

Indriati Ilse Nangoi
Engenheiro Agrônomo

Probabilidade de redução relativa da produtividade do milho por ocorrência de déficit hídrico em função de datas de plantio na região de Piracicaba, SP

Orientador:
Prof. Dr. **LUIZ ROBERTO ANGELOCCI**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Física do Ambiente Agrícola

**Piracicaba
2010**

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP**

Nangoi, Indriati Ilse

Probabilidade de redução relativa da produtividade do milho por ocorrência de déficit hídrico em função de datas de plantio na região de Piracicaba, SP / Indriati Ilse Nangoi. - - Piracicaba, 2010.

75 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2010.
Bibliografia.

1. Balanço hídrico 2. Milho - Produtividade 3. Plantio - Planejamento 4. Probabilidade
Título

CDD 633.15
N178p

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

*Aos meus pais,
Ignatius Nangoi e Indrawati Nangoi,
Dedico.*

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, por toda dedicação a mim, aos meus irmãos, Idryan e Inna, e cunhado, Alexandre, por todo apoio e incentivo. Esses que participam da minha formação pessoal e que são as minhas bases na vida, essenciais em todos os momentos. À minha sobrinha Sofia, por trazer ainda mais alegria à família.

Ao Professor Angelocci, por ter dado continuidade a minha orientação durante o mestrado, por ter sido cuidadoso, atencioso e disponível ao orientar, pelos tantos ensinamentos ao longo da elaboração deste trabalho, motivos de muita admiração.

Ao Professor Paulo César Sentelhas, pela confiança e aceitação em orientar-me no início do mestrado e por continuar sempre presente e disponível em ajudar-me. Pelas diversas oportunidades proporcionadas em todo o período de convivência, que agregaram enorme enriquecimento profissional e pessoal.

Ao professor Valter Barbieri, por confiar no meu trabalho, por ser sempre solícito para me ajudar.

À professora Sônia, também pela disponibilidade em atender às minhas dúvidas.

Ao professor Fábio Marin, que incentivou e apoiou os meus estudos.

À Ângela, Fernando, Chiquinho, Robson, Silvia Zinsly, pela gentileza e amizade, muito obrigada.

Aos amigos e colegas de trabalho que me ajudaram sempre que precisei e solicitei, e que fizeram do ambiente de estudo um local acolhedor, prazeroso, divertido. Adriano, Alexandre, Andrea, Anderson, Deise, Eliane, Fábio, Gabriel, Jeanine, Jones, Lucas, Nilceu, a presença de cada um de vocês foi especial durante os momentos em que estive na ‘cúpula’, sentirei saudades.

Em especial, agradeço ao amigo Gabriel Blain, que por muitas vezes atendeu aos meus telefonemas cheios de dúvidas, que esteve sempre solícito em me ajudar, pelo apoio e consideração.

Ao professor Antonio Bianchi, pela ajuda, apoio, amizade.

Àqueles com quem tive o prazer de conviver no último ano do mestrado e que sem dúvida modificaram a minha vida pra melhor, os amigos: Fernanda Ikeda, Julia Mangureira, Rodrigo

Matos, Rodrigo Cascalles, Shirley Famelli.

À querida Liége, que me ajudou a superar obstáculos, a perceber a vida com outros olhos, a viver com mais leveza, obrigada.

Aos amigos que, independente da distância, estiveram sempre presentes, torcendo pelo meu sucesso e ajudando-me durante os anos de mestrado, cada um a sua maneira: Augusto Santos, Ângela Sanchez, Bianca Martins, Bruna Pessoa, Claudia Milene, Duccio Cannoni, Fernanda Sanchez, Gabriela Abud, Matheus Cafalchio, Thiago Adabo, Renata Vittoretti, Sabrina Bakker, Tharic Galuchi.

Aos amigos do Kung Fu.

Às meninas da republica Trem q Pula, pela amizade e carinho de todas.

À CAPES, à EMBRAPA, que auxiliaram financeiramente os meus estudos, exercendo papel fundamental para a realização deste trabalho.

Àqueles que eu possa ter me esquecido de mencionar, sintam-se agradecidos igualmente.

MUITO OBRIGADA!

SUMÁRIO

RESUMO	9
ABSTRACT	11
LISTA DE FIGURAS	13
LISTA DE FIGURAS	13
1 INTRODUÇÃO	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 Exigências térmicas do milho	19
2.2 Exigências hídricas do milho	21
2.3 Balanço Hídrico	27
2.4 Coeficiente de sensibilidade da cultura ao déficit hídrico (fator K_y)	29
2.5 Distribuições de probabilidade	30
3 MATERIAL E MÉTODOS	33
3.1 Local e séries climatológicas	33
3.2 Cálculo do balanço hídrico	33
3.3 Estimativa dos déficits relativos de produtividade	40
3.4 Probabilidades de ocorrência do déficit relativo de produtividade	41
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1 Estimativa das durações dos subperíodos fenológicos	45
4.2 Probabilidades de ocorrência de déficit de produtividade	47
4.2.1 Comparação entre os ajustes das distribuições beta e gama	47
4.2.2 Probabilidades de déficit de produtividade estimadas pela distribuição gama	55
5 CONCLUSÕES	65
REFERÊNCIAS	67

RESUMO

Probabilidade de redução relativa da produtividade do milho por ocorrência de déficit hídrico em função de datas de plantio na região de Piracicaba, SP

O déficit hídrico é uma das principais causas de perdas de produtividade agrícola. No Brasil, algumas regiões sofreram reduções elevadas na produção de milho (*Zea mays* L.), provocadas por estiagens, por exemplo, nas safras de 1995/1996, 1996/1997, 1998/1999, 1999/2000, 2004/2005. Para contornar ou minimizar situações de limitação hídrica é importante o planejamento da época de cultivo para melhor aproveitamento das condições climáticas locais e eficiência do manejo da lavoura. O presente trabalho objetivou subsidiar o planejamento de plantio do milho na região de Piracicaba, São Paulo, estimando a probabilidade de quebra de produtividade de cultivares de ciclo médio em decorrência do déficit hídrico, em função de datas de semeadura simuladas para o primeiro dia de cada decêndio entre setembro e fevereiro. Para isso, foi utilizado o modelo de balanço hídrico de Thornthwaite e Mather (1955) modificado por Barbieri et al. (2003), pelo qual é possível considerar a variação da capacidade de água disponível no solo ao longo do ciclo, acompanhando o crescimento do sistema radicular e representando de forma mais aproximada a situação real de armazenamento de água no solo do que o uso de um só valor de CAD ao longo do ciclo da cultura. Foram calculadas deficiências hídricas decendiais, obtidas pelo balanço hídrico sequencial de cultura em série de dados climatológicos de 1975 a 2008 e estimados os déficits de produtividade potencial para cada simulação de plantio, usando o coeficiente de sensibilidade da cultura ao déficit (Ky). Para cada ano, foram estimados os déficits relativos de produtividade e verificado o ajuste dos dados estimados a duas funções de probabilidade, a beta e a gama completa, tendo a segunda apresentado melhor desempenho, sendo escolhida para representar a frequência de ocorrências dos valores nas séries. Para os plantios em cada primeiro dia dos decêndios de outubro e novembro, a probabilidade gama (P_{gama}) de ocorrerem déficit relativo de produtividade de até 10% é maior que 50%, isto é, a cada dois anos de plantio, ao menos um tem quebra de produtividade menor que 10%. Nesse período, destacam-se o primeiro e terceiro decêndios de outubro, com $P_{\text{gama}} = 67\%$ e $P_{\text{gama}} = 63\%$, respectivamente, de quebra relativa inferior a 10%. Nos meses de setembro, dezembro e janeiro, a probabilidade de déficits relativos de produtividade de até 20% é maior que 50%, indicando maior efeito da ocorrência do déficit hídrico nesses meses. No mês de fevereiro, a probabilidade de perdas maiores que 1/5 da produção é superior a 75%, sendo recomendável irrigação para aumentar a produtividade das semeaduras nesse mês, principalmente no período crítico. Perdas acima de 50% são difíceis de ocorrer, sendo a probabilidade máxima igual a 23,5% no terceiro decêndio de fevereiro.

Palavras-chaves: Balanço hídrico; Déficit hídrico; Milho (*Zea mays* L.); Probabilidade; Planejamento de plantio; Déficit relativo de produtividade

ABSTRACT

Probability of relative yield decrease in corn crop caused by water deficits in function of different sowing dates, in Piracicaba region, SP, Brazil

Water deficit is one of the mainly reasons of crop yield decrease in agriculture. In Brazil, drought caused serious damages in some regions to corn (*Zea mays* L.) production in the crops of 1995/1996, 1996/1997, 1998/1999, 1999/2000, 2004/2005. Planning the sowing dates plays an essential role to mitigate the effect of limited water conditions and in the more effective use of local weather on farm management. The current work aimed to estimate probabilities of relative yield decrease in corn crop caused by soil water deficits in function of the sowing dates, by simulating plantings in ten-day basis from September to February, in order to support the decision-making process and the planning of corn cropping in Piracicaba region, São Paulo State, Brazil. Soil water deficit was estimated by using the water balance model of Thornthwaite and Mather (1955) adapted by Barbieri et al. (2003) for take into account the variation of available water capacity in the soil during the crop cycle, following the root system growth, thus rendering it a more representative model of soil water balance. For each year of data series on climate conditions from 1975 to 2008, the relative deficits of potential yield were calculated using the ten-day values of water deficit obtained from the serial water balance model, for each simulated sowing date from September 1st to February 21st. Then, the yield response factor to water deficit (K_y) was applied to relate the potential yield deficit to evapotranspiration deficit, observed in 18 sowing dates in 33 years of the study. Two probability density functions were tested, the beta and the complete gamma; the latter showed best fit to the observed frequency data and was chosen to estimate the frequency of yield occurrences in the series. Yield losses below 10% were more frequent in October and November, with gamma probability (P_{gamma}) above 50%, which means that in two years, at least one will provide conditions to have relative yield higher than 90%. In this period, the first and the third ten-days of October are highlighted with $P_{\text{gamma}} = 67\%$ and $P_{\text{gamma}} = 63\%$, respectively. In September, December and January, the gamma probability was higher than 50% considering relative yield decreases equal or lower than 20%. In February, the probability of losing 1/5 of the productivity is above 75%. In this case, irrigation is necessary to increase the yield, mainly during the critical period (flowering and grain filling). Yield losses higher than 50% are difficult to happen and the maximum probability is 23.5% in the third ten-days of February.

