observados e os gerados pelo modelo. Este resultado é confirmado pelas barras de erros que interceptam, simultaneamente, as linhas de equivalência e de regressão.

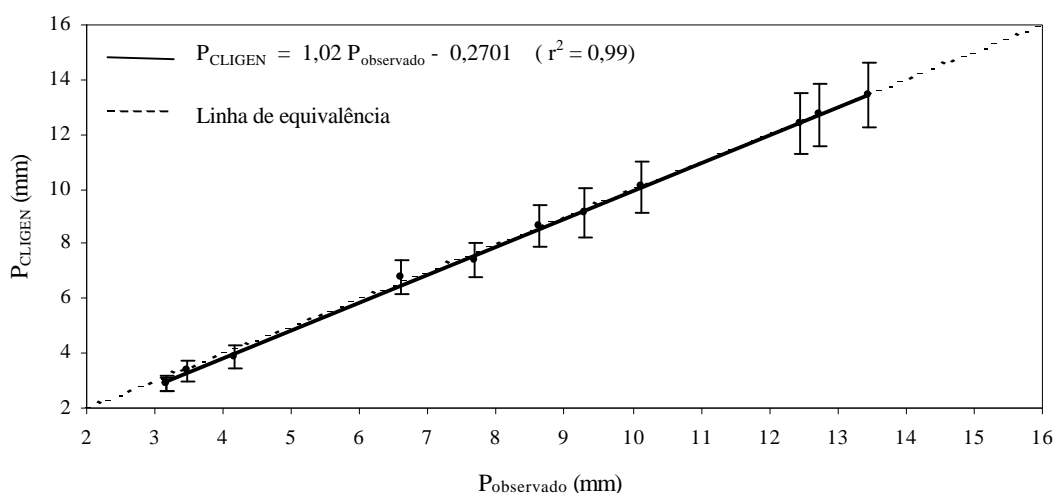


Figura 21 - Relação entre os valores observados e gerados pelo CLIGEN para a precipitação total diária (P) e o intervalo de confiança associado a um nível de significância de 95%.

4.2.4. Duração da precipitação, intensidade máxima de precipitação padronizada e tempo de ocorrência padronizado da intensidade máxima

Os resultados relativos aos valores médios mensais da duração dos eventos diários de precipitação, da intensidade máxima de precipitação padronizada, do tempo de sua ocorrência e dos respectivos desvios-padrão dos valores gerados pelo CLIGEN, as variações percentuais em relação aos valores observados e o valor médio destas variações encontram-se nos Quadros 8, 9 e 10, respectivamente.

Quadro 8 - Valores médios mensais da duração dos eventos diários de precipitação (D_{ip}) e os respectivos desvios-padrão (s) dos valores observados e gerados pelo CLIGEN, variações percentuais (δ) em relação aos valores observados e o valor médio das variações percentuais (VMVP) para a região de Viçosa, MG.

Meses	Observado		CLIGEN			
	D_{ip} (h)	s (h)	D_{ip} (h)	δ %	s (h)	δ %
Jan	3,94	4,49	2,57	-34,7	1,49	-66,7
Fev	2,53	3,23	1,71	-32,5	0,94	-70,8
Mar	3,20	3,89	2,06	-35,7	1,24	-68,1
Abr	1,98	2,33	1,68	-15,4	0,96	-58,8
Mai	1,74	2,17	1,35	-22,8	0,70	-67,6
Jun	1,38	1,80	1,30	-5,5	0,72	-60,2
Jul	2,93	3,23	1,58	-46,2	0,91	-71,7
Ago	1,89	2,21	1,27	-32,9	0,65	-70,4
Set	2,97	3,08	2,20	-26,1	1,19	-61,3
Out	2,69	3,60	1,93	-28,3	1,12	-69,0
Nov	3,32	3,86	2,76	-16,8	1,50	-61,2
Dez	3,37	3,98	2,86	-15,2	1,57	-60,7
VMVP				26,0		65,6

Quadro 9 - Valores médios mensais da intensidade máxima de precipitação padronizada (i_p) e os respectivos desvios-padrão (s) dos valores observados e gerados pelo CLIGEN, variações percentuais (δ) em relação aos valores observados e o valor médio das variações percentuais (VMVP) para a região de Viçosa, MG.

Meses	Observado		CLIGEN			
	i_p (decimal)	s (decimal)	i_p (decimal)	δ %	s (decimal)	δ %
Jan	5,37	4,90	5,68	5,7	4,77	-2,6
Fev	4,51	3,47	5,43	20,5	4,54	30,9
Mar	5,03	2,95	5,27	4,7	4,45	50,8
Abr	4,41	2,89	6,18	40,2	5,56	92,5
Mai	4,38	2,40	5,48	25,1	4,33	80,6
Jun	3,51	1,93	5,34	52,1	3,83	98,7
Jul	5,38	3,00	5,45	1,3	4,16	38,5
Ago	4,11	2,97	5,20	26,6	3,75	26,3
Set	4,59	2,21	5,99	30,4	4,44	100,7
Out	4,34	2,81	5,74	32,2	5,19	84,5
Nov	4,34	2,68	5,24	20,8	4,21	57,1
Dez	5,12	2,79	5,46	6,7	4,63	65,8
VMVP				22,2		60,8

Quadro 10 - Valores médios mensais do tempo até a ocorrência da intensidade máxima instantânea de precipitação padronizado (t_p) e os respectivos desvios-padrão (s) dos valores observados e gerados pelo CLIGEN, variações percentuais (δ) em relação aos valores observados e o valor médio das variações percentuais (VMVP) para a região de Viçosa, MG.

Meses	Observado		CLIGEN			
	\bar{t}_p (decimal)	s (decimal)	\bar{t}_p (decimal)	δ %	s (decimal)	δ %
Jan	0,34	0,26	0,33	-2,9	0,25	-3,8
Fev	0,36	0,24	0,32	-11,1	0,25	4,2
Mar	0,34	0,27	0,35	2,9	0,25	-7,4
Abr	0,39	0,25	0,33	-15,4	0,25	0,0
Mai	0,37	0,26	0,34	-8,1	0,27	3,8
Jun	0,39	0,27	0,35	-10,3	0,25	-7,4
Jul	0,39	0,28	0,33	-15,4	0,26	-7,1
Ago	0,37	0,24	0,33	-10,8	0,25	4,2
Set	0,35	0,26	0,32	-8,6	0,24	-7,7
Out	0,37	0,25	0,33	-10,8	0,25	0,0
Nov	0,37	0,26	0,34	-8,1	0,26	0,0
Dez	0,38	0,26	0,34	-10,5	0,26	0,0
VMVP				9,6		3,8

Nota-se, de maneira geral, que os valores de duração dos eventos de precipitação e da intensidade máxima de precipitação padronizada gerados pelo CLIGEN apresentaram grandes variações percentuais em relação aos valores observados, tanto para as médias mensais quanto para os desvios-padrão. No entanto, os valores gerados do tempo padronizado para a ocorrência da intensidade máxima de precipitação apresentaram pequenas variações percentuais em relação aos valores observados.

Nas Figuras 22 a 24 são apresentados os valores observados e gerados pelo CLIGEN, da duração dos eventos diários de precipitação, da intensidade máxima de precipitação padronizada e do tempo padronizado para sua ocorrência. Considerando os resultados gerados com os observados, verifica-se que as variações percentuais para a média e o desvio padrão da duração da precipitação foram de 26% e 65,6%, da intensidade máxima de precipitação padronizada de 22,2% e 61% e do tempo de ocorrência da intensidade máxima padronizado de 9,6% e 3,8%.

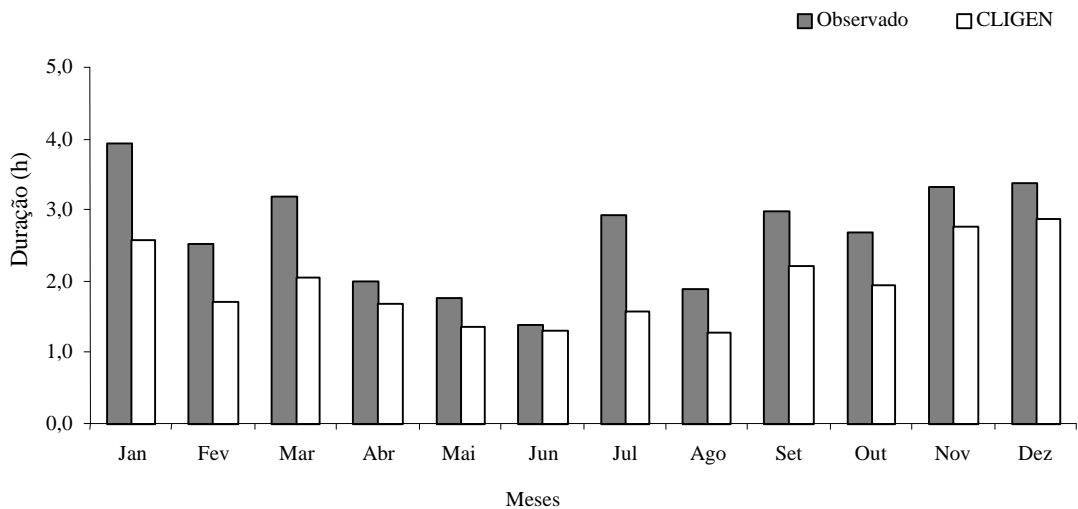


Figura 22 - Distribuição mensal da duração dos eventos diários de precipitação, para o período de 1972 a 2003, em Viçosa, MG.

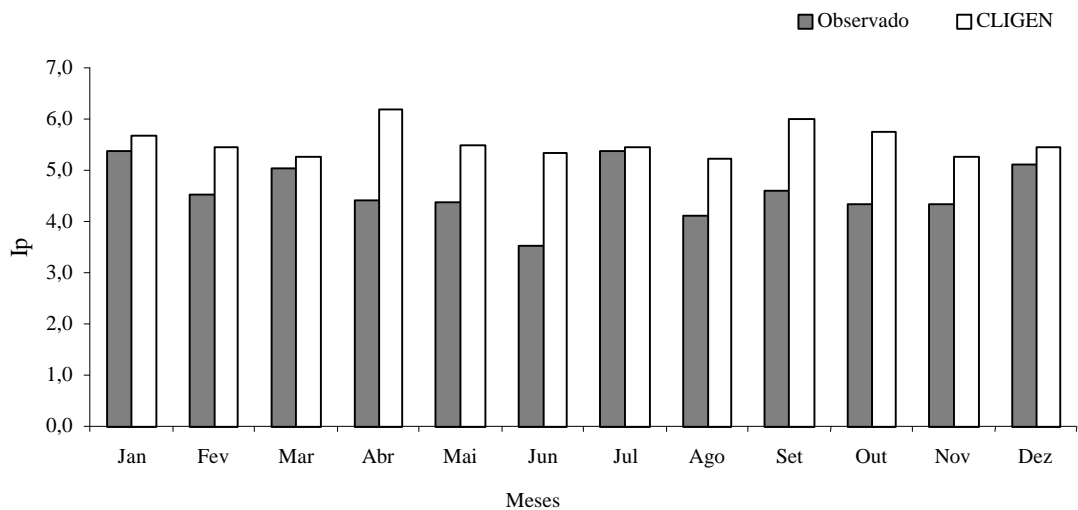


Figura 23 - Distribuição mensal da intensidade máxima de precipitação padronizada (i_p), para o período de 1972 a 2003, em Viçosa, MG.