Keywords: Water balance; Water deficit; Corn (*Zea mays* L.); Probability; Sowing dates; Relative yield decrease

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Comparação das probabilidades estimadas pelas distribuições beta e gama com as frequências observadas de déficit relativo de produtividade por intervalos de classe, referentes às simulações de plantio de setembro. Valores das variáveis expressos em porcentagem..... 49
- Figura 2 – Comparação das probabilidades estimadas pelas distribuições beta e gama com as frequências observadas de déficit relativo de produtividade por intervalos de classe, referentes às simulações de plantio de outubro. Valores das variáveis expressos em porcentagem..... 50
- Figura 3 – Comparação das probabilidades estimadas pelas distribuições beta e gama com as frequências observadas de déficit relativo de produtividade por intervalos de classe, referentes às simulações de plantio de novembro. Valores das variáveis expressos em porcentagem..... 51
- Figura 4 – Comparação das probabilidades estimadas pelas distribuições beta e gama com as frequências observadas de déficit relativo de produtividade por intervalos de classe, referentes às simulações de plantio de dezembro. Valores das variáveis expressos em porcentagem..... 52
- Figura 5 – Comparação das probabilidades estimadas pelas distribuições beta e gama com as frequências observadas de déficit relativo de produtividade por intervalos de classe, referentes às simulações de plantio de janeiro. Valores das variáveis expressos em porcentagem..... 53
- Figura 6 – Comparação das probabilidades estimadas pelas distribuições beta e gama com as frequências observadas de déficit relativo de produtividade por intervalos de classe, referentes às simulações de plantio de fevereiro. Valores das variáveis expressos em porcentagem..... 54
- Figura 7 – Distribuições de frequência das probabilidades gama para intervalos de classe de déficit relativo de produtividade, em valores percentuais, referentes às simulações decendiais de plantio de setembro e outubro..... 56

- Figura 8 – Distribuições de frequência das probabilidades gama para intervalos de classe de déficit relativo de produtividade, em valores percentuais, referentes às simulações decendiais de plantio de novembro e dezembro57
- Figura 9 – Distribuições de frequência das probabilidades gama para intervalos de classe de déficit relativo de produtividade, em valores percentuais, referentes às simulações decendiais de plantio de janeiro e fevereiro58

1 INTRODUÇÃO

O déficit hídrico é um dos principais responsáveis por perdas de produtividade nas lavouras em todo o mundo. Sua ocorrência provoca alterações substanciais no crescimento e desenvolvimento das plantas. Esse tipo de déficit, resultado da extrema variabilidade pluviométrica, pode ser considerado uma manifestação de seca em nível agrícola, gerando impactos sobre outros segmentos da economia. Sob esse ponto de vista mais abrangente, a limitação de água pode se constituir em eventos extremos de seca agrícola, meteorológica, hidrológica, econômica e social, ocorrendo em praticamente todas as zonas climáticas, ocasionando custo e miséria maiores que os decorrentes de furacões, terremotos e todos os outros desastres climáticos (MAVI; TUPPER, 2004). Sivakumar (2005), investigando quais eventos extremos de tempo e clima são mais impactantes na agricultura, obteve a seca como o mais indicado (91%) em 57 países do mundo.

Esse fenômeno climático envolve várias características meteorológicas e hidrológicas, com enfoque no déficit de precipitação, nas diferenças entre evapotranspiração real e potencial, na escassez de água no solo, na redução do nível de água em reservatórios, assim por diante. Na agricultura, os efeitos da deficiência hídrica variam de uma cultura para outra e, também, de acordo com o estágio fenológico em que o déficit ocorre. Para se ter uma idéia da magnitude dos danos em uma lavoura de milho, por exemplo, períodos secos de uma semana durante o início do florescimento podem promover reduções de produção ao redor de 40-50%, ao passo que sob as mesmas condições, deficiência hídrica posterior à plena fecundação acarretará danos da ordem de 25 a 32% (FANCELLI; DOURADO NETO, 2003).

No Brasil, além das secas regulares que ocorrem em boa parte do país e principalmente na região Nordeste, as secas esporádicas, que se caracterizam pela ocorrência acima dos níveis normais ou durante a estação úmida, também vêm causando problemas constantes na agricultura. Na safra de 2004/2005, por exemplo, o Rio Grande do Sul se confrontou com quatro meses de deficiência hídrica, que resultaram em prejuízos da ordem de cinco milhões de reais somente com as perdas agrícolas devido à seca, considerada a maior dos últimos 50 anos (AGUIAR, 2005).

Atualmente, o principal meio de driblar tais efeitos é pelo planejamento de plantio e de manejo da cultura, incluindo um possível plano de irrigação. Tal tarefa deve levar em conta o aspecto financeiro e ambiental, no sentido, por exemplo, da viabilidade de implantação de um

sistema de irrigação e do uso racional de recursos naturais como a água. Assim sendo, a escolha do período de realização do cultivo é indispensável para um planejamento com economia, de modo que o plantio seja feito em datas nas quais as culturas possam aproveitar ao máximo possível as condições climáticas mais favoráveis ao seu crescimento/desenvolvimento ao longo do ciclo.

Muitos estudos têm sido feitos para entender os efeitos do déficit hídrico nas culturas em suas diferentes fases fenológicas, para que as fases críticas, mais sensíveis à falta de água, não coincidam com períodos de maior frequência de ocorrência de déficit.

Entretanto, é também de grande interesse saber o quanto se perde, em termos de produtividade, mesmo que sejam seguidas as recomendações de datas de semeadura. Conhecer as possíveis perdas provocadas por déficits hídricos durante todo o ciclo pode ser bastante útil para o planejamento de plantio de lavouras subsequentes. Além disso, políticas públicas de desenvolvimento agrícola podem ser subsidiadas por esse tipo de informação.

Para se determinar o efeito do déficit hídrico sobre a produtividade nas culturas anuais, pode-se fazer uso do modelo que relaciona o déficit de produtividade com o déficit de evapotranspiração, através do coeficiente de sensibilidade K_y (DOOREENBOS; KASSAM, 1994). Por esse modelo, admite-se existir uma relação linear entre o déficit de produtividade e o déficit hídrico, este último quantificado pelo déficit de evapotranspiração, ou seja, $(1-ETR/ETP)$, sendo ETR e ETP a evapotranspiração real da cultura e a evapotranspiração de referência, respectivamente. Considera-se que essa linearidade ocorre até um déficit de evapotranspiração em torno de 0,5 a 0,6.

Uma forma prática de se quantificar o déficit de evapotranspiração é pela determinação do balanço hídrico de base climatológica, pelo modelo de Thornthwaite e Mather (1955). Esse modelo é bastante difundido no Brasil e sua elaboração é facilitada caso se use o método de Thornthwaite (1948) para a estimativa da evapotranspiração potencial ou de referência, que apresenta bom desempenho para as condições do estado de São Paulo (CAMARGO, 1962; CAMARGO; SENTELHAS, 1997). Originalmente, esse modelo de balanço foi desenvolvido para se determinar a variação do armazenamento hídrico no solo, considerando-se a evapotranspiração potencial (ETP) e a evapotranspiração real (ETR) de uma cobertura vegetal extensa, de porte baixo e cobrindo totalmente o terreno, definindo-se a deficiência hídrica como a diferença entre ETP e ETR. O uso do balanço hídrico nessa forma, com dados médios (balanço

hídrico “médio” ou “normal”) ou com séries temporais (balanço hídrico “sequencial” ou “seriado”), tem mais aplicação climatológica geral do que específica para a agricultura.

Para a aplicação agrícola, são feitas modificações nesse balanço, como a introdução dos conceitos de evapotranspiração máxima (ET_m) e evapotranspiração real (ETR) da cultura. Outra modificação é utilizar valores variáveis da capacidade de água disponível no solo (CAD) de acordo com o crescimento em profundidade do sistema radicular ao longo do ciclo da cultura (DOURADO NETO; VAN LIER, 1991; BARBIERI et al., 2003) como uma forma de se ter um modelo mais próximo à realidade do balanço de massas de uma cultura.

O milho é um dos cereais de maior importância econômica para o Brasil e, pelas condições de plantio, incluindo no estado de São Paulo a época das águas e a da safrinha, tem no déficit hídrico uma das grandes causas de perda de rendimento. Um procedimento para minimizar as perdas é manejar a data de plantio, considerando-se a probabilidade de sua ocorrência nos diferentes subperíodos de desenvolvimento, principalmente na floração.

No Estado de São Paulo, Alfonsi et al. (1997a; 1997b) determinaram as melhores datas de plantio do milho tendo por base a probabilidade de atendimento da demanda hídrica dessa cultura pela precipitação, principalmente no sub-período de floração e formação de grãos, ou seja, na fase de maior sensibilidade do milho ao déficit hídrico. Brunini et al. (2001) também estudaram as épocas mais adequadas ao cultivo do milho, porém, em função dos menores riscos de seca, geada e chuva excessiva nos períodos fenológicos críticos.