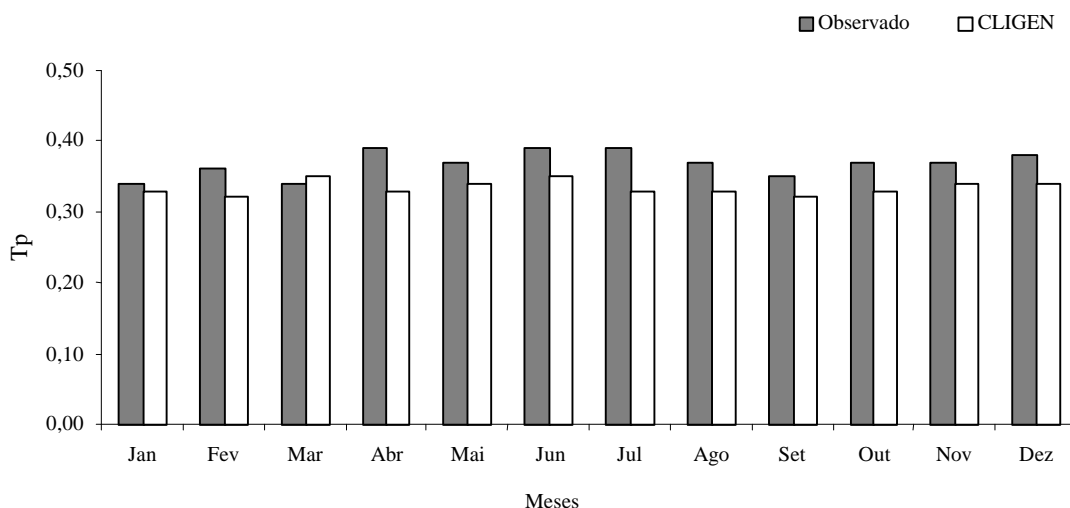


Figura 24 - Distribuição mensal do tempo de ocorrência da intensidade máxima de precipitação padronizada (T_p), para o período de 1972 a 2003, em Viçosa, MG.

4.2.5. Temperaturas máxima, mínima e do ponto de orvalho

Os resultados relativos aos valores médios mensais das temperaturas máxima, mínima e do ponto de orvalho, e dos respectivos desvios-padrão dos valores gerados pelo CLIGEN, as variações percentuais em relação aos valores observados e o valor médio dessas variações encontram-se nos Quadros 11, 12 e 13.

Percebe-se, de maneira geral, que os valores de temperaturas gerados pelo CLIGEN apresentam pequenas variações percentuais em relação aos valores observados, tanto para as médias mensais quanto para os desvios-padrão. Com relação às médias mensais, as temperaturas máximas, mínimas e do ponto de orvalho apresentaram variações percentuais de 0,10%, 0,23% e 0,52%, respectivamente e os desvios-padrão, apresentaram variações médias de 1,64%, 1,4%, e 20%, respectivamente.

Quadro 11 - Valores médios mensais da temperatura máxima do ar (T_x) e os respectivos desvios-padrão (s) dos valores observados e gerados pelo CLIGEN, variações percentuais (δ) em relação aos valores observados e o valor médio das variações percentuais (VMVP) para a região de Viçosa, MG.

Meses	Observado		CLIGEN			
	T_x ($^{\circ}\text{C}$)	s ($^{\circ}\text{C}$)	T_x ($^{\circ}\text{C}$)	δ %	s ($^{\circ}\text{C}$)	δ %
Jan	28,42	2,52	28,45	0,11	2,51	-0,40
Fev	29,15	1,98	29,13	-0,07	1,94	-2,02
Mar	28,47	2,01	28,48	0,04	1,99	-1,00
Abr	26,64	2,19	26,63	-0,04	2,14	-2,28
Mai	25,04	2,21	25,06	0,08	2,24	1,36
Jun	24,03	2,22	24,06	0,12	2,23	0,45
Jul	23,86	2,38	23,83	-0,13	2,36	-0,84
Ago	25,04	3,57	25,01	-0,12	3,23	-9,52
Set	25,42	3,44	25,38	-0,16	3,46	0,58
Out	26,47	3,45	26,40	-0,26	3,46	0,29
Nov	27,02	3,17	27,03	0,04	3,15	-0,63
Dez	27,49	2,72	27,47	-0,07	2,73	0,37
VMVP				0,10		1,64

Quadro 12 - Valores médios mensais da temperatura mínima do ar (T_n) e os respectivos desvios-padrão (s) dos valores observados e gerados pelo CLIGEN, variações percentuais (δ) em relação aos valores observados e o valor médio das variações percentuais (VMVP) para a região de Viçosa, MG.

Meses	Observado		CLIGEN			
	T_n ($^{\circ}\text{C}$)	s ($^{\circ}\text{C}$)	T_n ($^{\circ}\text{C}$)	δ %	s ($^{\circ}\text{C}$)	δ %
Jan	18,21	1,28	18,18	-0,16	1,28	0,00
Fev	18,20	1,28	18,20	0,00	1,28	0,00
Mar	17,76	1,43	17,75	-0,06	1,43	0,00
Abr	16,02	2,12	15,99	-0,19	2,12	0,00
Mai	13,31	2,43	13,35	0,30	2,48	2,06
Jun	10,98	2,57	10,99	0,09	2,68	4,28
Jul	10,43	2,48	10,37	-0,58	2,46	-0,81
Ago	11,51	2,50	11,47	-0,35	2,55	2,00
Set	13,86	2,43	13,87	0,07	2,41	-0,82
Out	16,15	1,93	16,07	-0,50	1,96	1,55
Nov	17,40	1,71	17,37	-0,17	1,69	-1,17
Dez	18,09	1,45	18,03	-0,33	1,51	4,14
VMVP				0,23		1,40

Quadro 13 - Valores médios mensais da temperatura do ponto de orvalho (TPO) e os respectivos desvios-padrão (s) dos valores observados e gerados pelo CLIGEN, variações percentuais (δ) em relação aos valores observados e o valor médio das variações percentuais (VMVP) para a região de Viçosa, MG.

Meses	Observado		CLIGEN			
	TPO ($^{\circ}\text{C}$)	s ($^{\circ}\text{C}$)	TPO ($^{\circ}\text{C}$)	δ %	s ($^{\circ}\text{C}$)	δ %
Jan	18,90	1,28	18,88	-0,11	1,83	42,97
Fev	18,92	1,28	18,88	-0,21	1,59	24,22
Mar	18,72	1,43	18,71	-0,05	1,67	16,78
Abr	17,24	2,12	17,17	-0,41	2,04	-3,77
Mai	15,17	2,43	15,05	-0,79	2,15	-11,52
Jun	13,40	2,57	13,29	-0,82	2,32	-9,73
Jul	12,60	2,48	12,52	-0,63	2,31	-6,85
Ago	12,90	2,50	12,82	-0,62	2,75	10,00
Set	14,29	2,43	14,17	-0,84	2,69	10,70
Out	16,19	1,93	16,06	-0,80	2,54	31,61
Nov	17,54	1,71	17,44	-0,57	2,29	33,92
Dez	18,67	1,45	18,59	-0,43	2,00	37,93
VMVP				0,52		20,00

As Figuras 25 a 27 mostram a relação entre os valores das temperaturas máxima, mínima e do ponto de orvalho, observados e gerados pelo CLIGEN. Foi obtido um coeficiente de determinação próximo da unidade para todas as temperaturas, o que indica alta correlação entre os dados observados e os gerados pelo modelo. Este resultado é confirmado pelas barras de erros que interceptam, simultaneamente, as linhas de equivalência e de regressão.

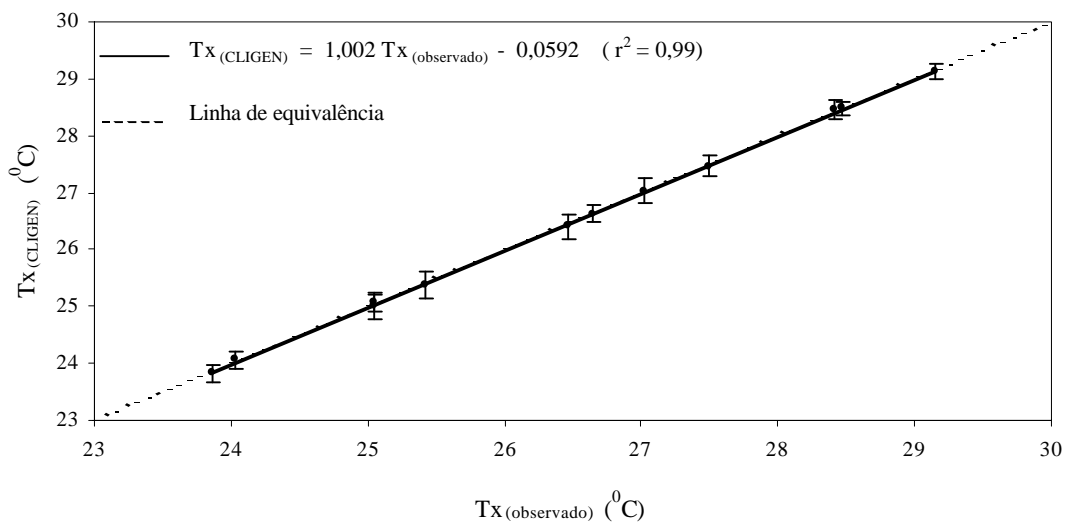


Figura 25 - Relação entre os valores observados e gerados pelo CLIGEN para a temperatura máxima do ar diária (T_x), e o intervalo de confiança associado a um nível de significância de 95%.

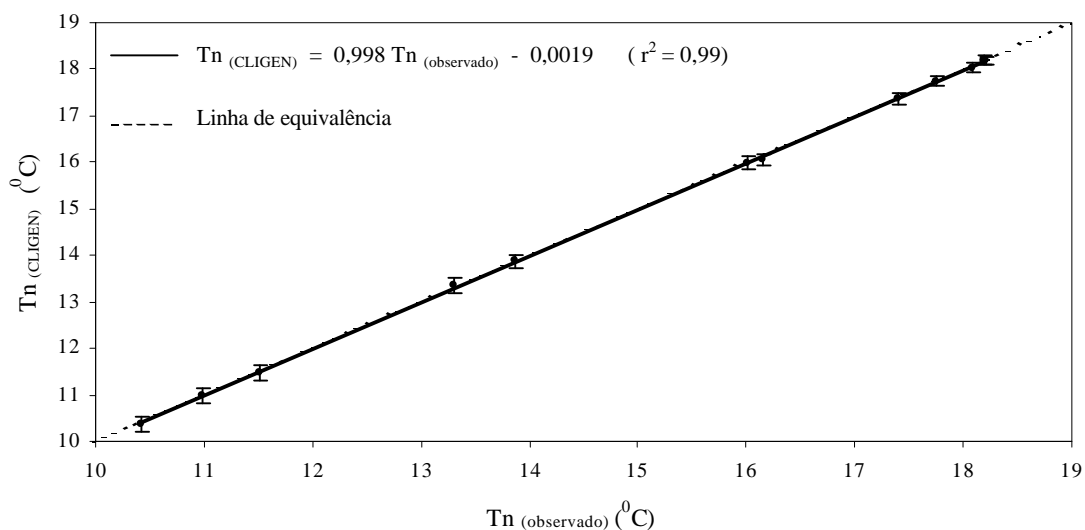


Figura 26 - Relação entre os valores observados e gerados pelo CLIGEN para a temperatura mínima do ar diária (T_x), e o intervalo de confiança associado a um nível de significância de 95%.

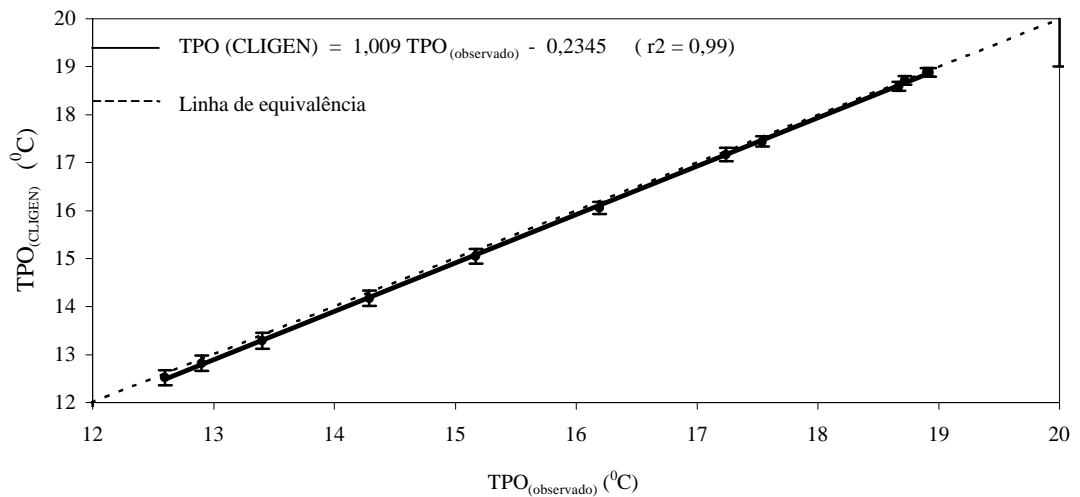


Figura 27 - Relação entre os valores observados e gerados pelo CLIGEN para a temperatura do ponto de orvalho diária (TPO) e o intervalo de confiança associado a um nível de significância de 95%.

4.2.6. Radiação solar e velocidade do vento

Os resultados relativos aos valores médios mensais de radiação solar e velocidade do vento, dos respectivos desvios-padrão dos valores gerados pelo CLIGEN, as variações percentuais em relação aos valores observados e o valor médio dessas variações encontram-se nos Quadros 14 e 15.

A partir da comparação dos resultados gerados pelo CLIGEN com os dados observados, é possível constatar pequenas variações percentuais dos desvios-padrão e das médias mensais de radiação solar e velocidade do vento. Considerando-se os valores médios das variações percentuais (VMVP) obtidos para a radiação solar, verifica-se que o VMVP da média mensal foi de 0,5% e, o do desvio padrão de 10,37%. Para a velocidade do vento verifica-se que o VMVP da média mensal foi de 0,5% e o do desvio padrão, de 1,22%.

Quadro 14 - Valores médios mensais de radiação solar (R_s) e os respectivos desvios-padrão (s) dos valores observados e gerados pelo CLIGEN, variações percentuais (δ) em relação aos valores observados e o valor médio das variações percentuais (VMVP) para a região de Viçosa, MG.

Meses	Observado		CLIGEN			
	R_s (MJ m ⁻² d ⁻¹)	s (MJ m ⁻² d ⁻¹)	R_s (MJ m ⁻² d ⁻¹)	δ %	s (MJ m ⁻² d ⁻¹)	δ %
Jan	20,13	5,66	20,16	0,18	4,93	-12,90
Fev	20,99	5,04	20,93	-0,30	5,01	-0,58
Mar	18,50	4,56	18,38	-0,61	4,50	-1,28
Abr	16,27	3,94	16,13	-0,86	3,83	-2,79
Mai	14,36	3,61	14,26	-0,73	3,36	-6,70
Jun	13,26	3,05	13,18	-0,56	3,15	3,26
Jul	14,12	3,14	14,00	-0,91	3,29	4,60
Ago	15,97	3,99	15,82	-0,99	3,81	-4,49
Set	16,05	5,02	16,03	-0,12	3,97	-20,82
Out	17,28	5,75	17,26	-0,09	4,29	-25,28
Nov	18,43	5,82	18,43	-0,02	4,60	-20,93
Dez	18,73	5,88	18,68	-0,25	4,65	-20,83
VMVP				0,5		10,37

Quadro 15 - Valores médios mensais da velocidade do vento (v) e os respectivos desvios-padrão (s) dos valores observados e gerados pelo CLIGEN, variações percentuais (δ) em relação aos valores observados e o valor médio das variações percentuais (VMVP) para a região de Viçosa, MG.

Meses	Observado		CLIGEN			
	v (m s ⁻¹)	s (m s ⁻¹)	v (m s ⁻¹)	δ %	s (m s ⁻¹)	δ %
Jan	2,00	0,73	2,00	0,0	0,73	0,0
Fev	1,95	0,67	1,96	0,5	0,67	0,0
Mar	1,69	0,69	1,69	0,0	0,71	2,9
Abr	1,52	0,66	1,49	-2,0	0,70	6,1
Mai	1,31	0,63	1,31	0,0	0,62	-1,6
Jun	1,24	0,61	1,22	-1,6	0,62	1,6
Jul	1,36	0,66	1,36	0,0	0,66	0,0
Ago	1,69	0,72	1,70	0,6	0,72	0,0
Set	1,90	0,83	1,89	-0,5	0,82	-1,2
Out	1,94	0,84	1,94	0,0	0,84	0,0
Nov	1,91	0,79	1,90	-0,5	0,78	-1,3
Dez	1,97	0,78	1,96	-0,5	0,78	0,0
VMVP				0,5		1,22

As Figuras 28 e 29 mostram a relação entre os valores de radiação solar e velocidade do vento, observados e os gerados pelo CLIGEN. Observa-se que o CLIGEN forneceu estimativas dessas variáveis altamente correlacionadas com os valores observados ($r^2 = 0,99$). Este resultado é confirmado pelas barras de erros que se interceptam, simultaneamente, as linhas de equivalência e de regressão.

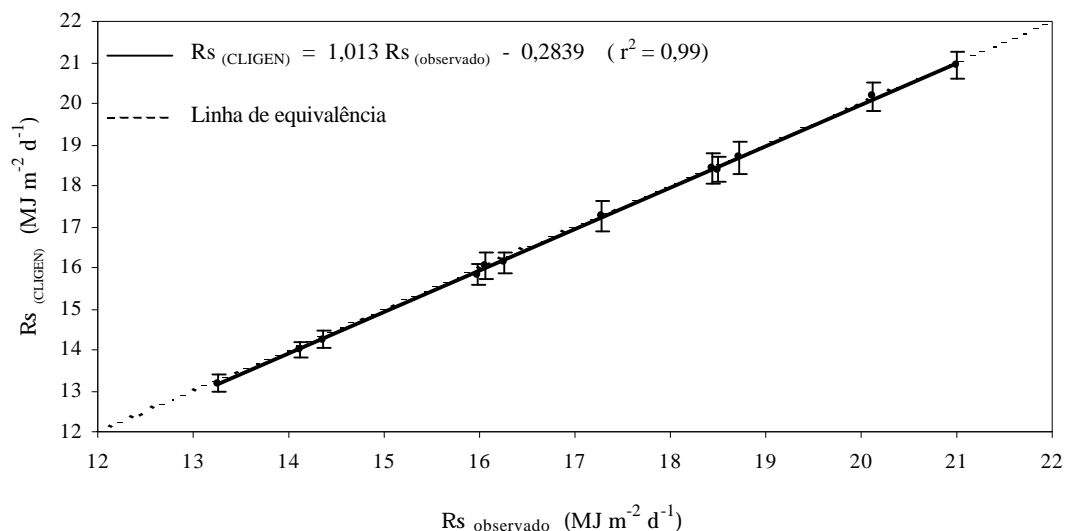


Figura 28 - Relação entre os valores observados e gerados pelo CLIGEN para a radiação solar diária (R_s) e o intervalo de confiança associado a um nível de significância de 95%.

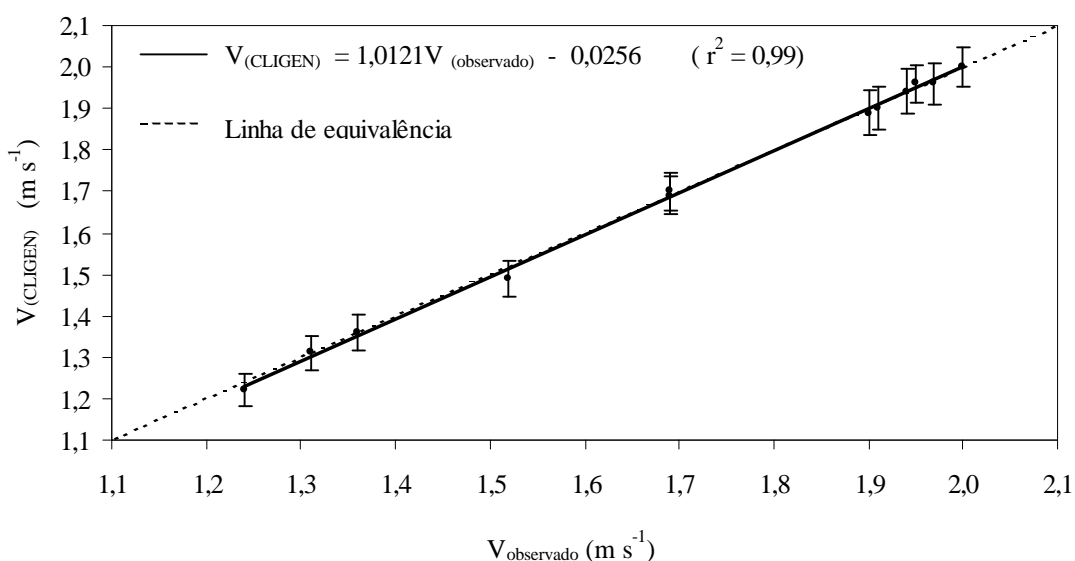


Figura 29 - Relação entre os valores observados e gerados pelo CLIGEN para a velocidade do vento diário (v) e o intervalo de confiança associado a um nível de significância de 95%.

4.2.7. Considerações sobre o modelo CLIGEN

De maneira geral, o modelo CLIGEN apresentou um bom desempenho em estimar os elementos climáticos analisados, como pode ser observado pelo altos índices estatísticos obtidos, mostrando a grande proximidade dos dados gerados com os valores observados na série original. Dessa forma, percebe-se que o modelo CLIGEN pode ser considerado como uma alternativa promissora para geração de séries sintéticas de elementos climáticos de grande importância para o contexto deste trabalho. Por outro lado, estes resultados devem ser confirmados pela realização de estudo em outras localidades de diferentes cenários.

Oliveira (2003) realizou estudo semelhante para algumas localidades situadas no estado do Rio de Janeiro, comparando apenas os dados referentes às características da precipitação, gerados pelo CLIGEN e pelo CLIMABR (Oliveira, 2003), com os dados observados. Naquele trabalho, observou-se também, uma bom desempenho de ambos os modelos, sendo que as principais limitações foram relativas ao desempenho dos modelos ao gerar o perfil de precipitação.

4.3. Avaliação da metodologia com vistas ao dimensionamento e ao manejo de culturas em áreas providas de sistemas de drenagem

Objetivando uma avaliação da metodologia desenvolvida, a análise a seguir foi realizada com base nos resultados obtidos utilizando parte da base de dados apresentada no subitem 3.8.1, na qual utilizaram-se: cultura do milho (profundidade do sistema radicular igual a 1,10 m) com semeadura no dia 8 de outubro (dia 100) e colheita no dia 14 de fevereiro (dia 230), totalizando um ciclo de 130 dias; sistemas de drenagem constituídos por drenos laterais cobertos, instalados a uma profundidade de 1,40 m e diâmetro efetivo de 0,10 m; solo podzólico vermelho amarelo - Leopoldina e série sintética de elementos climáticos, da região de Viçosa, gerados pelo modelo CLIGEN, para um período de 50 anos. O valor do espaçamento entre drenos obtido para o valor

experimental de SEW_{30} , foi 71 m. A seguir são mostrados os resultados referentes ao primeiro ano de simulação.

4.3.1. Valores de precipitação e evapotranspiração de referência

A Figura 30 mostra a distribuição das precipitações geradas pelo CLIGEN, durante o período de junho do primeiro ano simulado a julho do ano seguinte. A precipitação acumulada durante o período foi de 1.106,3 mm e durante o ciclo da cultura de 717 mm.

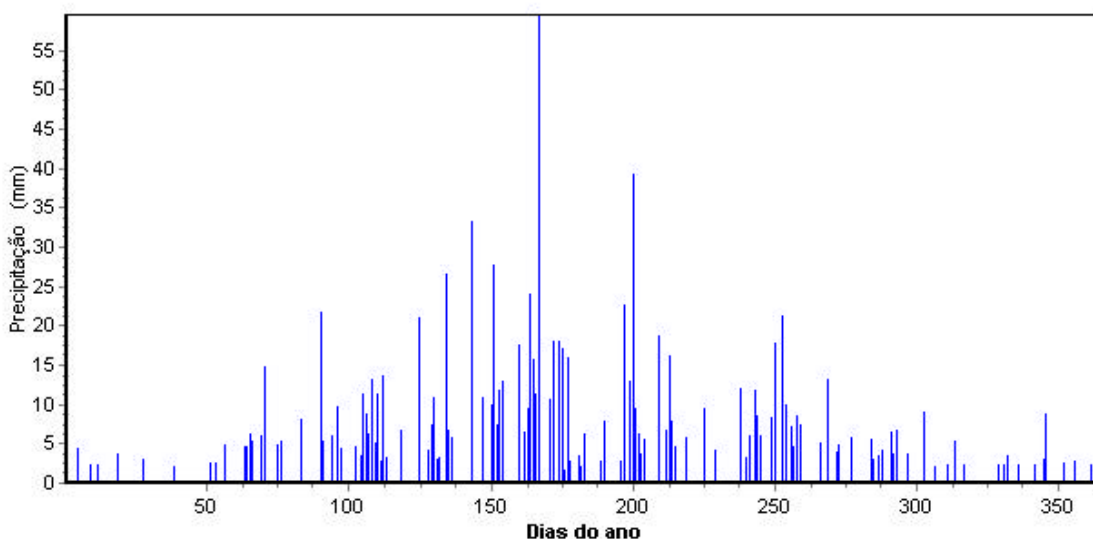


Figura 30 – Precipitações diárias, geradas pelo modelo CLIGEN, para o período de julho do primeiro ano simulado a junho do ano seguinte, para a região de Viçosa, MG.