A essas importantes informações de origem agroclimática, seria interessante ter outra sobre a probabilidade de perda de produtividade da cultura para diferentes datas de plantio em função da ocorrência dos déficits hídricos ao longo do ciclo de cultivo.

Uma alternativa é determinar a probabilidade de perda de produtividade em função do período de plantio por estimativa do déficit hídrico pelo uso do balanço hídrico climatológico, em uma forma a se levar em conta tanto os efeitos do crescimento da parte aérea da cultura, pelo uso do coeficiente de cultura no cálculo da evapotranspiração máxima, como da variação da profundidade do sistema radicular para se trabalhar com a disponibilidade hídrica no solo.

O efeito da variação da profundidade efetiva do sistema radicular pode ser simulado pelo uso do balanço hídrico climatológico modificado (BARBIERI et al., 2003), não tendo sido encontrados na literatura aplicações dessa forma de estimativa da disponibilidade hídrica.

A proposta do presente trabalho é determinar as probabilidades de perda de produtividade potencial do milho na região de Piracicaba em função de datas (em base decedial) de semeadura, com a estimativa de evapotranspiração da cultura por meio de um balanço hídrico de base climatológica que leva em conta a variação da profundidade de exploração do solo pelo sistema radicular (Barbieri et al., 2003), com cálculos do déficit de evapotranspiração e seus efeitos sobre a produtividade potencial na região de Piracicaba, SP, em função da data de semeadura.

Como objetivos específicos têm-se:

a) Estimar o déficit relativo de produtividade da cultura do milho em função da deficiência hídrica relativa simulada para diferentes datas de semeadura entre setembro e fevereiro para Piracicaba, SP, pelo uso do balanço hídrico seriado de Thornthwaite e Mather (1955) adaptado por Barbieri et al. (2003).

b) Testar a aderência das distribuições beta e gama às séries de déficit relativo de produtividade e, em função daquela de melhor desempenho, determinar a probabilidade de ocorrência de níveis de perda de produtividade de milho em função das datas de semeadura, como subsídio ao planejamento de plantio dessa cultura na região.

De um modo geral, o estudo busca servir de auxílio a modelos decisórios que incorporam riscos no setor agrícola, contribuir com as atividades de zoneamento agrícola de risco climático e colaborar com as tomadas de decisão no plantio do milho em âmbito regional.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Exigências térmicas do milho

A cultura do milho sofre influência marcante da temperatura ambiente ao longo do seu desenvolvimento (MOURA et al., 2007; BRUNINI et al., 2006, GADIOLI et al., 2000), sendo essa a principal causa de variação na duração do ciclo vegetativo dessa cultura (BARBANO et al. 2003). Temperaturas do ar maiores que 26°C podem acelerar o florescimento, enquanto temperaturas menores que 15,5°C podem retardá-lo. De modo geral, temperaturas médias diárias inferiores a 19°C e temperaturas médias noturnas inferiores a 12,8°C e superiores a 24°C não são apropriadas para a produção de milho. Durante a emergência a temperatura ideal no solo está aproximadamente entre 25 e 30°C, sendo prejudiciais quando inferiores a 10 °C ou superiores a 40 °C (EMBRAPA, 2008).

Simulações de desenvolvimento de plantas em função da temperatura do ar são frequentemente realizadas, sendo a duração das fases ou subperíodos comumente estimada pelo cálculo de graus-dia (°C.d) acumulados, ou seja, do acúmulo de unidades térmicas diárias pela planta para completar as diferentes fases fenológicas (MOURA et al., 2007; BRUNINI et al., 2006; ASSIS et al., 2006; NIED et al., 2005; BARBANO et al., 2003; GUISTEM et al., 2001; GADIOLI et al., 2000).

Embora o conceito de graus-dia contenha várias aproximações (PEREIRA et al., 2002), a sua simplicidade é um fator que contribui muito para a sua aceitação e emprego nos mais diferentes estudos que envolvem a fenologia de culturas. Em resumo, a duração de cada fase ou subperíodo está associada à soma de graus-dia, que atingindo determinado valor (constante térmica) indica que a exigência térmica dos subperíodos ou mesmo de todo o ciclo foi satisfeita. Para isso, são contabilizadas as temperaturas do ar entre as denominadas “temperaturas bases” ou “basais”, as quais indicam os limites térmicos dentro dos quais ocorre o desenvolvimento.

A temperatura base superior do milho é bastante elevada, em torno de 35° C (EMBRAPA, 2008), raramente atingida nos cultivos no Brasil, podendo ser descartada nos cálculos nessas condições. A temperatura base inferior (T_b) é aquela abaixo da qual o metabolismo da planta estabiliza ou ocorre muito lentamente (FANCELLI; DOURADO-NETO, 2003; BRUNINI, et al., 2000). A T_b pode variar entre cultivares e entre as fases fenológicas de uma mesma cultivar. No

subperíodo emergência-florescimento masculino a Tb está aproximadamente entre 7,5 a 8,1°C para cultivares de milho pipoca (BARBANO et al., 2003; FANCELLI; DOURADO-NETO, 1997). Para variedades e híbridos de milho comum a Tb está em torno de 8°C a 10°C (BARBANO et al., 2000; BRUNINI et al., 1995; CARDOSO et al., 1997). Para facilitar a aplicação da Tb nos cálculos, é comum adotar uma única temperatura base para todo o ciclo (PRETT, 1992; apud GADIOLI et al.; 2000).

As exigências térmicas variam mais entre os estudos do que a temperatura base. Em cultivares de milho pipoca, foram necessários em média 783 °C.d para o período de germinação-florescimento, usando temperatura base de 7°C a 8°C (BARBANO et al., 2003). Para cultivares superprecoces de milho no semi-árido de Pernambuco, Moura et al. (2007) observaram exigência de 653 °C.d para a ocorrência do subperíodo da emergência à floração e 1866 °C.d até a maturação, utilizando temperatura base de 10°C.

Segundo Brunini et al. (1995), as exigências térmicas de cultivares super-precoces, precoces e médios por eles usadas situaram-se entre 1075 e 1409 unidades térmicas, para cumprir o período desde a emergência até o início da maturação fisiológica, sendo a temperatura base igual a 8°C. Para cultivares tardias, da emergência até o início do florescimento masculino, a soma de graus-dia encontrada pelos autores foi de 852 e 853, e de 910 a 932 unidades térmicas até o início da formação de espigas, esta última com temperatura base 10°C.

Barbano et al. (2000) encontraram 912 unidades térmicas necessárias para o desenvolvimento de cultivares de milho desde a semente até o florescimento masculino. Guissem et al. (2001) encontraram valores semelhantes, 912,23°C.d e 984,15°C.d para milho superprecoce e médio, respectivamente, com temperatura base de 8°C, sendo que os primórdios do pendão apareceram com 414,46°C.d e os primórdios da espiga com 693,49 °C.d.

Para determinar o período entre o final da formação das espigas até o final da maturação, usa-se um indicativo do ponto de colheita, quando a planta atinge a maturidade fisiológica, critério que é controverso. Pode-se considerar o teor de água no grão, o máximo de acúmulo de matéria seca, o aparecimento da camada preta na região pedicelo-placenta, aparecimento da linha de transformação em amido (FESSEL et al., 2001).

2.2 Exigências hídricas do milho

A cultura do milho requer em seu ciclo um mínimo de 350-500 mm de água para se ter uma produção satisfatória sem necessidade de irrigação; produtividades maiores estão associadas a um consumo entre 500 e 800 mm considerando todo o ciclo. O consumo é maior da iniciação floral até a maturação, podendo atingir 5 a 7 mm/dia dependendo da demanda atmosférica; sob condições de clima quente e seco, o consumo raramente excede 3mm/dia (EMBRAPA, 2008).

O efeito da disponibilidade hídrica é notório na expressão da produtividade potencial de uma cultura (NIED et al., 2005). Cardoso et al. (2004), em simulações de rendimentos de milho safrinha, obtiveram 8.100kg/ha em cenários de produção potencial e 5.305 kg/ha em situações de deficiência hídrica. COSTA et al. (2008) estudaram os efeitos de diferentes níveis de água no período vegetativo e reprodutivo do milho e constataram significativas reduções na produção de matéria seca e na diminuição da área foliar.

Matzenauer et al., (1995) concluíram que o consumo relativo de água, expresso pela relação entre a evapotranspiração real (ETR), dependente do grau de disponibilidade hídrica no solo, e a evapotranspiração máxima da cultura (ETm) ocorrente em condições de plena disponibilidade hídrica e a deficiência hídrica foram as variáveis mais eficientes para indicar as variações de rendimento de grãos de milho no Rio Grande do Sul.

A evapotranspiração de uma cultura é determinada por fatores climáticos, da planta, de manejo e do solo. Os fatores climáticos são radiação líquida (R_n), temperatura, umidade relativa (UR) e vento; sendo que o efeito combinado deles determina a demanda atmosférica por vapor d'água. Os fatores da planta são: espécie e índice de área foliar (IAF); altura da planta; e profundidade do sistema radicular, relacionado ao volume de solo explorado pelas raízes para absorção de água e atendimento da demanda hídrica atmosférica. Os fatores de manejo e do solo são: espaçamento e densidade de plantio; orientação do plantio; capacidade de armazenamento de água (CAD) pelo solo; e impedimentos físico/químicos, que podem limitar o desenvolvimento radicular e/ou criar um ambiente desfavorável às raízes (PEREIRA et al., 2002).

A evapotranspiração potencial (ETP), por definição, é aquela que ocorre em uma superfície extensa totalmente coberta por cobertura vegetal de porte baixo (normalmente gramado) em crescimento ativo e sem restrição hídrica. Nesse caso os fatores da planta estão bem determinados, e os fatores de manejo e do solo não representam restrição à evapotranspiração.