A Figura 31 mostra os valores de evapotranspiração de referência diária observada durante o mesmo período. A evapotranspiração de referência média diária durante o ciclo da cultura foi de 3,6 mm.

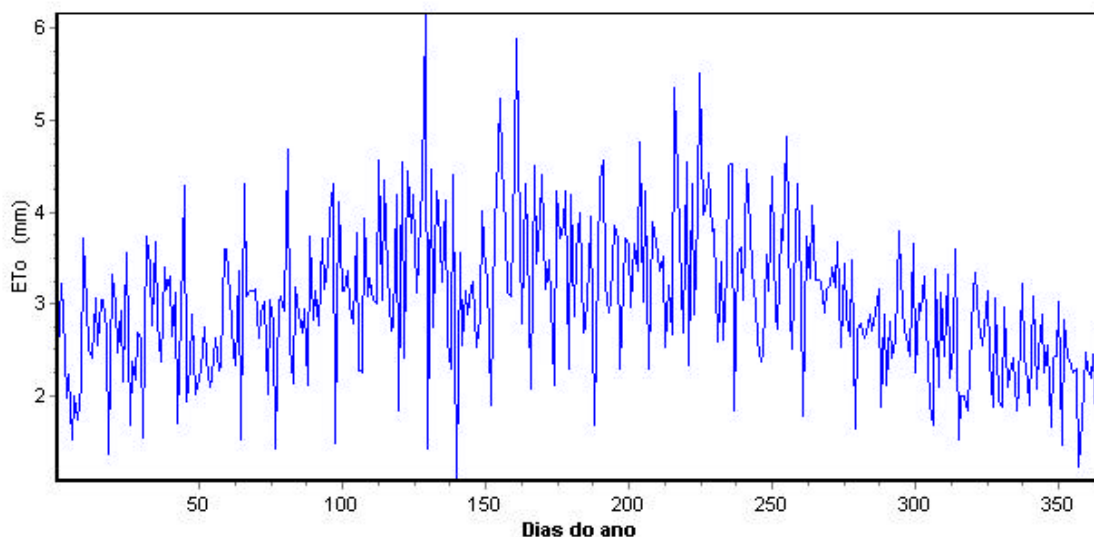


Figura 31 – Distribuição dos valores de evapotranspiração de referência diária (ET_0), calculados com base nos elementos meteorológicos gerados pelo modelo CLIGEN, para o período de julho do primeiro ano simulado a junho do ano seguinte, para o solo podzólico vermelho amarelo – Leopoldina.

4.3.2. Armazenamento de água na região radicular

As variações da lâmina de água armazenada na região do sistema radicular da cultura ao longo de seu ciclo são apresentadas nas Figura 32.

O espaçamento entre drenos, por si só, não permite evidenciar o comportamento dinâmico do lençol freático que, em última análise, traduz as condições de estresse devido ao excesso ou a falta de água a qual a cultura foi submetida. Dentro deste contexto, analisando-se a Figura 32, verifica-se que, no período de plantio e na fase de estabelecimento da cultura (dias 100 a 125), o teor de água armazenado na região do sistema radicular da cultura é baixo e o lençol freático encontra-se profundo (Figura 33). Este fato pode contribuir expressivamente para o estresse da cultura devido à deficiência de água na região radicular, com conseqüente diminuição na produtividade. Neste caso, uma das medidas corretivas poderia ser a utilização da prática da subirrigação (nos dias em que o lençol freático encontra-se acima do plano que passa pelo fundo dos drenos), através do controle do lençol freático, por meio de estruturas especiais instaladas ao longo dos drenos. Da mesma forma, esta técnica também pode ser utilizada em períodos de veranicos, ocorridos durante os períodos de maior

exigência hídrica da cultura. Por outro lado, observa-se ainda, na Figura 32, que no período de floração da cultura e formação de grãos (dias 150 a 200) o solo permanece com alto teor de água por um período prolongado, em razão das altas lâminas de precipitação ocorridas neste período, o que pode contribuir também para a redução da produtividade da cultura devido ao excesso de água no solo. Na tentativa de resolução deste problema, uma das alternativas mais viáveis seria o planejamento da época de plantio, de forma que este período chuvoso não coincida com o período crítico para a cultura. Caso, por algum motivo, esta alternativa não possa ser utilizada, uma outra seria, caso o valor do SEW_{30} para a cultura for excedido, utilizar uma outra cultura menos sensível ao excesso de água, ou optar por um novo dimensionamento, como, por exemplo, reduzir o valor inicial do espaçamento ou aumentar a profundidade de instalação dos drenos, a fim de promover uma drenagem adequada na área em questão nestes períodos considerados críticos para a cultura.

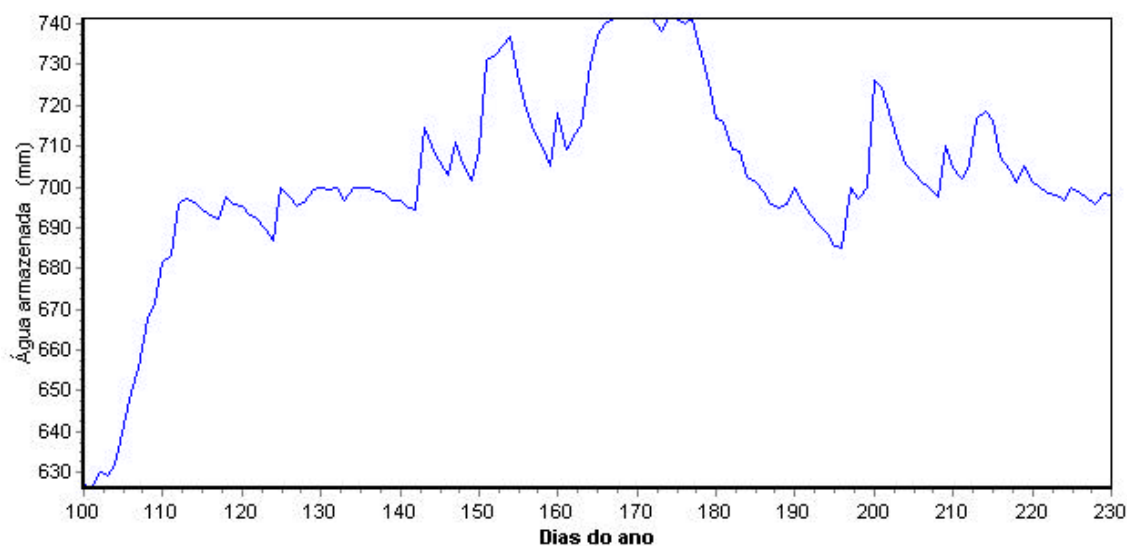


Figura 32 – Água armazenada na região do sistema radicular da cultura do milho, referente ao primeiro ano de simulação para o solo podzólico vermelho amarelo – Leopoldina.

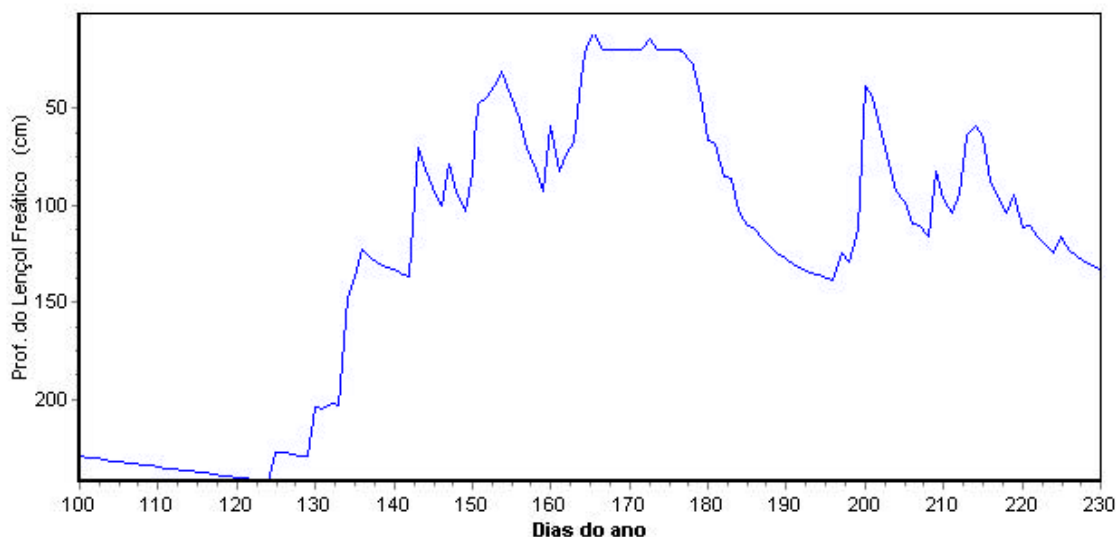


Figura 33 – Variação das profundidades do lençol freático durante o ciclo da cultura do milho referente ao primeiro ano de simulação.

A fim de ilustrar o fato anteriormente citado e de mostrar a versatilidade da metodologia desenvolvida, realizou-se uma nova simulação utilizando um valor de espaçamento 5% menor que o valor inicialmente utilizado. Na Figura 34 são apresentadas as profundidades do lençol freático ao longo do ciclo da cultura geradas por meio da nova simulação. Observa-se um expressivo aumento na profundidade do lençol freático, principalmente no período em que a cultura é mais sensível ao excesso de água na região radicular, resolvendo, dessa forma, o referido problema, ou seja, presença do lençol freático alto na fase em que a cultura é mais sensível ao excesso de água no solo.

Portanto, a metodologia desenvolvida mostra-se eficaz ao permitir identificar e controlar os diversos fatores que afetam o desempenho do sistema de drenagem como, por exemplo, as seqüências de condições climáticas anteriormente mencionadas, que podem ser críticas para a produção das culturas. Ressalta-se ainda que a utilização das metodologias tradicionais, normalmente empregadas para dimensionamento de sistemas de drenagem, não permitem, de forma direta, a realização destes diagnósticos e análises.

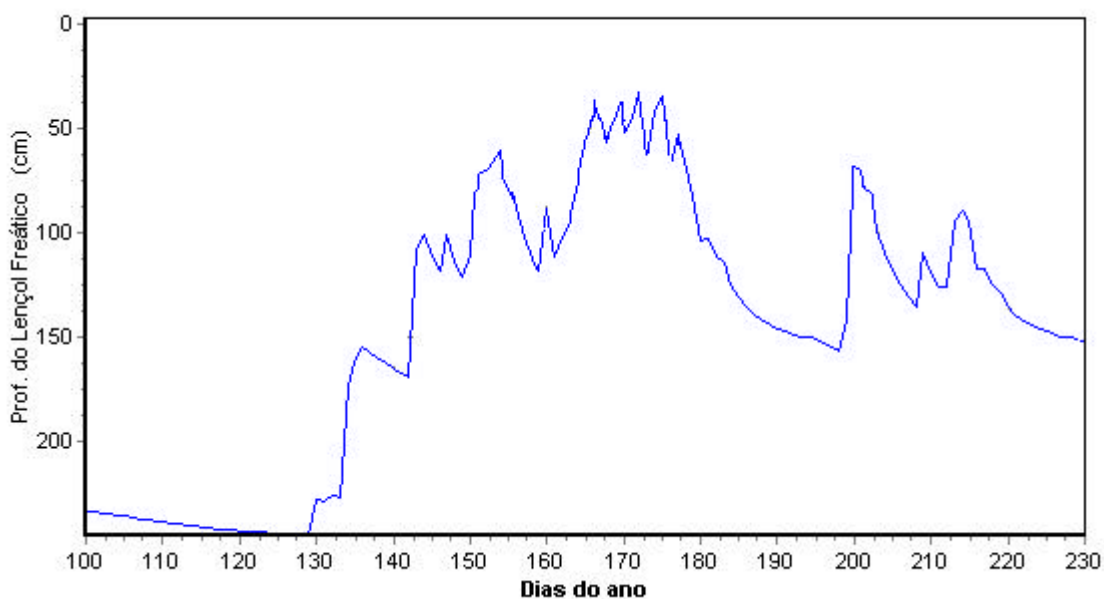


Figura 34 – Posição do lençol freático calculado utilizando o novo valor de espaçamento.