Assim, a ETP é um indicativo da demanda evapotranspirativa da atmosfera de um local, podendo ser calculada empiricamente em função dos fatores climáticos. Como critério de normalização das estimativas de evapotranspiração, o conceito de ETP na maioria das vezes é substituído pelo de evapotranspiração de referência, o qual contém as condições de contorno definidas para ETP, como cobertura total e extensa do terreno, sem ocorrência de deficiência hídrica, sendo definida uma cobertura padrão (hipotética) com altura entre 8 e 12 cm.

O número de métodos climatológicos para a estimativa da evapotranspiração potencial ou de referência é muito grande, sendo o desempenho deles variável de acordo com as condições climatológicas regionais, o que levou o Comitê de Exigências Hídricas na Irrigação da Sociedade Americana de Engenheiros Civis a promover um estudo de desempenho de 20 métodos em 11 localidades sob diferentes condições climáticas que possuíam medidas lisimétricas. Simultaneamente, instituições de pesquisa da Europa se uniram em um consórcio para promover o mesmo tipo de estudo (ALLEN et al., 1998).

Desses estudos, concluiu-se que o método de combinação de Penman, com a abordagem proposta por Penman-Monteith podia ser recomendado como o método padrão para uma larga gama de condições ambientais e aplicáveis a situações de estimativas a curto-prazo. Todos os outros métodos exigem estudo de desempenho e/ou calibrações locais. Desses métodos, um dos mais simples e de bastante uso no Brasil é o de Thornthwaite (1948), que exige somente medidas de temperatura do ar.

Diversas têm sido as contribuições de estudos relativas à precisão e consistência do método de Thornthwaite (1948) evidenciando tanto aspectos positivos quanto negativos do seu desempenho (SANDERSON, 1948; 1950; BURGOS; VITAL, 1951; PELTRON et al., 1960; STANHILL, 1961; CAMARGO, 1962; PRUITT, 1964; SEDIYAMA, 1972; PRUITT; DOORENBOS, 1977; PEREIRA; CAMARGO, 1989; CHENG et al., 2005; YIN; BROOK, 1992; CAMARGO; SENTELHAS, 1997; CAMARGO; CAMARGO, 2000; LU et al., 2007). Nesses estudos são ressaltadas características como a subestimativa da ETP em regiões de clima árido e semi-árido e a não consideração de efeitos advectivos da atmosfera. Por outro lado, salienta-se a praticidade do método e a precisão de estimativa em regiões de clima úmido.

No estudo realizado em três regiões do planalto de São Paulo – Campinas, Pindamonhangaba e Ribeirão Preto, Camargo (1962) comparou valores de evapotranspiração obtidos por evapotranspirômetros com os estimados pelo método de Thornthwaite (1948), Blaney

e Criddle (1950), de Blaney e Criddle modificado por Camargo (1961, 1962) e Penman, usando nomogramas de Van Bavel (1956). O autor verificou que o modelo de Thornthwaite foi o mais preciso e exato, com melhor consistência e correlação (CAMARGO; CAMARGO, 2000).

Para essas mesmas localidades, Camargo e Sentelhas (1997) avaliaram o desempenho de vinte métodos de estimativa de evapotranspiração, obtendo melhores resultados pelos métodos de Camargo (1971), Thornthwaite (1948), Thornthwaite com índice T (CAMARGO, 1962), e Priestley e Taylor (1972). Em decorrência desses resultados, entende-se que o método de Thornthwaite para estimativa da evapotranspiração de referência mostra-se adequado para emprego na região de Piracicaba cujo clima é úmido, podendo ser utilizado em estudos de balanço hídrico nesse local.

A evapotranspiração máxima da cultura é determinada pela multiplicação da evapotranspiração de referência pelo coeficiente de cultura K_c específico, com valor variável em função do índice de área foliar (IAF) da cultura, que por sua vez, varia com o crescimento e desenvolvimento da planta (PEREIRA, 2002).

Para a maioria das culturas anuais, o K_c varia de 0,3 a 1,2, desde o estabelecimento da cultura até o florescimento e frutificação. Nas culturas anuais, observa-se aumento gradual nos valores de K_c até a fase do florescimento, que coincide com a época de máxima área foliar, decrescendo a partir do final da frutificação e início da maturação, em função da senescência das folhas (PEREIRA et al. 2002).

Alfonsi et al. (1990) sugeriram valores de K_c para as condições de cultivo no Estado de São Paulo baseados nos coeficientes apresentados no boletim da FAO por Doorenbos e Kassam (1979), e em informações obtidas junto aos fitotecnistas do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC). Os valores adotados pelos autores foram K_c de 0,3 a 0,5 no estágio inicial; 0,7 a 0,9 para o vegetativo; 1,0 a 1,2 para o florescimento/enchimento de grãos; 0,8 a 0,9 para a maturação e 0,5 a 0,6 para a colheita.

Por fazer parte dos cálculos de evapotranspiração das culturas, o K_c participa no processo de determinação das necessidades hídricas das mesmas, tanto em termos de manejo da água de irrigação como, também, do planejamento de sistemas hidro-agrícolas (PEREIRA, 2005).

A planta de milho é bastante eficiente no aproveitamento da água em termos de total de matéria seca produzida; entre os cereais, essa espécie é que apresenta o maior potencial de produtividade de grãos (DOORENBOS; KASSAM, 1979; FANCELLI; DOURADO NETO,

2003; FORNASIERI, 1992). Por outro lado, seu desenvolvimento e rendimento sofrem grande interferência de estresse hídrico, seja por deficiência ou por excesso de água.

Existem diversos estudos sobre os efeitos do déficit hídrico no rendimento de grãos de milho e os períodos mais sensíveis ao déficit para esta cultura. Os resultados variam dependendo da duração e intensidade do déficit, do local, tipo de solo e cultivares (MATZENAUER et al., 1995).

Para alguns autores, a ocorrência de déficits hídricos pouco intensos em algumas fases da cultura pode beneficiar a produção. Por exemplo, na fase inicial da cultura, pode concorrer para o estímulo de maior desenvolvimento radicular das plantas, desde que o solo abaixo de 15-20cm da superfície apresente-se abastecido com água disponível (FANCELLI; DOURADO NETO, 2003). Durante a maturação, para muitas espécies, uma deficiência hídrica pode favorecer a qualidade do produto, sendo até desejado que isso aconteça (PEREIRA et al., 2002). Segundo Doorembos e Kassam (1979), a diminuição de produção de grãos decorrente de déficits hídricos durante o florescimento pode ser menos pronunciada quando as plantas sofrem deficiência hídrica no período vegetativo.

Entretanto, os efeitos da deficiência hídrica são em sua maioria prejudiciais à produtividade das lavouras de milho. A insatisfação hídrica ao longo do ciclo da cultura altera o seu comportamento, fazendo-a economizar água na tentativa de atingir o subperíodo de produção de sementes, refletindo na produtividade (SANTOS; CARLESSO, 1998; FORNASIERI, 1992).

O efeito da deficiência hídrica está associado à interferência em processos metabólicos da planta e pode resultar em aumento da suscetibilidade a insetos, pragas e patógenos em geral. Além disso, estresses hídricos podem levar à redução no vigor vegetativo, no índice de área foliar e na altura da planta, bem como na produção e fertilidade do pólen, além de alterar sobremaneira o sincronismo de florescimento das inflorescências masculinas e femininas (FANCELLI; DOURADO NETO, 2003).

Um modo simples e econômico de contornar as condições de déficit hídrico é fazer um bom planejamento do cultivo, melhorando o aproveitamento das condições climáticas locais e possibilitando a racionalização do uso da água em irrigações. O planejamento do plantio de uma lavoura é determinante da possibilidade de seu sucesso ou insucesso. As decisões de plantio afetarão todos os processos seguintes ao longo dos cerca de 120 dias de ciclo da cultura, e é por ocasião do plantio que se obtêm boa ou má população de plantas ou densidade de plantio

(EMBRAPA, 2007). Prejuízos podem ser evitados fazendo com que as fases do ciclo da cultura mais sensíveis à falta d'água coincidam com os períodos de maior disponibilidade hídrica. Além disso, o potencial de rendimento de grãos pode ser maximizado com a escolha adequada da época de semeadura sem aumentar substancialmente os custos de produção, por beneficiar a interação genótipo-ambiente (FORSTHOFER et al., 2006).

Plantios que proporcionam a coincidência dos períodos críticos da cultura com aqueles com menores restrições climáticas auxiliam no aproveitamento das condições ambientais da região (BARBANO et al., 2003). Os períodos críticos quanto à exigência de água de cereais se concentram na fase do florescimento e formação de grãos (YAO; SHAW, 1964; DOORENBOS; KASSAN, 1979; GRANT et al., 1989; MEDEIROS et al., 1991; TOMMASELLI; VILLA NOVA, 1994; MATZENAUER et al., 1995; PEREIRA, 2002; FANCELLI; DOURADO NETO, 2003; FARRÉ; FACI, 2009). Por exemplo, a ocorrência de déficits durante o período de formação de grãos pode provocar perdas de produtividade pela redução no tamanho dos grãos (DOORENBOS; KASSAM, 1979); ou ainda, quando o déficit coincide com a época de polinização tem-se aumento do abortamento das flores de milho (SANTOS; CARLESSO, 1998).

Afirma-se também que o período extremamente crítico ocorre entre 15 dias antes e 15 dias após o aparecimento da inflorescência masculina, no qual se deve atentar para suprimento hídrico satisfatório, aliado a temperaturas adequadas. Por esse motivo e pelo milho apresentar menor habilidade de produção de floradas em relação a outras culturas, como por exemplo o feijão ou a soja, o seu plantio deve ser criteriosamente planejado, de modo a assegurar a coincidência dos períodos críticos com um período estacional que apresente temperaturas médias favoráveis (25 a 30°C) e chuvas frequentes (FRATTINI, 1975; MICHELON et al., 2003, apud FANCELLI; DOURADO NETO, 2003).