4.3.3. Efeitos da evapotranspiração sobre o rebaixamento do lençol freático

Outro aspecto importante a considerar refere-se aos efeitos da evapotranspiração sobre o rebaixamento do lençol freático. A Figura 35 mostra a variação da evapotranspiração ao longo do ciclo da cultura. Durante o ciclo da cultura, uma razoável lâmina de água proveniente do lençol freático (Figura 36) e da região radicular foi evapotranspirada, contribuindo, dessa forma, para evitar a ocorrência de excesso de água no solo e a conseqüente elevação do lençol freático. Cabe aqui ressaltar que as metodologias tradicionais, na sua totalidade desenvolvidas para regiões de clima temperado e com ênfase na primavera, quando do derretimento da neve, desconsideram esses efeitos da evapotranspiração sobre o rebaixamento do lençol freático. Este fato pode contribuir para a obtenção de resultados de espaçamentos entre drenos menores que os recomendados, conduzindo a uma drenagem em excesso na área em questão nas regiões tropicais e, por conseqüência, aumento dos custos de implantação e manutenção do sistema. Ainda dentro deste contexto, algumas metodologias tradicionais, como a apresentada por Pizarro (1985), tendem excessivamente a favor da segurança, por não considerar, ainda, outros aspectos

importantes que interferem no desempenho dos sistemas de drenagem, tais como o escoamento superficial, o que pode contribuir ainda mais para o superdimensionamento dos sistemas de drenagem agrícola.

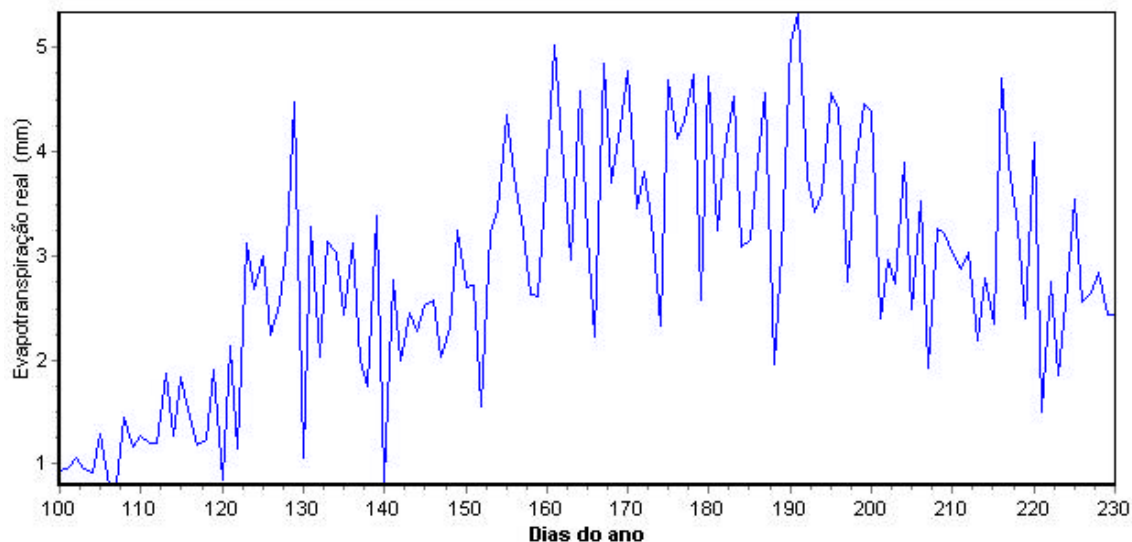


Figura 35 – Evapotranspiração real ao longo do ciclo da cultura do milho, durante o primeiro ano simulado, para a região de Viçosa, MG.

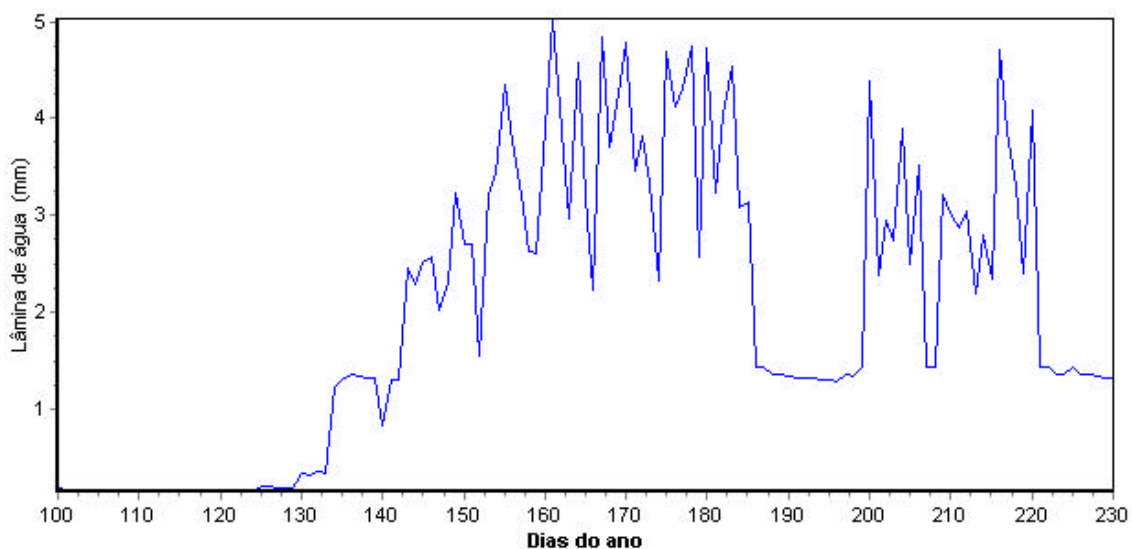


Figura 36 – Lâmina de água evapotranspirada, proveniente do lençol freático, durante o primeiro ano simulado, para a região de Viçosa, MG.

A Figura 37 mostra a lâmina infiltrada diária no solo durante o ciclo da cultura. Comparando-se com a lâmina precipitada diária (Figura 30), percebe-se que, em alguns dias durante o ciclo da cultura, a lâmina infiltrada no solo foi menor que a precipitada, ou seja, nestes dias a fração da precipitação que não infiltra no solo escoou pela superfície, direcionando até os drenos abertos e não contribuindo assim para o acréscimo do teor de água na região do sistema radicular da cultura e para a recarga do lençol freático. Este fato implica em um dimensionamento do sistema de drenagem mais racional e eficiente.

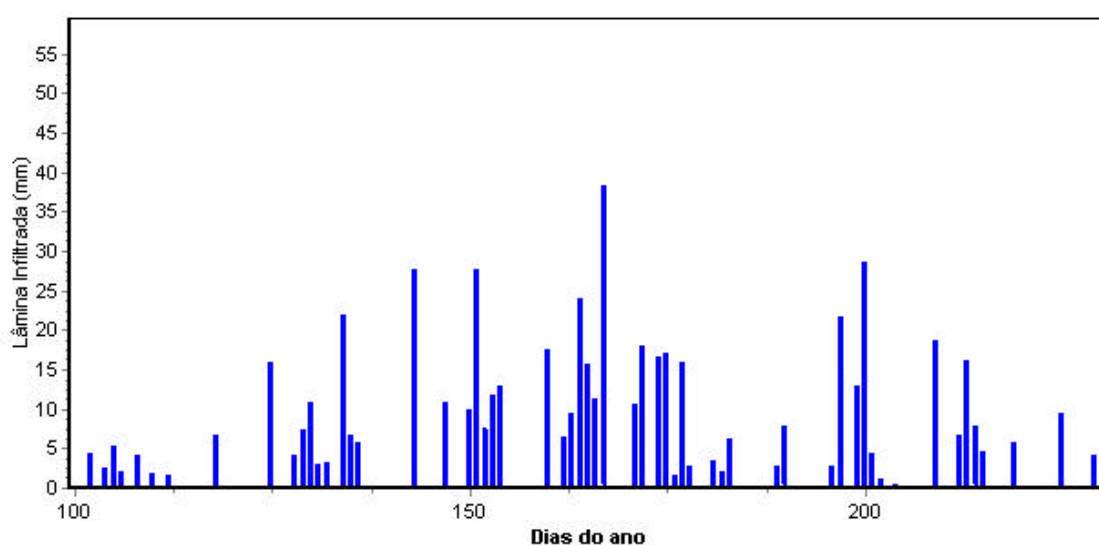


Figura 37 – Lâmina diária infiltrada no solo podzólico vermelho amarelo – Leopoldina, durante o ciclo da cultura no primeiro ano simulado, para a região de Viçosa, MG.

4.3.4. Somatório do excesso de água no solo (SEW_{30}) e oscilações do lençol freático

As oscilações do lençol freático podem propiciar situações de estresse, não somente devido ao excesso de água como também de déficit, alternadamente ocorridas durante o ciclo de uma cultura. Embora sejam necessárias informações de tolerância das culturas tanto ao excesso quanto ao déficit de água, este trabalho enfatiza a tolerância ao excesso de água.

A Figura 39 mostra o índice SEW_{30} e a variação da posição diária do lençol freático em resposta às recargas efetivas (Figura 38), durante o ciclo da cultura, para o primeiro ano de simulação. Apesar do valor do índice SEW_{30} calculado (210 cm.d, $L = 73$) aproximar-se do experimental recomendado para a cultura do milho (200 cm.d, na Figura 40), pode ser evidenciada uma deficiência deste índice no estudo da resposta das culturas à flutuação do lençol freático, que se refere ao fato deste assumir que o estresse imposto à cultura pela flutuação do lençol freático ser aditivo. Isso implica que valores iguais de SEW_{30} obtidos a partir de diferentes níveis de drenagem podem produzir níveis de estresse iguais na cultura. Por exemplo, para culturas num mesmo estágio de crescimento, o método sugere que um lençol freático mantido a 5 cm de profundidade por um dia ($SEW_{30} = 25$ cm.d) tem o mesmo efeito que um lençol freático mantido a 25 cm de profundidade durante cinco dias ($SEW_{30} = 25$ cm.d), o que pode não ser verdadeiro, dependendo do estágio de desenvolvimento da cultura. Segundo Skaggs (1981), apesar dos pontos vulneráveis, o índice SEW_{30} é considerado um critério conveniente para caracterizar a qualidade da drenagem.

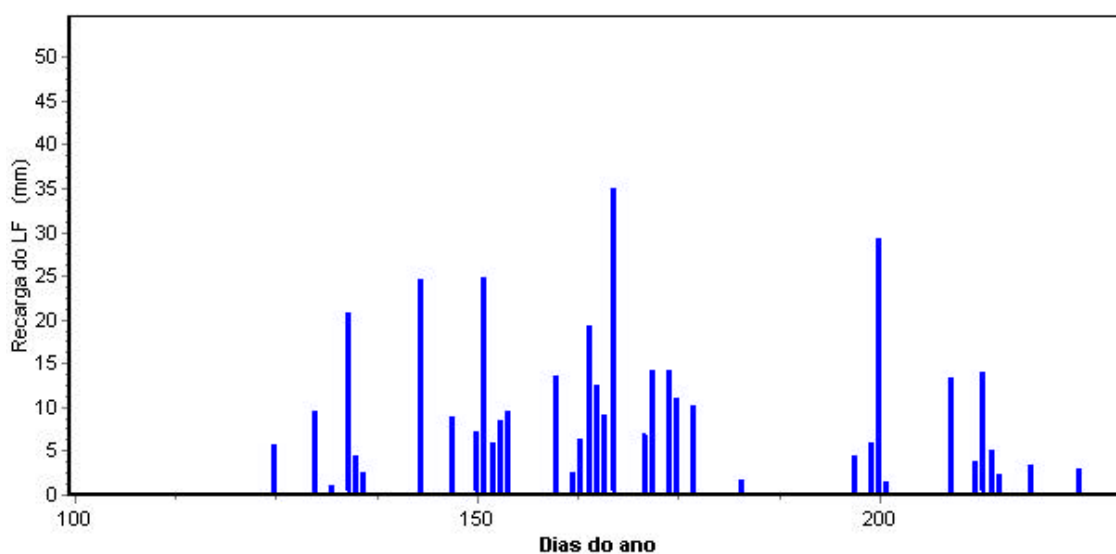


Figura 38 – Recargas efetivas do lençol freático durante o ciclo da cultura do milho, referentes ao primeiro ano de simulação para o solo podzólico vermelho amarelo – Leopoldina.