Para MICHELON et al. (2003), a distribuição das chuvas é o que determina o melhor período de cultivo do milho em regiões tropicais e, para a maioria das regiões no sul do Brasil, a época preferencial de plantio do milho é o mês de outubro, tanto para as cultivares precoces como as tardias. Outros autores apontam a precipitação pluvial como o principal fator de oscilações de rendimento agrícola (ORTOLANI; CAMARGO, 1987).

No estado de São Paulo, as melhores datas de semeadura têm sido pesquisadas em função do regime pluviométrico de diferentes regiões. Alfonsi et al. (1997a) estudaram as probabilidades de precipitações maiores ou iguais à evapotranspiração máxima da cultura do milho (ET_m) nos

períodos críticos (florescimento e enchimento de grãos) de cultivares superprecoce, precoce e normais, para algumas localidades do estado de São Paulo. Os autores investigaram os períodos de semeadura de modo que os subperíodos florescimento e enchimento de grãos ocorram quando há maiores probabilidades de atendimento hídrico, oferecendo menor risco de déficit hídrico nesse período crítico. Foi observado que em Campinas o período mais favorável para semeadura do milho para a cultivares de ciclo médio é o do último decêndio de setembro (21/09) até o último decêndio de outubro (21/10).

Alfonsi et al. (1997b) analisaram as probabilidades de suprimento hídrico ao longo de todo o ciclo do milho, baseados na probabilidade de chuvas maiores ou iguais à evapotranspiração máxima de cultura, e observaram que nos plantios de outubro e novembro, a probabilidade de atendimento hídrico permanece acima de 50% em praticamente todo o ciclo, para as localidades de Mococa, Ribeirão Preto, Campinas e Votuporanga.

Em outro estudo, Alfonsi et al. (1998) verificaram a probabilidade de atendimento hídrico em relação à evapotranspiração de referência (ET_o), incluindo a probabilidade de armazenamento hídrico de água no solo ser maior ou igual a 50 mm. As regiões Norte/Nordeste e Leste/Nordeste, representadas pelas localidades de Votuporanga e Mococa, apresentaram melhores condições hídricas para as semeaduras nos meses de outubro e novembro.

Ainda para o estado de São Paulo, Brunini et al. (2001) pesquisaram a época de semeadura do milho de modo a se obter 80% de probabilidade de sucesso de redução de riscos climáticos, com base no atendimento de três critérios: índice de satisfação das necessidades de água (ISNA) igual ou maior que 0,55 na fase de florescimento e produção, temperatura mínima média durante o ciclo igual ou superior a 10°C e duração econômica máxima de 150 dias para ciclos precoce e superprecoce e de 165 dias para ciclo normal. O ISNA foi calculado com base no balanço hídrico, considerando-se CAD variável de acordo com o tipo de solo (solos arenosos= 30 mm; solos de textura média, 50 mm; solos argilosos, 70 mm). Na análise espaço-temporal das 390 localidades estudadas, os autores encontraram que para solos arenosos há forte restrição de semeadura em boa parte do estado mesmo nos meses da estação chuvosa, sendo os riscos reduzidos para semeaduras em outubro e novembro para solos com maior CAD, voltando a ter importância (aumento dos riscos) em dezembro e janeiro. As restrições térmicas e hídricas de fevereiro a abril tornam os plantios nesse período de alto risco na maioria das regiões do estado.

2.3 Balanço Hídrico

Para entender a metodologia de cálculo do balanço hídrico utilizada neste trabalho, proposta por Barbieri et al. (2003), é interessante primeiro compreender os princípios e aproximações do modelo proposto por Thornthwaite e Mather (1955).

O uso do método de estimativa de ETP de Thornthwaite exige somente a temperatura do ar, o que torna bastante atrativa a metodologia de cálculo, cuja eficácia para a região de Piracicaba e entorno já foi comprovada em alguns estudos (CAMARGO, 1962; OLIVEIRA, 1971; CAMARGO; SENTELHAS, 1997).

O balanço hídrico (BH) é a contabilização de água no solo, ou seja, o balanço entre os fluxos de entrada e saída de água de um volume de controle, verificando-se a variação de armazenamento de água neste volume, pela aplicação do princípio de conservação de massa. Para o balanço hídrico climatológico, considera-se um volume com área superficial fixa e unitária (por exemplo, 1 m²) e profundidade definida de acordo com o sistema radicular das plantas, sendo teoricamente a área representada pelo ponto de medida dos elementos climáticos, principalmente a chuva (PEREIRA et al., 2002).

O balanço hídrico climatológico (BHC) é dito cíclico (ou “normal”) quando calculado com valores médios ou com as normais climatológicas, servindo como indicador da disponibilidade hídrica na região, para a classificação climática e como subsídio para decisões de recomendações de cultivo. Quando empregado em tempo real em períodos sequenciais ao longo do(s) ano(s) é chamado de BH seriado (ou sequencial) e serve para monitorar as condições hídricas do local, possibilitando quantificar as necessidades de irrigação em uma cultura e relacionar a produtividade das culturas com o déficit hídrico (CAMARGO; PEREIRA, 1990).

O balanço hídrico climatológico de Thornthwaite e Mather (1955) tem a chuva como suprimento natural de água no solo e a evapotranspiração potencial (ETP) como dreno de água para satisfação da demanda atmosférica. Por este balanço são estimados o armazenamento de água no solo (ARM), a evapotranspiração real (ETR), a deficiência hídrica (DEF) e o excedente hídrico (EXC) (SENTELHAS et al., 1999).

Os cálculos do BHC proposto por Thornthwaite e Mather (1955) podem ser feitos em uma planilha, conforme detalhado e exemplificado em Pereira et al. (2002).

Essa mesma base de cálculo para cálculo do BHC pode ser usada para elaboração do BH de cultivo. Basta conhecer o coeficiente de cultura (K_c), obtido em função do índice de área foliar (IAF) da cultura em suas fases fenológicas. O K_c deve ser multiplicado por ETP, obtendo-se a evapotranspiração máxima da cultura (ET_m); a ET_m substitui a ETP na continuidade dos cálculos do balanço hídrico. É igualmente importante a escolha do valor da capacidade de água disponível (CAD), que deverá levar em conta o volume efetivo ocupado pelo sistema radicular da cultura, ou seja, o volume de solo explorado pela planta para absorção de água para satisfação da demanda hídrica atmosférica e características físico-hídricas do solo.

No cultivo de plantas anuais, a cada plantio desenvolve-se um novo sistema radicular que inicialmente explora camadas superficiais do solo, e ao longo do ciclo fenológico cresce explorando camadas mais profundas. Exemplificando, independente de dispor de um volume grande do solo para exploração de água, o volume efetivo do sistema radicular de uma cultura anual estará limitado apenas a uma camada superficial nos primeiros estádios de desenvolvimento da planta.

Por esse motivo, alguns autores (DOURADO NETO; JONG VAN LIER, 1991; BARBIERI et al., 2003) têm buscado maior precisão na elaboração do BH de cultivos de modo que se considere, além do crescimento aéreo das plantas (fator incluso no K_c), o seu crescimento radicular.

Barbieri et al. (2003) adaptaram a metodologia de Thornthwaite e Mather (1955) para cálculo de um balanço hídrico que considera a profundidade efetiva do sistema radicular. Nessa abordagem é considerado tanto a evapotranspiração máxima, que depende da área foliar, quanto o crescimento em profundidade da raiz, pela incorporação subsequente de camadas de solo que contribuem para a evapotranspiração de acordo com o avanço do estágio fenológico da cultura no balanço hídrico.

Seja no BH tradicional ou no BH adaptado, a escolha da capacidade de água disponível (CAD) a ser utilizada pode ser feita em função da profundidade efetiva (Z_e) de exploração do solo pelas raízes das plantas e pelo tipo de solo (THORNTHWAITE; MATHER, 1955; ALFONSI et al., 1990; PEREIRA et al., 2002; MANFRON et al., 2003).

Para as características do solo, pode-se adotar, por critérios práticos, valores médios de CAD em milímetros por metro de profundidade, variando de 90 mm/m (ALFONSI et al. 1990) a

140 mm/m (DOORENBOS; KASSAM, 1994) para solos de textura média, embora valores extremos de até 200 mm por metro de profundidade possam ser encontrados para solos argilosos.

Quanto ao sistema radicular, a profundidade e a taxa de crescimento das raízes são bastante influenciadas pelo regime pluviométrico e práticas de irrigação adotadas, estratificação estrutural e textural entre outros (DOORENBOS; KASSAM, 1994). A profundidade efetiva do sistema radicular é entendida como aquela em que se concentram cerca de 80% das raízes (PEREIRA et al., 2002). Alguns autores encontraram a média de Z_e para a cultura do milho em profundidades até 50 cm (BARRETO, 1991; WAHAB et al., 1976 apud BASSOI, 1994). Para o Estado de São Paulo, pode-se considerar que a média de Z_e para a cultura do milho varia entre 40 a 50 cm (ALFONSI et al., 1990; CRUZ; THAMES, 1972, apud FORNASIERI, 1992).

Em estudo de testes de modelos de estimativa de profundidade efetiva do sistema radicular (Z_e) do milho a partir de graus-dia e de desenvolvimento relativo, Manfron et al. (2003) fizeram medidas de Z_e de três híbridos de milho, com colheita aos 140 dias após a semeadura, (DAS), em experimento realizado na ESALQ, USP, em Piracicaba, SP (22°42' S, 47°38' W e 546m de altitude), em um solo classificado como Nitossolo Vermelho Eutroférico. Nas condições edafoclimáticas do estudo, a profundidade efetiva máxima ocorreu a partir de aproximadamente 76 DAS, atingindo 0,70 m, ou seja, acima dos valores de 40 a 50 cm adotados nos trabalhos citados no parágrafo anterior.