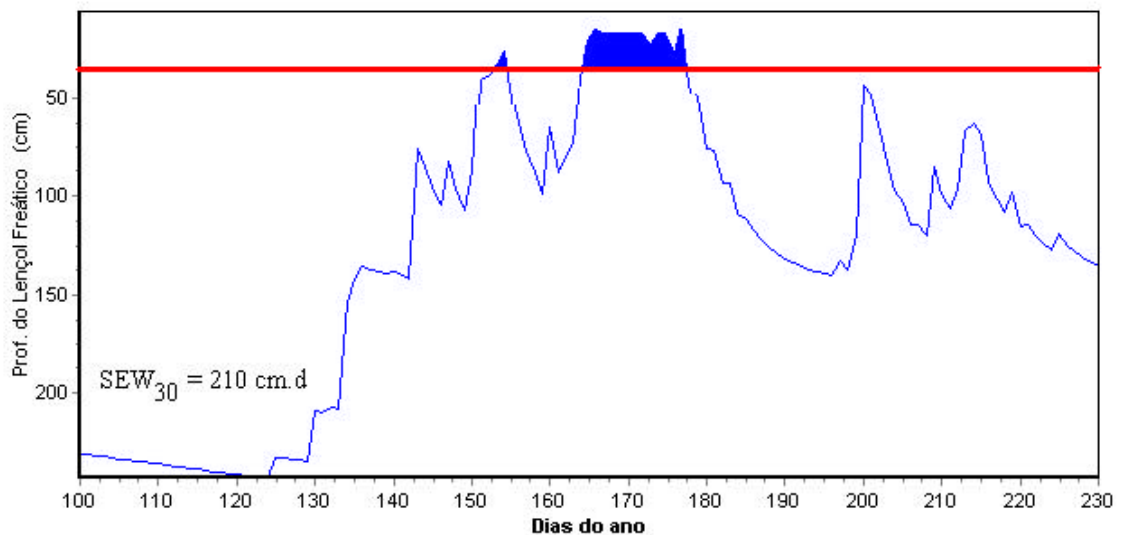


Figura 39 - Hidrograma freático e índice SEW_{30} durante o ciclo da cultura do milho, referentes ao primeiro ano da simulação para o solo podzólico vermelho amarelo – Leopoldina.

Destaca-se que o exemplo anterior, quando a simulação foi realizada somente para um ano, objetiva apenas ilustrar o controle que esta ferramenta oferece sobre os principais fatores que influenciam o desempenho de um sistemas de drenagem agrícola, auxiliando de forma expressiva na tomada de decisões a ser realizada pelo projetista.

A seguir é mostrado o dimensionamento final, considerando todos os anos da série.

Os valores de SEW_{30} calculados para 50 anos de simulação são mostrados na Figura 40. A média desses valores (200 cm.d) corresponde, segundo Skaggs (1981), ao valor de SEW_{30} experimental recomendável para a cultura do milho, sem que haja queda acentuada na produtividade. De modo geral, a utilização desse valor médio de SEW_{30} pode acarretar queda de produtividade em anos considerados chuvosos e, ao contrário, caso não haja déficit hídrico, aumento de produtividade em anos pouco chuvosos. Dessa forma, como o número de anos utilizados na simulação pode ser considerado representativo, espera-se que a longo prazo o sistema de drenagem dimensionado utilizando a metodologia desenvolvida propicie uma agricultura permanente e rentável na área em questão.

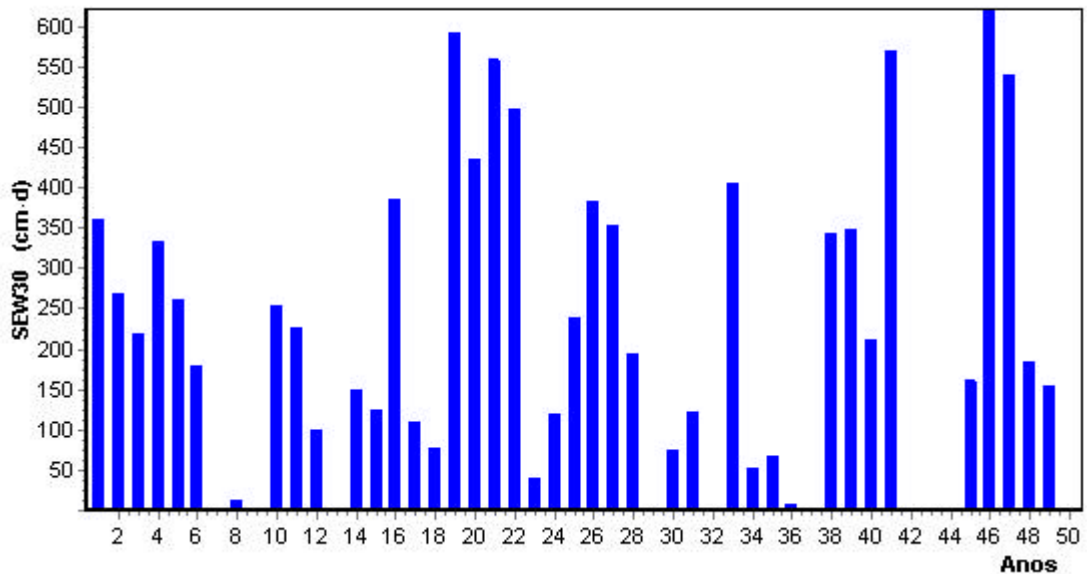


Figura 40 – Variação do índice SEW₃₀, durante os 50 anos de simulação.

Cabe ressaltar ainda que o coeficiente de estresse da cultura do milho ($SEW_{30} = 200$ cm.d) utilizado nesta simulação é proveniente de pesquisas realizadas nos Estados Unidos. Como a sensibilidade ao encharcamento depende das condições climáticas, dados de pesquisa regional tornam-se necessários para que os resultados obtidos por meio da metodologia de dimensionamento utilizada neste trabalho sejam mais confiáveis. Seria, portanto, de grande interesse que as instituições de pesquisa governamentais se sensibilizassem sobre a importância de geração de índices regionais para as culturas de interesse econômico nacional.

O valor do espaçamento entre drenos obtido com a referente simulação para o valor experimental de SEW_{30} , foi 71 m.

4.3.5. Comparações entre dimensionamentos realizados com base na metodologia desenvolvida e aqueles com base na metodologia tradicional

No Quadro 16 encontra-se o resumo dos resultados obtidos com a aplicação da metodologia aqui desenvolvida e dos métodos apresentados por Pizarro (1985) e Cruciani (1989), em condições de ausência e presença de escoamento

superficial. A base de dados utilizada nas simulações encontra-se no subitem 3.8.1.

Quadro 16 - Espaçamentos entre drenos (m) obtidos segundo os métodos propostos por Pizarro (1985) e Cruciani (1989) e pela aplicação da metodologia desenvolvida, em condições de ausência e presença de escoamento superficial, para diferentes tipos de solo e cultura.

Solos	Culturas	Não considerando o escoamento superficial			Considerando o escoamento superficial		
		Pizarro	Cruciani	Metod.	Pizarro	Cruciani	Metod.
1 2 3 4 5	Milho	25	15	33	-	21	51
		50	46	65	-	47	71
		36	29	45	-	31	60
		45	36	56	-	39	68
		32	20	45	-	26	56
1 2 3 4 5	Cana De Açúcar	25	15	37	-	21	60
		50	46	74	-	47	85
		36	29	51	-	31	65
		45	36	64	-	39	77
		32	20	49	-	26	68
1 2 3 4 5	Cenoura	38	17	52	-	29	64
		58	56	100	-	56	112
		45	35	84	-	37	95
		55	43	102	-	45	111
		51	24	70	-	34	82

Na condição de ausência de escoamento superficial foi considerada a infiltração total da lâmina de precipitação. Neste caso, observa-se que os espaçamentos entre drenos obtidos por meio da metodologia desenvolvida para as culturas do milho, cana-de-açúcar e cenoura foram, em média 30%, 47% e 64% maiores do que os espaçamentos entre drenos obtidos utilizando o método de dimensionamento proposto por Pizarro (1985) e 79%, 101% e 151% maiores do que os obtidos utilizando o método proposto por Cruciani (1989). Ressalta-se que, em se tratando de dimensionamento de sistema de drenagem subterrânea, a não consideração do escoamento superficial incorre em maior segurança.

Considerando o escoamento superficial, verificou-se que os espaçamentos entre drenos obtidos pela metodologia desenvolvida para as culturas do milho, cana-de-açúcar e cenoura foram, em média, 99%, 127% e 133% maiores do que

os espaçamentos entre drenos obtidos por meio do método de dimensionamento proposto por Cruciani (1989). Observa-se que as variações foram menores em relação às obtidas nas simulações considerando o escoamento superficial, porém, ainda, em valor absoluto, relativamente grandes.

Observa-se também que os espaçamentos entre drenos obtidos por meio da metodologia proposta, na condição de ausência de escoamento superficial, foram bem maiores do que os obtidos por meio do método proposto por Cruciani (1989), mesmo quando neste considerou-se a presença de escoamento superficial. Dessa forma, percebe-se que os métodos tradicionais de dimensionamento tendem excessivamente a favor da segurança, por não considerarem alguns fatores importantes que interferem no rebaixamento do lençol freático, tais como o fluxo ascendente oriundo do lençol freático, o efeito da evapotranspiração sobre o rebaixamento do lençol freático e, no caso da metodologia de Pizarro (1985), o escoamento superficial. Destaca-se que a metodologia apresentada por Cruciani (1989) utiliza uma altura de chuva de projeto considerada muito alta por este motivo pode ter contribuído consideravelmente para a obtenção de espaçamentos muito inferiores aos obtidos pela uso da metodologia desenvolvida.

É importante destacar, ainda, que a utilização de espaçamentos entre drenos menores que os recomendados para a área em questão conduz a uma drenagem em excesso, o que implica em maiores custos (tubos, materiais envoltórios, mão-de-obra, máquinas, etc.) com a implantação do sistema de drenagem. Além disso, o sistema de drenagem pode proporcionar profundidades excessivas do lençol freático na estação seca do ano, contribuindo para a redução da quantidade de água na zona radicular e, em consequência, para a queda da produtividade.

Verifica-se, no Quadro 16, que os espaçamentos obtidos quando considerou-se o escoamento superficial foram maiores que os obtidos quando não considerou-se o efeito do escoamento superficial sobre o espaçamento dos drenos. Dessa forma, ressalta-se a importância da consideração deste parâmetro em projetos de drenagem agrícola no sentido de minimizar os custos de implantação e manutenção do sistema de drenagem. Destaca-se também a

importância da determinação adequada da lâmina de água infiltrada no solo, cuja subestimativa implica numa subestimativa do dimensionamento do sistema de drenagem agrícola.

Analisando-se ainda os resultados, verifica-se que, em média, os espaçamentos entre drenos obtidos por meio da metodologia desenvolvida para as culturas do milho, cana-de-açúcar e cenoura, foram de 56, 64 e 87 metros, respectivamente. Estes resultados revelam que os espaçamentos fornecidos pela metodologia desenvolvida tendem a se aproximar mais daqueles que vêm sendo utilizados, na prática, na região sudeste brasileira, ou seja, espaçamentos da ordem de 50 a 100 m, que vêm propiciando resultados satisfatórios em termo de produtividade e rentabilidade para o agricultor.

Ressalta-se, pelos resultados encontrados e pela experiência prática, que os métodos tradicionais de dimensionamento necessitam aprimoramento de forma a se adequarem às condições de solo e clima dos trópicos, mais especificamente para regiões de clima úmido e subúmido, as quais abrange a maior parte do território brasileiro. Esta adequação, no entanto, deve ser realizada principalmente no que tange aos parâmetros de entrada das equações utilizadas e algumas considerações referentes aos efeitos dos elementos meteorológicos sobre o rebaixamento do lençol freático, como, por exemplo, da evapotranspiração de referência (ET_0). Dessa forma, ressalta-se que a metodologia proposta aproxima-se mais dessas realidades e por, isso tem potencialidade para se tornar uma alternativa promissora para o dimensionamento e manejo de sistemas de drenagem agrícola nessas regiões.

4.4. Análise de sensibilidade

Os índices de sensibilidade obtidos mostram que o modelo é bastante sensível a alguns dos parâmetros estudados, indicando que pequenas alterações nesses parâmetros resultam em diferenças expressivas nos resultados apresentados pelo modelo. Portanto, esses parâmetros necessitam de uma maior precisão ao serem determinados. No Quadro 17 é apresentada uma síntese dos índices de sensibilidade obtidos para os diferentes parâmetros analisados.

Quadro 17 - Valores dos índices de sensibilidade obtidos para diferentes parâmetros de entrada

Parâmetro de entrada	Intervalo de valores	Índice de sensibilidade
Profundidade dos drenos (m)	0,84 – 2,52	0,85
Condutividade hidráulica ($m d^{-1}$)	0,10 – 1,60	0,81
Raio efetivo dos drenos (mm)	30 – 130	0,09
Porosidade drenável	0,023 – 0,1252	0,22
Profundidade da camada de impedimento (m)	2 – 10	0,68
Precipitação (mm)	-40 a 160%*	-1,014
Evapotranspiração de referência ($mm d^{-1}$)	-90 a 60%*	0,27
SEW ₃₀ (cm.d)	96,80 – 387,2	-0,26

* Faixa de variação dos elementos.

De acordo com os valores apresentados no Quadro 17, o modelo apresenta maior sensibilidade à precipitação, seguido da profundidade de instalação dos drenos, da condutividade hidráulica do solo saturado, da profundidade da camada de impedimento e da evapotranspiração de referência. O menor valor do índice de sensibilidade foi obtido para o raio efetivo dos drenos.

Os efeitos da variação dos parâmetros de entrada sobre os resultados das simulações obtidos com a aplicação do modelo são apresentados nas Figuras 41 e 42.

Na Figura 41 observa-se que subestimavas da precipitação e superestimavas da evapotranspiração de referência promoveram um aumento sensível do espaçamento entre drenos. Esses resultados estimulam o uso de modelos mais precisos para a estimativa da ET e para a geração de séries sintéticas de precipitação. Percebe-se também que o modelo é altamente sensível a variações negativas no valor da precipitação total diária, o que pode ser evidenciado pela alta declividade da função que representam as variações da precipitação neste trecho considerado. Este fato já era esperado, pois, quanto menor for a lâmina precipitada, a tendência natural é a de utilização de espaçamentos menores. No entanto, para variações positivas nos valores de precipitação, nota-se que a declividade da função é bem menor quando comparada ao caso anterior, ou seja, pequenas variações nos valores de precipitação refletem em menores variações nos valores do espaçamento. Este

fato pode ser explicado pela consideração do efeito do escoamento superficial sobre o espaçamento.

Variações positivas no fator de sensibilidade da cultura ao excesso de água no solo acarretam subestimativa do espaçamento entre drenos, o que evidencia a necessidade de pesquisas com o objetivo de determinação adequada deste fator, para diferentes variedades de culturas.

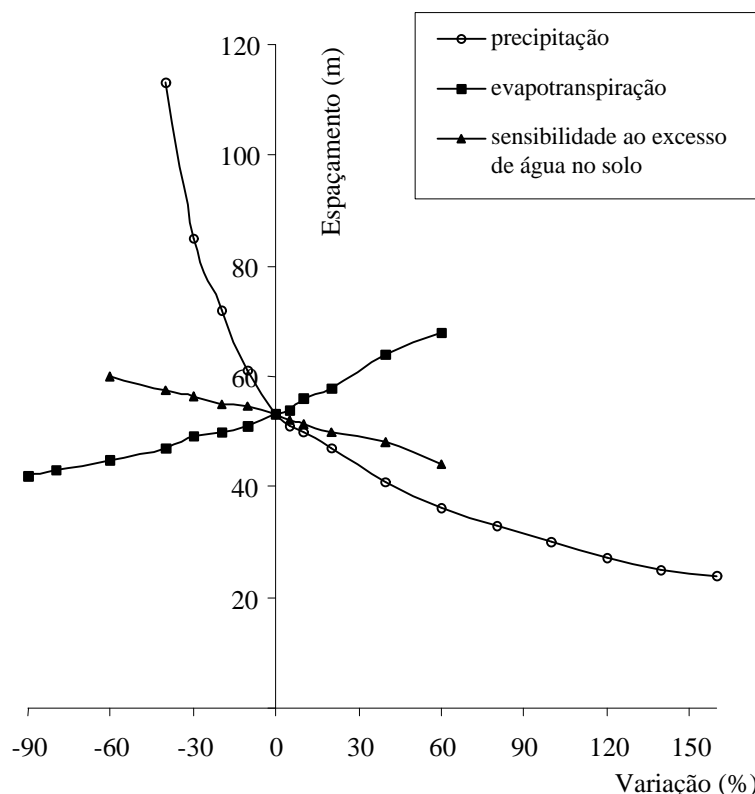


Figura 41 - Sensibilidade do modelo aos parâmetros hidrológicos e da cultura.

Na Figura 42, observam-se os efeitos da variação dos parâmetros de entrada relativos à geometria do sistema de drenagem e às características físico-hídricas do solo sobre os resultados das simulações obtidos com a aplicação do modelo. Verificou-se que as variações positivas desses parâmetros promoveram o aumento do espaçamento entre drenos. A profundidade de instalação dos drenos foi o parâmetro que propiciou o maior efeito, incentivando a realização de estudos visando a determinação da profundidade adequada de instalação dos drenos. O modelo também foi bastante sensível a variações da condutividade hidráulica e, em escala bem menor, às variações da porosidade drenável. Esses

resultados estão em concordância com as observações de Ferreira (2003), segundo os quais a condutividade hidráulica deve ser determinada de forma mais criteriosa quando comparada com a determinação da porosidade drenável. Percebe-se também que determinações incorretas da profundidade do perfil do solo passam a ter efeito pequeno à medida em que esse parâmetro aumenta. Esse resultado torna de importância menor a realização de sondagens mecânicas profundas visando a localização precisa da camada de impedimento.

Analisando-se ainda a Figura 42 percebe-se que as funções que representam as variações dos parâmetros profundidade de instalação dos drenos e condutividade hidráulica do solo saturado apresentam uma mesma tendência e declividades. Evidencia-se que pequenas variações nestes valores causam pequenas variações nos valores dos espaçamentos. Da mesma forma, quando se comparam os efeitos das variações positivas dos parâmetros, profundidade da camada impermeável e porosidade drenável, sobre o espaçamento dos drenos, nota-se também que variações da mesma magnitude destes parâmetros exercem efeitos semelhantes sobre o espaçamento. Destaca-se também que estas funções tendem para uma assíntota horizontal, ou seja, a função atinge um ponto de máxima, sendo que, neste trecho, as variações nos parâmetros passam a não influenciar as alterações no valor do espaçamento.

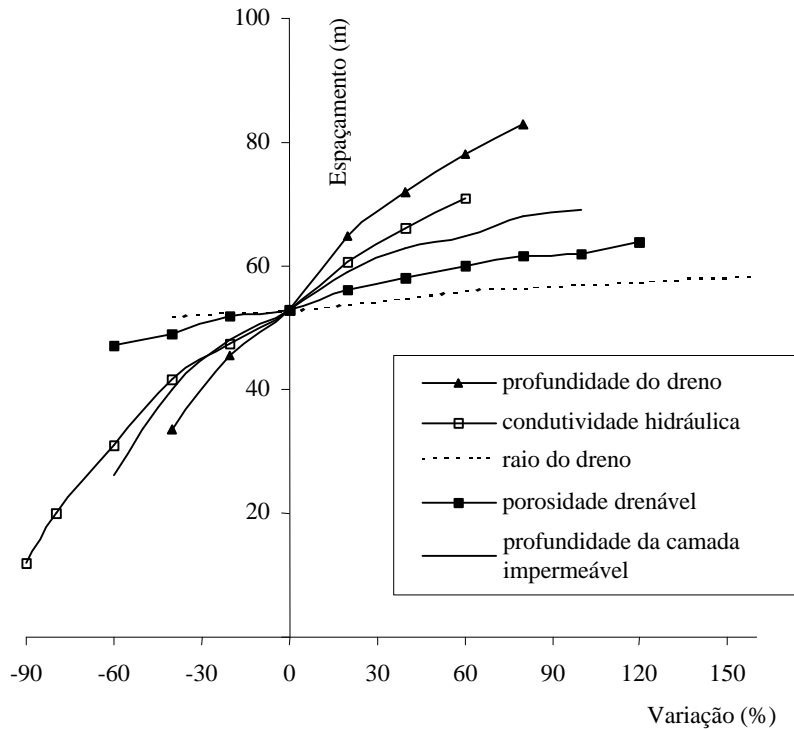


Figura 42 - Sensibilidade do modelo aos parâmetros relativos à geometria do sistema de drenagem e às características físico-hídricas do solo.

Para variações negativas dos parâmetros de entrada relativos à geometria do sistema de drenagem e às características físico-hídricas do solo, observa-se que o modelo mostrou-se mais sensível, em ordem, às variações nos parâmetros profundidade dos drenos, profundidade do perfil e condutividade hidráulica do solo saturado.

De maneira geral, verifica-se, pelos resultados da análise de sensibilidade, que o modelo produziu resultados lógicos em função de alterações nos seus parâmetros de entrada, comprovando, dessa forma, que a metodologia desenvolvida, em última análise, não contém falhas e pode ser aplicada a diferentes cenários e escalas.

5. RESUMO E CONCLUSÕES

Considerando a necessidade do desenvolvimento de novas tecnologias que contribuam para o aprimoramento dos métodos de dimensionamento e manejo de sistemas de drenagem agrícola, nas condições de solo e clima dos trópicos, mais especificamente para as regiões brasileiras de clima úmido e subúmido, foi desenvolvida uma metodologia fundamentada no balanço hídrico diário, na equação de drenagem de Krayjenhoff van Leur-Maasland e no critério de drenagem conhecido como somatório dos excessos de água no solo acima da profundidade de 30 cm (SEW_{30}).

A base de dados climáticos requerida pela metodologia é gerada com o auxílio do programa CLIGEN, desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA).

A fração da precipitação total diária que infiltra no solo é calculada por meio da equação de Green e Ampt modificada por Mein e Larson, enquanto a posição do lençol freático é calculada pela equação de recarga intermitente de Krayjenhoff van de Leur-Maasland. Finalmente, a teor de água na zona radicular é calculada pelo balanço hídrico.

O balanço de água na zona radicular é realizado diariamente, considerando-se a fração da precipitação total ou de irrigação infiltrada que,

efetivamente, provoca a recarga do lençol freático, a evapotranspiração real diária e o fluxo ascendente máximo proveniente do lençol freático.

Os efeitos do espaçamento e profundidade dos drenos sobre a produtividade das culturas, para o período crítico de drenagem, são caracterizados com base nos valores do somatório dos excessos de água no solo acima da profundidade de 30 cm - SEW_{30} , calculados a partir do hidrograma freático gerado durante o período de desenvolvimento da cultura.

Utilizando-se uma série sintética de dados climáticos obtidos por meio do modelo CLIGEN para um período de 50 anos para a região de Viçosa, avaliou-se a metodologia. Para isso, foram realizadas diversas simulações, que permitiram identificar o potencial desta ferramenta em diagnosticar e analisar os diversos fatores que afetam o desempenho de um sistema de drenagem agrícola, além de comparar os resultados de espaçamentos entre drenos obtidos por meio da metodologia desenvolvida, com os obtidos por meio de métodos tradicionais de dimensionamento. Realizaram-se também testes para análise da sensibilidade do modelo em relação aos seus parâmetros de entrada. Foram comparados os valores dos elementos climáticos gerados pelo CLIGEN, com os valores observados.