2.4 Coeficiente de sensibilidade da cultura ao déficit hídrico (fator K_y)

O coeficiente de sensibilidade da cultura ao déficit hídrico (fator K_y) foi proposto por Doorenbos e Kassam (1994) para representar a resposta ao déficit hídrico durante épocas distintas de seu ciclo, já que, como exposto anteriormente, as culturas respondem de diferentes modos às situações de restrição hídrica, dependendo da fase fenológica. O coeficiente relaciona o déficit relativo de produtividade com o déficit relativo de evapotranspiração, como mostra a eq. (1):

$$K_y = \frac{(1 - PR/PP)}{(1 - ETR/ET_m)} \quad (1)$$

sendo,

PR = produtividade real

PP = produtividade potencial

ETR = evapotranspiração real

ETm = evapotranspiração máxima da cultura

A deficiência hídrica é caracterizada sempre que a evapotranspiração real (*ETR*) for menor que a evapotranspiração máxima da cultura (*ETm*). Entende-se por *ETR* como a evapotranspiração máxima de cultura penalizada pela ocorrência de déficit hídrico. Portanto, toda vez que a $ETR/ETm < 1$ há deficiência hídrica, e quanto menor for essa relação maior será a deficiência e seu efeito sobre a produtividade (PEREIRA et al., 2002).

Valores de *Ky* obtidos a partir de experimentos com milho, representando variedades altamente produtivas, bem adaptadas ao ambiente de crescimento e desenvolvidas sob alto nível de manejo de culturas, foram propostos por Doorenbos e Kassam (1994), com os seguintes valores para os subperíodos: vegetativo, 0,4; floração, 1,5; frutificação, 0,5; maturação, 0,2.

A aplicação do *Ky* para planejamento, projeto e operação dos perímetros irrigados permite a quantificação do suprimento de água e sua utilização em termos de rendimento da cultura e produção total para área do projeto (DOORENBOS; KASSAM, 1994).

2.5 Distribuições de probabilidade

Em climatologia, a distribuição beta e a gama estão entre as mais utilizadas para variáveis contínuas. A distribuição gama é flexível e usada na solução de problemas nos quais a variável climatológica tem limite inferior muito próximo de zero e nenhum limite superior estatístico (THOM, 1958). A função de densidade beta é muito versátil na representação de proporções ou probabilidades (NADARAJAH, 2003).

A distribuição beta também tem sido usada e recomendada para caracterizar a variabilidade temporal de séries de evapotranspiração real (YAO, 1969; ASSIS et al., 1996; SAAD, 1990; BLAIN; BRUNINI, 2006, 2007). Blain e Brunini (2007), objetivando desenvolver um índice de seca padronizado, verificaram o ajuste de séries decendiais de evapotranspiração real (*ETR*) às distribuições normal, beta, log-normal e gama, para 13 localidades do estado de São Paulo,

incluindo Piracicaba. Pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, os autores observaram melhor desempenho da distribuição beta.

Outros autores também verificaram bom ajuste da distribuição beta na representação da distribuição de frequência da evapotranspiração de referência (ETR), com aplicações no dimensionamento de sistemas de irrigação (BACK, 2007; SAAD et al., 2002) e em modelos iterativos de estimativa da ETR (MARQUES Jr et al., 1995).

Aderência adequada também foi encontrada em séries da relação evapotranspiração real/potencial (ETR/ETP) para diversos períodos na cidade de Campinas, segundo o teste Kolmogorov-Smirnov (BLAIN et al., 2009).

A distribuição de probabilidade gama é frequentemente usada para ajustes de séries de precipitação (ASSIS et al., 1996). Estudos mostram ajuste adequado dessa distribuição para períodos decendiais, quinzenais e mensais de chuva, além de melhor desempenho em relação à log-normal (DOURADO-NETO et al., 2005; LONGO et al., 2006; JUNQUEIRA et al., 2007) e em relação à distribuição de Weibull (DOURADO-NETO et al., 2005; HUSAK et al., 2007).

A distribuição de probabilidade gama tem sido aplicada em modelos preditivos para monitoramento de secas (HUSAK et al., 2007), na detecção de mudanças na frequência de precipitação ao longo dos anos (ASAKEREH et al., 2008), em avaliações relacionadas a alterações climáticas (YOO et al., 2005).

Silva et al. (1998) estudaram o ajuste de quatro distribuições de probabilidade à séries mensais e decendiais de deficiência hídrica no solo e observaram aderência adequada das distribuições lognormal, exponencial e gama em escala decendial dos dados.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local e séries climatológicas

Foram utilizadas as séries de temperatura média do ar e de precipitação de 1975 a 2008, da estação meteorológica convencional do campus “Luiz de Queiroz”, USP, localizada no município de Piracicaba, São Paulo. As coordenadas geográficas são: 22° 42' 30" sul, 47° 38' 00" oeste, 546 metros de altitude. O clima segundo a classificação de Köppen é úmido, correspondente ao Cwa – subtropical, com inverno seco.

Cada mês da série de 1975 a 2008 foi subdividido em decêndios a partir do 1° dia do mês com o último período variando entre 8 a 11 dias dependendo do mês e ano em questão. Foram simuladas sementeiras por períodos decendiais, sempre a partir do primeiro dia do decêndio, desde setembro (plantio em 1/09) até o terceiro decêndio de fevereiro (plantio em 21/02). Considerou-se que nesse dia de plantio e nos subseqüentes do decêndio a umidade do solo era propícia à sementeira, de modo que até o final do decêndio ocorreu um nível adequado de emergência e o “stand” formado não foi afetado pelas condições de umidade do solo no período.

As durações médias dos estádios fenológicos do milho foram estimadas com o uso das exigências térmicas (graus-dia; °C.d) e temperaturas-base indicadas nos trabalhos de Brunini et al. (1995) e Alfonsi et al. (1997), sendo as constantes térmicas adotadas: 852.5°C.d da emergência até o fim do desenvolvimento vegetativo, 921°C.d até o final do florescimento e 1394.5°C.d até o final da frutificação. O período de maturação foi fixado em 25 dias, e o da sementeira até a emergência fixado em 10 dias, seguindo os critérios de MAPA (2009) para um cultivar de ciclo médio.

3.2 Cálculo do balanço hídrico

Primeiramente, foram escolhidos valores da capacidade de água disponível (CAD) usados nos cálculos do balanço hídrico. O solo foi dividido em camadas e os cálculos dos valores de CAD foram feitos de modo proporcional à variação da capacidade de exploração do volume de solo pelas raízes da planta, considerando o valor médio de CAD de cerca de 130 mm por metro de profundidade de solo. Para isso, foram utilizados os valores de profundidade efetiva (Z_e) do

sistema radicular observados por Manfron et al. (2003) para três cultivares em Piracicaba, SP, num solo classificado como Nitossolo Vermelho Eutroférico, sendo feita uma adaptação para se obter Z_e decendiais (Tabela 1).

Para estimativa da evapotranspiração máxima da cultura, foram utilizados coeficientes de cultivo (K_c) com base nos valores sugeridos por Alfonsi et al. (1990). Foram feitas adaptações de modo a possibilitar o ajuste dos K_c às durações de ciclo de cultivo, desde o ciclo iniciado no primeiro decêndio de setembro (01/set) até o iniciado no último decêndio de fevereiro (21/fev). Após o final da maturação, o balanço seqüencial continuou a ser calculado no período subsequente até o plantio na mesma data do ano seguinte assumindo-se o secamento da cultura (K_c diminui de 0,80 para 0,75 e em seguida 0,50) e posterior ocupação do solo por cultura invasora, até esta cobrir totalmente o terreno (K_c aumenta de 0,50 para 0,7 e em seguida 0,9) até a cobertura total com K_c igual a 1,00, sendo esse valor unitário usado até o decêndio anterior à data do plantio do ano subsequente (Tabela 1).

Tabela 1 – Valores adotados por decêndio do coeficiente de cultura (K_c) e da profundidade efetiva do sistema radicular (Z_e), para o milho, cultivar de ciclo médio; e da capacidade de armazenamento de água disponível (CAD) no solo em função da Z_e

DAS*	Z_e (cm)	CAD (mm)	K_c (plantios de 01/set a 01/out; e em 11/fev)	K_c (plantios de 11/out a 01/fev)	K_c (plantio em 21/fev)
0 – 10	6	10	0,35	0,35	0,35
11 – 20	15	20	0,40	0,45	0,40
21 – 30	22	28	0,50	0,60	0,50
31 – 40	35	45	0,60	0,75	0,60
41 – 50	46	58	0,70	0,90	0,70
51 – 60	60	75	0,90	1,00	0,90
61 – 70	66	83	1,00	1,15	1,00
71 – 80	70	90	1,15	1,20	1,15
81 – 90	70	90	1,20	1,20	1,20
91 – 100	70	90	1,20	1,00	1,20
101 – 110	70	90	1,00	0,90	1,00
111 – 120	70	90	0,90	0,80	1,00
121 – 130	70	90	0,80	0,75	0,90
131 – 140	70	90	0,75	0,50	0,80
141 – 150	70	90	0,50	0,70	0,75
151 – 160	-	90	0,70	0,90	0,50
161 – 170	-	90	0,90	1,00	0,70

Fonte: K_c adaptado a partir de ALFONSI et al. (1990); Z_e adaptados a partir de MANFRON et al. (2003).

Nota: (*) DAS = dias após a semeadura.

A evapotranspiração potencial (ETP) pode ser estimada por diversos métodos, tendo-se adotado o de Thornthwaite (1948). Os valores de ETP foram multiplicadas pelo coeficiente de cultura, sendo obtida a correspondente evapotranspiração máxima de cultura (ETm), para todos os decêndios dos anos estudados (de janeiro de 1975 a julho de 2008).