Pelos resultados obtidos, pôde-se chegar às seguintes conclusões:

- os espaçamentos entre drenos, obtidos com a metodologia proposta, foram maiores do que aqueles obtidos segundo métodos tradicionais de dimensionamento;
- a análise de sensibilidade revelou que a profundidade dos drenos, a precipitação total diária, a profundidade dos drenos, a condutividade hidráulica do solo saturado e a profundidade da camada impermeável foram os fatores cujas variações exerceram maiores efeitos sobre o espaçamento de drenos;
- a metodologia tem potencialidade para se tornar uma alternativa promissora para o dimensionamento e manejo de sistemas de drenagem em regiões tropicais de clima úmido, por dar subsídio ao projetista, para realizar uma análise detalhada de todos os fatores que afetam o desempenho do sistema de drenagem;

- o modelo CLIGEN mostrou-se eficiente na estimativa do principais elementos climáticos necessários ao desenvolvimento da metodologia;
- os valores de intensidade máxima de precipitação e da duração dos eventos diários de precipitação gerados pelo modelo CLIGEN apresentaram sensíveis variações percentuais em relação aos valores observados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, R.; Pereira, L.S., Raes, D.; Smith, M. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 319 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56)
- Armstrong, A.C.; Rycroft, D.W.; Welch, D.J. Modeling watertable response to climate to climatic inputs - Its use in evaluating drainage designs in Britain. **Journal of the Agricultural Engineering Research**, v.25, n.3, p311-323, 1980.
- Arnold, J.G.; Williams, J.R. Stochastic generation of internal storm structure at a point. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.32, n.1, p.161-167, 1989.
- Arnold, J.G.; Williams, J.R.; Nicks, A.D.; Sammons, N.D. **A Basin Scale Simulation Model for Soil and Water Resources Management**. Texas A&M University Press. 1990, 236 p.
- Beltran, J.M. **Drenaje Agrícola**. Ministério da Agricultura, Pesca e Alimentacion. Instituto Nacional de Reforma y Dessarrollo Agrario. Manual Técnico n. 5, 239p. 1986.
- Bengtson, R.L.; Carter, C.E.; McDaniel, V.; Halverson B.E. Corn silage responses to subsurface drainage on alluvial soil. **Transactions of the ASAE**, v.30, n.4, p.1391-1395, 1984.
- Bernardo, S. **Manual de Irrigação**. 6^a ed. Viçosa, 1995, 657p.
- Borges Júnior, J.C.F. **Modelo computacional para dimensionamento e manejo de sistemas de drenagem agrícola**. Viçosa: UFV, 2000. 106p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - UFV, 2000.

- Bower, H. Developing drainage design criteria. In Schilfgaard, J. Van. **Drainage for Agriculture**. Madison, American Society of Agronomy, 1974. p.67-69.
- Brakensiek, D.L.; Onstad, C.A. Parameter estimation of Green and Ampt infiltration equation. **Water Resources Research**, v.13, n.6, p.1009-1012, 1977.
- Burman, R.D.; Nixon, P.R.; Wright, J.L.; Pruitt, W. O. Water requirements. In: JENSEN, M. E., **Design and operation of farm irrigation system**. St. Joseph: ASAE, p.189-232, 1983.
- Carter, C.E.; Camp, C.R. Drain spacing effects on water table control and cane sugar yields. **Transactions of the ASAE**, v.37, n.5, p.1509-1513, 1994.
- Cecílio, R.A. **Aplicação da equação de Green-Ampt na modelagem da infiltração de água em Latossolo Vermelho-Amarelo estratificado**. Viçosa, MG: UFV, 2002. 88p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), UFV, 2002.
- Chow, V.T.; Maidment, D.R.; Mays, L.W. **Hidrología aplicada**. Santafé de Bogotá: McGraw-Hill, 1994. 584p.
- Chu, S.T. Infiltration during an unsteady rain. **Water Resource Research**, v.14, n.3, p.461-466, 1978.
- Costa, R.N.T.; Cruciani, D.E. Parâmetros do milho piranão VD-2 em condições de várzea drenada. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.18, n.2, p.11-18, 1998.
- Cox, J.W.; McFarlane, D.J. The cause of waterlogging in shallow soils and their drainage in southwestern Australia. **Journal of Hydrology**, v.167, p175-194, 1995.
- Cruciani, D.E. **A drenagem na agricultura**. 4. ed. São Paulo: Nobel, 1989. 337p.
- Doorenbos, J.; Pruitt, W.O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Rome: FAO, 1977. 144 p. (FAO, Irrigation and Drainage Paper, 24).
- Dourado Neto D.; Lier, Q. de J.V.; Botrel, T.A. Programa para confecção da curva de retenção da água no solo utilizando o modelo de Genuchten. **Engenharia Rural**, v.1, n.2, p.92-102, 1990.
- Duarte, S.N. **Modelo para avaliação de desempenho de sistemas de drenagem subterrânea e cálculo de espaçamento de drenos**. Viçosa: UFV, 1997. 143p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - UFV, 1997.

- Ferreira, P.A. **Drenagem de terras agrícolas**. In: Associação Brasileira de Educação Agrícola Superior: ABEAS, Brasília, 2003. 210p.
- Figueiredo, W.A.S.C. **Determinação do fator de susceptibilidade e dos efeitos do índice diário de estresse sobre a produção de ervilha**. Viçosa: UFV, 2002. 50p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - UFV, 2002.
- Flanagan, D.C.; Meyer, C.R.; Yu, B.; Scheele, D.I. Evaluation and enhancement of the CLIGEN weather generator. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF ASAE, 2001, Honolulu. **Soil Erosion Research for the 21⁰ Century**. HI, USA. 2001. p. 107-110.
- Flanagan, D.C. **Format of CLIGEN weather station statistics input files for CLIGEN**, 2001. 10p.
- Gayle, G.A.; Skaags, R.W.; Carter, C.E. Effects of excessive soil water conditions on sugarcane yields. **Transactions of the ASAE**, v.30, n.4, p.993-997, 1987.
- Genuchten, M. T. van. A closed equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.44, n.3, p.892-898, 1980.
- Goldenfum, J.A.; Semmelmann, F.R.; Reichert, G. Produção de sedimentos em bacias rurais: Análise de sensibilidade dos modelos answers, creams e mulsed. In: SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS, 5; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 9, Rio de Janeiro, 1991, **Anais...** Rio de Janeiro-RJ, 1991.
- Gowda, P.; Ward, A.; White, J.L.; Desmond, E. The sensitivity of ADAPT model predictions of stream flows to parameters used to define hydrologic response units. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.42, n.2, p.381-389, 1999.
- Hillel, D. **Solo e água - Fenômenos e princípios físicos**. Porto Alegre: UFRGS, 1970. 231p.
- Kanwar, R.S.; Baker J.L.; Mukhtar, S. Excessive soil water effects at various stages of development on the growth and yield of corn. **Transactions of the ASAE**, v.31, n.1, p.133-141, 1988.
- Leonard, R.A.; Knisel, W.G.; Still, D.A. GLEAMS: Groundwater loading effects of agricultural management systems. **Transactions of the ASAE**, v.30, n.5, p.1403-1418, 1987.
- Libardi, P. L. **Dinâmica da água no solo**. 1. ed. Piracicaba: Cena/USP, 1995. 497p.

- Matzenaur, R.; Maluf, J.R.; Sutili, V.R. Evapotranspiração máxima e coeficiente de cultura para o feijão. 1991. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 7, Viçosa, 1991. **Anais...** Viçosa: SBA, 1991. p.235-236.
- McCuen, R.H.; Snyder, W.M. **Hydrologic modeling: Statistical methods and applications**. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice Hall, 1986.
- Mein, R.G.; LARSON, C.L. Modeling infiltration during a steady rain. **Water Resources Research**, v.9, n.4, p.384-394, 1973.
- Miranda, J.H. **Modelo para simulação da dinâmica da água em sistemas de drenagem subterrânea e cálculo do espaçamento econômico entre drenos**. Piracicaba: ESALQ, 1997, 89p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - ESALQ, 1997.
- Moore, I.D.; Eigel, J.D. Infiltration into two-layered soil profiles. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.107, n.1, p. 71-86, 1981.
- Mualem, Y.A. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**, Washington, v.12, p.512-522. 1976.
- Nicks, A.D.; Lane, L.J.; Gander, G.A. **Weather Generator: USDA-Water erosion prediction project (WEPP)**. West Lafayette, IN: USDA-ARS - National Soil Erosion Research Laboratory, 1995. Cap. 2, 22p.
- Oliveira, V.P.S. **Modelo para a geração de séries sintéticas de precipitação**. Viçosa: UFV, 2003. 156p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - UFV, 2003.
- Ometto, J.C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Ed. Agronômica Ceres, 1981. 440p.
- Onstad C.A.; Olson, T.C.; Stone, L.R. An infiltration mode tested with monolith moisture measurements. **Soil Science**. v.116, n.1, p.13-17, 1973.
- Pereira, A.R.; Villa Nova, N.A.; Sediyma, G.C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997, 183 p.
- Pizarro, F. **Drenaje agrícola y recuperacion de suelos salinos**. 2^a ed. Madrid: Agrícola Española, 1985. 542p.
- Pruski, F.F.; Silva, D.D.; Santos, W.L.; Rodrigues, L.N.; Antunes, V. L. **Infiltração da água no solo**. Viçosa: AEAMG, DEA, UFV, 1997. 26p. (Caderno didático, 25)

- Reichardt, K. **Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas**. Piracicaba: USP/ESALQ, 1996. 505p.
- Richardson, C.W. Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation. **Water Resources Research**, v.17, n.1, p.182-190, fev.1981.
- Sabbagh, G.J.; Fouss, J.L.; Bergston, R.L. Comparison of EPIC-WT and DRAINMOD simulated performance of land drainage systems. **Transactions of the ASAE**, v.36, n.1, p.73-79, 1993.
- Scheele, D.I.; Elliot, W.J.; Haii, D.E. Enhancements to the CLIGEN weather Generator for mountainous or custom applications. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF ASAE, 2001, Honolulu. **Soil Erosion Research for the 21^o Century**. HI, USA. 2001. p. 392-395.
- Shilfgaarde, J. van. Nonsteady flow to drains In: SHILFGAARDE, J. van. **Drainage for agriculture**. Madison American Society of Agronomy, 1974. P.245-270.
- Shilfgaarde, J. van. Transient design of drainage systems. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**. v.91, n.3, p.90-92, 1965.
- Shirmohammadi, A.; Thomas, D.L.; Smith, M.C., Drainage-subirrigation design for Pelham loamy sand. **Transactions of the ASAE**, v.34, n.1, p.73-80, 1991.
- Skaggs, R.W. **DRAINMOD - Reference report**: methods for design and evaluation of drainage-water management systems for soils high water tables. Raleigh: USDA-SCS, 1981. 329p.
- Skogerboe, G.V.; Walker, W.R. **Surface irrigation - Theory and Practice**. New Jersey: Irrigation engineering, 1987. 386p.
- Slack, D.C. Modeling infiltration under moving sprinkler irrigation systems. **Transactions of the ASAE**, v.8, n.1, p.90-93, 1980.
- Smedema, L.K.; Rycroft, D.W. **Land drainage**. Ithaca: Cornell University Press, 1983. 377p.
- Smith, M. **Report on the consultation on procedures for revision of FAO guidelines for predictions of crop water requirements**. Rome: FAO, 1991. 45p.
- Tucci, C.E.M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: ABRH-EDUSP, 2000. 943p.
- Ulzurrun, M.D.D.; Castillo, F.E.; Beltran, J.M.; Lasala, L.C. **Principios y aplicaciones del drenaje**. 1978. 401p.

- Upadhyaya, A.; Chauhan, H.S. An analytical solution for bi-level drainage design in the presence of evapotranspiration. **Agricultural Water Management**, v.45, p.169-184, 2000.
- Vildoso, T.A. **Relação entre a produção relativa e o índice diário de estresse para a cultura da cenoura (*Daucus carota* L.)** Viçosa: UFV 1995. 43p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - UFV, 1995.
- Villela, S.M.; Mattos, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1975. 245p.
- Wesseling, J. Crop growth and wet soils. In: VAN SCHILFGAARDE, J. 1^a ed., **Drainage for agriculture**. Madison: American Society of Agronomy, p.7-37, 1974.
- Williamson, R.F.; Kriz, G.J. Response of agricultural crops to flooding, depth of water table and soil gaseous composition. **Transactions of the ASAE**, v.13, n.2, p.216-220, 1970.
- Workman, S.R.; Skaggs, R.W. Comparison of two drainage simulation models using field data. **Transactions of the ASAE**, v.32, n.6, p.1993-1938, 1989.
- Yu, B. Improvement and evaluation of CLIGEN for storm generation. **Transactions of the ASAE**, v. 43, n.2, p.301-307, 2000.
- Zirbel, M.L.; Larson, C.L.; Slach, D.C. Laboratory method for evaluation Green-Ampt infiltration parameters. St. Joseph, ASAE, 1982. 12p. (**ASAE Paper 82-2033**).