Os cálculos do balanço hídrico segundo Thornthwaite e Mather (1955) foram realizados em planilha eletrônica Excel, iniciando-se o preenchimento das colunas com as séries referentes ao número de dias de cada período (decendial), temperatura média do ar, precipitação e fotoperíodo médio do decêndio e ETm. Com isso, puderam ser calculadas as diferença entre precipitação (P) (entrada de água) e ETm (saída de água).

Os cálculos do balanço hídrico sequencial foram iniciados em 1º de janeiro de 1975, considerando-se que nesse dia ocorreu o armazenamento máximo adotado (CAD=90 mm) no solo, em decorrência do regime de precipitação do mês de dezembro de 1974, no qual ocorreu altura pluviométrica de 248 mm, sendo 92 mm no último decêndio. Nesta etapa, os procedimentos de cálculo seguiram aqueles descritos a seguir (Pereira et al., 2002), com obtenção dos primeiros valores negativos de acumulados (NEG ACUM) resultantes de P-ETP, sendo dispostos em uma coluna. A partir desses valores de NEG ACUM foram obtidos os primeiros valores de armazenamentos (ARM) (eq. 2), até que P-ETP voltou a ser positivo. Os valores seguintes de ARM foram obtidos pela soma do valor positivo de P-ETP ao ARM do período anterior e os valores de NEG ACUM passaram a ser calculados em função do armazenamento (ARM) (eq. 3). Sempre que P-ETm voltava a ser positivo, o NEG ACUM tornava-se nulo.

$$ARM = CAD * e^{\left(\frac{NEG.ACUM}{CAD}\right)} \quad (2)$$

$$NEG.ACUM = CAD * \ln\left(\frac{ARM}{CAD}\right) \quad (3)$$

Atente-se para o fato de que o ARM não deve ultrapassar a CAD predefinida, correspondente ao armazenamento máximo. Assim, foram calculados os valores de:

- alterações no armazenamento (ALT): ALT = ARM em questão - ARM anterior

- ETR: - quando $P-ET_m \geq 0 \Rightarrow ETR = ET_m$
- quando $P-ET_m < 0 \Rightarrow ETR = P + ALT$
- deficiências hídricas (DEF): $DEF = ET_m - ETR$
- excedentes hídricos: - quando $ARM < CAD \Rightarrow EXC = 0$
- quando $ARM = CAD \Rightarrow EXC = (P-ET_m) - ALT$

O procedimento acima prosseguiu durante o primeiro ano ainda não cultivado (1975/1976) até o decêndio anterior ao decêndio de semeadura. Desse modo puderam ser quantificados os armazenamentos iniciais de água no solo no decêndio que precede o plantio no primeiro ano de simulação. Esse armazenamento foi distribuído proporcionalmente no perfil do solo, representando a quantidade de água disponível para a planta a ser semeada no decêndio seguinte, como detalhado mais adiante.

O balanço hídrico sequencial da cultura foi, então, calculado para o período de 1975 a 2008 para os meses de setembro a dezembro e de 1976 a 2008 para os meses de janeiro e fevereiro, com os dados de ET_m supracitados para simular as semeaduras ao longo de toda a série, utilizando-se, então, a adaptação do modelo de Thornthwaite e Mather (1955) sugerida por BARBIERI et al. (2003), na qual a CAD do solo varia de acordo com a profundidade efetiva do sistema radicular. Nos intervalos em que não havia simulação de cultivo, foi adotado que o solo estava com cobertura vegetal invasora total, de modo que sua evapotranspiração máxima era igual à ETP. Assim, o armazenamento hídrico no solo no início do período de cada semeadura foi igual ao armazenamento final do decêndio anterior, calculado pelo balanço hídrico sequencial com a cobertura invasora.

Seguindo esse modelo, o solo foi dividido em n camadas à medida que a simulação de variação da profundidade do sistema radicular indicava que uma camada subsequente era atingida, o valor da CAD era aumentado (CAD de n camadas), sendo acompanhado pelo somatório de armazenamento – referente ao volume de água até a n -ésima camada ocupada pelas raízes. O número de camadas foi estabelecido em função da profundidade das raízes, conforme descrito na Tabela 1.

Denominou-se ‘armazenamento inicial (ARM_i)’ a quantidade de água armazenada em n camada(s) no início de cada decêndio – ou seja, até o decêndio anterior ao atual; ‘armazenamento final (ARM_f)’ a quantidade de água armazenada em n camada(s) ao final de cada decêndio; e

‘armazenamento remanescente (ARMr)’ a quantidade de água que supostamente já existia em cada camada no decêndio anterior ao plantio, supondo que a água do pré-plantio infiltrou-se por percolação ao longo do perfil do solo.

Os armazenamentos remanescentes (ARMr) corresponderam a um percentual da quantidade de água armazenada no decêndio precedente ao plantio, sendo as seguintes, respectivamente da primeira até a oitava camada: 11%; 11%; 9%; 19%; 14%; 19%; 9%; 8%. Esses percentuais foram obtidos dividindo-se por 90 mm (CAD total) a variação da CAD entre um decêndio e o decêndio anterior. No primeiro ano de cultivo (1975/76), o ARMr foi advindo do armazenamento do decêndio anterior ao plantio, obtido no primeiro balanço hídrico, descrito anteriormente. Nos anos seguintes, foi utilizado o armazenamento final de cada decêndio precedente à semeadura calculado pelo balanço hídrico modificado.

Pelo procedimento, foram preenchidas duas colunas de armazenamento (ARM) e duas de negativo acumulado (NEG ACUM) na seguinte ordem: armazenamento inicial (ARMi), negativo acumulado inicial (NEG ACUMi), negativo acumulado final (NEG ACUMf) e armazenamento final (ARMf). Saliente-se novamente que o uso do termo ‘inicial’ aqui utilizado refere-se ao primeiro valor de ARM ou de NEG ACUM calculado em cada decêndio, ou seja, a cada decêndio tem-se um ARM e um NEG ACUM inicial, com os correspondentes valores de ARM e NEG ACUM finais.

Principiou-se pelo preenchimento dos armazenamentos iniciais em camadas ao longo do perfil do solo. O ARMi de cada primeiro decêndio em cada cultivo foi igual ao ARMr dos mesmos decêndios. Os ARMi dos decêndios seguintes foram contabilizados pela soma do ARMr do mesmo decêndio com o ARMf do decêndio anterior e os possíveis excedentes da(s) camada(s) superior(es), ou seja, (ARM inicial na camada n) = (ARMr das $n-1$ camadas) + (ARMf até a camada $n-1$) + (EXC das $n-1$ camadas).

Os NEG ACUMi foram calculados em função dos ARMi (**equação 2**). Todo o primeiro valor negativo de P-ETm após uma sequência de valores positivos foram computados como NEG ACUMi e quando houve na sequência outro valor negativo de P-ETm, o NEG ACUMi foi calculado pela equação 2 e somado ao NEG ACUMi anterior.

Quando P-ETm foi negativo, os armazenamentos finais (ARMf) foram obtidos pela **equação 1**; quando P-ETm foi positivo fez-se a soma do armazenamento inicial com a P-ETm do mesmo decêndio.

Pelo fato de o solo ter sido dividido em camadas, o excedente hídrico de camada(s) superior(s) foi contabilizado como entrada de água para camadas inferiores. Sendo assim, cada vez que houve entrada de água (chuva) no solo, foi feito o cômputo do volume recebido e possível excesso, em primeiro lugar, na primeira camada (1). Caso houvesse excesso, ou seja, caso a $P-ET_m$ excedesse a capacidade máxima de armazenamento dessa primeira camada (ARM1), considerou-se que o excedente hídrico (EXC1) foi drenado para a camada abaixo (2), passando a ser fonte de entrada de água dessa segunda camada. Foi calculado, então, o balanço de água na segunda camada de modo que, se o volume de água recebido no decêndio ($EXC1 + (Precipitação - ET_m)$) ultrapassasse a capacidade de armazenamento da camada em questão (ARM2), o volume que excedesse esse ARM2 percolaria como entrada de água para a camada logo abaixo (3), e assim por diante até a última camada correspondente à máxima profundidade efetiva das raízes.

Como descrito anteriormente, para o cálculo da evapotranspiração real (ETR) foi preciso calcular as alterações no armazenamento (ALT). Neste procedimento, as alterações corresponderam ao armazenamento final subtraído do armazenamento inicial.

No restante do ano, em que o BH de cultura deixou de ser calculado porque se assumiu o término do período de cultivo para determinado decêndio de plantio, a CAD foi mantida máxima e igual a 90mm, como anteriormente descrito. Foram obtidas as relações entre evapotranspiração real e evapotranspiração máxima de cultura (ETR/ET_m) por decêndio.

O método foi aplicado de modo sequencial para toda a série, com variações da CAD apenas durante os períodos de cultivo. Desse modo, no final foram obtidos valores decendiais das relações entre evapotranspiração real e a evapotranspiração máxima de cultura (ETR/ET_m), para se estimar o déficit relativo de evapotranspiração em cada decêndio do período de cultivo ($1-ETR/ET_m$). Como foram adotados valores de duração dos subperíodos múltiplos de cinco e o balanço hídrico foi calculado em base decendial, os déficits relativos de evapotranspiração foram calculados pelas médias aritméticas proporcionais às durações dos subperíodos. Por exemplo, se o desenvolvimento vegetativo durou 55 dias, os déficits relativos para decêndios inteiros (de 1 a 10, de 11 a 20 e/ou de 21 a 30) tiveram peso um e para o último período, na verdade um quinquídio, o peso do déficit calculado decendialmente teve peso 0,5, sendo a soma de ($1-ETR/ET_m$) dividida por 5,5.

A título de ilustração, apresenta-se a seguir um exemplo numérico de elaboração do balanço hídrico (Tabela 2), conforme apresentado por BARBIERI et al. (2003).

Tabela 2 – Exemplo de elaboração do balanço hídrico de Thornthwaite e Mather (1955) adaptado por Barbieri et al. (2003), em que: ‘prof. raiz’ é a profundidade do sistema radicular, e ‘ Δ CAD’ é a variação da CAD

Decên- dio	Prof. Raiz	CAD	Δ CAD	ARMr	Excedentes	P-ETm	ARMi	NEG ACUMi	NEG ACUMf	ARMf
1ºDez	10	16	0	8	0	-40	8	-11	-11-40= -51	1
2ºDez	20	32	16	8	0	-37	8+1=9	-42	-42-37= -79	3
3ºDez	30	48	16	8	0	-70	3+8=11	-72	-72-70= -142	2
1ºJan	40	64	16	8	0	45	2+8=10	0	0	10+45=55
2ºJan	50	80	16	8	$80-(63+20) =$ $= 3$	20	55+8=63	0	0	(63+20=83) 80
3ºJan	60	96	16	8	$96-(91+23) =$ $= 18^a$	23	80+11=91	0	0	(91+23=114) 96
1ºFev	70	112	16	8	10 ^b	-40	96+16=112	0	-39	78
2ºFev	80	128	16	8	2 ^c	-10	78+16=94	-39	0	87
3ºFev	100	160	32	16	21 ^d	75	87+18=106	0	0	(106+75=181) 160
1ºMar	120	192	32	16	5 ^e	-20	160+32=192	0	0	173
2ºMar	140	224	32	16	5	35	173+21=194	0	0	(194+35=229) 224
3ºMar	150	240	16	8	7	10	224+13=237	0	0	(237+10=247) 240
1ºAbr	150	240	0	0	0	-20	240+0=240	0	-20	221
2ºAbr	150	240	0	0	0	-60	221+0=221	-20	-80	172
3ºAbr	150	240	0	0	0	-55	172+0=172	-80	-135	137

Fonte: adaptado de Barbieri et al. (2003).

^a 8 mm permanecem na camada em questão e 10 mm percolam para a camada seguinte inferior;

^b 10 mm recebidos da camada superior, 8 mm permanecem nesta camada, percolando 2 mm para a camada inferior;

^c 2 mm recebidos da camada superior;

^d 16 mm permanecem na camada em questão e 5 mm percolam para a camada seguinte inferior;

^e 5 mm recebidos da camada superior.

No exemplo, são diferentes os valores para o crescimento radicular e para a CAD em cada período, sendo o ARM igual a 0,8 mm/cm de solo e CAD máxima de 160 mm. Apenas o armazenamento remanescente (ARMr) foi calculado de outro modo, equivalendo 50% da CAD no primeiro decêndio e a 50% da variação da CAD nos decêndios seguintes, não sendo usados os valores percentuais do armazenamento anterior ao plantio como supracitado.

3.3 Estimativa dos déficits relativos de produtividade

Foram feitas simulações de plantio para dezoito períodos, do primeiro decêndio de setembro até o último decêndio de fevereiro, estimando-se o déficit relativo de produtividade por redução do suprimento hídrico, pelo método da Zona Agroecológica (FAO) (eq. 4), utilizando-se os coeficientes de sensibilidade (K_y) recomendados pela FAO (DOORENBOS; KASSAM, 1994):

$$\left(1 - \frac{PR}{PP}\right) = K_y * \left(1 - \frac{ETR}{ETm}\right) \quad (4)$$

em que:

PR = produtividade real;

PP = produtividade potencial;

ETR = evapotranspiração real da cultura;

ETm = evapotranspiração máxima da cultura.

Os valores de $\left(1 - \frac{PR}{PP}\right)$ representam o déficit relativo de produtividade, sendo expressos na escala de 0 a 1 ou em valores percentuais. Eles são calculados por subperíodo, considerando-se um efeito multiplicativo da redução de produtividade ao longo dos subperíodos. Ressalte-se que não houve preocupação em se saber o valor absoluto de PP, mas sim em se trabalhar com efeito sobre a relação PR/PP.

Foram calculadas as médias ponderadas de $(1 - ETR/ETm)$ em função das durações das fases fenológicas em todas as simulações de crescimento da cultura, sendo posteriormente usadas na equação 10.

3.4 Probabilidades de ocorrência do déficit relativo de produtividade

As séries de déficit de produtividade relativa $(1 - PR/PP)$ foram submetidas aos ajustes de duas funções de densidade de probabilidade, a distribuição gama e a beta, para determinar a probabilidade de ocorrência de diferentes níveis de perda de produtividade em função da data de plantio.

A função acumulativa de probabilidade da distribuição gama incompleta foi calculada por (THOM, 1958):

$$F(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha} \int_0^x x^{(\alpha-1)} e^{-\frac{x}{\beta}} dx \quad \text{para } 0 < x < \infty \quad (5)$$

$F(x)$ é, portanto, a probabilidade de ocorrência de um evento menor ou igual a x , sendo que α e β são os respectivos parâmetros de forma e escala da distribuição, e $\Gamma(\alpha)$ é a função gama.

Os parâmetros da distribuição gama foram estimados pelo método da máxima verossimilhança (THOM, 1966):

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \dots \alpha > 0, \text{ tendo que } A = \ln \bar{X} - \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(x_i) \right] \quad (6)$$

$$\hat{\beta} = \frac{\bar{X}}{\alpha} \dots \beta > 0 \quad (7)$$

A função gama é incompleta, pois não está definida para valores iguais a zero na série. Assim, a probabilidade de ocorrência de zeros foi acrescida aos valores finais da distribuição gama, como mostrado a seguir (ASSIS et al., 1996):

$$H(X) = q + (1 - q) * F(x) \quad (8)$$

sendo,

q = número de ocorrências de zero na série dividido pelo número total de observações (n).

Tem-se assim que q é a probabilidade de ocorrência de valores nulos (zero) que se acresce à probabilidade gama originando $H(x)$, e os parâmetros de $F(x)$ são estimados com a série sem os zeros.

A função de densidade de probabilidade da distribuição beta, definida no intervalo 0 a 1, foi calculada pela equação seguinte (eq. 9), sendo $f(x)$ a probabilidade de ocorrência de um evento menor ou igual a x (NIST/SEMATECH, 2006):

$$f(x) = \frac{x^{(p-1)}(1-x)^{q-1}}{B(p, q)} \quad (9)$$

em que:

$$0 \leq x \leq 1;$$

$$p, q > 0;$$

$B(p, q)$ é a função beta, definida por:

$$B(\alpha, \beta) = \int_0^1 t^{\alpha-1} (1-t)^{\beta-1} dt \quad (10)$$

Os parâmetros p e q foram estimados pelo método dos momentos (NIST/SEMATECH, 2006):

$$p = \bar{x} \left(\frac{\bar{x}(1-\bar{x})}{s^2} - 1 \right) \quad (11)$$

$$q = (1-\bar{x}) \left(\frac{\bar{x}(1-\bar{x})}{s^2} - 1 \right) \quad (12)$$

sendo \bar{x} e s^2 , respectivamente, a média aritmética e a variância dos valores de x da série estudada.

Em geral, para $p \leq 1$, a curva da função se concentra próxima de zero, e para $q \leq 1$, a curva se concentra próxima de 1. Se p e q forem menores que 1 a curva de distribuição tem forma de U. Se os dois parâmetros forem maiores que 1 a distribuição é unimodal entre 0 e 1, com maior probabilidade de concentrar para a direita quando $p > q$ e à esquerda quando $q > p$. Quando $p = q$ a distribuição é simétrica (WILKS, 2006).

Para estudo do grau de aderência das distribuições usou-se o teste de Kolmogorov-Smirnov, que verifica se é plausível considerar que determinada série de distribuição sob estudo provém de uma população com distribuição conhecida (por exemplo: gama ou beta). Sob a hipótese de nulidade, admite-se ou não que a série de dados seja estudada por meio da distribuição testada. As hipóteses foram:

H_0 : A frequência de ocorrências nas classes da população em estudo segue a distribuição testada.

H_1 : A frequência de ocorrências nas classes da população em estudo não segue a distribuição testada.

O teste de Kolmogorov-Smirnov é expresso por (WILKS, 2006):

$$D_n = \text{Max} |F_n(x) - F(x)| \quad \text{tendo que } F(x) = \frac{Fa}{n-1} \quad (13)$$

sendo:

D_n = valor calculado pelo teste;

Max = maior valor absoluto;

$F_n(x)$ = função de distribuição de probabilidade teórica;

$F(x)$ = função de distribuição de probabilidade empírica;

Fa = função acumulada de cada classe;

n = número de classes

A aderência das distribuições foi avaliada nos níveis de significância 2, 5, 10 e 20%, comparando-se os valores de D_{max} obtidos com os valores críticos da distribuição da estatística D_n (Kolmogorov-Smirnov). A hipótese H_0 é aceita quando $D_{\text{max}} < D_n$. Sendo o número de

observações (n) igual a 33, tem-se que D_{33} para 2, 5, 10 e 20% equivale, respectivamente, a 0,258; 0,231; 0,208 e 0,182.

O número de classes de frequência para comparação entre as séries, observadas e estimadas, foi definido pela raiz do número de observações, como descrito por Assis (1991). A distribuição de probabilidade com melhor aderência foi ajustada também às séries de redução percentual de produtividade ocorrida em cada fase, ou seja, o efeito do déficit hídrico durante o intervalo do início ao final de cada subperíodo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Estimativa das durações dos subperíodos fenológicos

As durações estimadas pelos critérios de exigências térmicas adotados, dos subperíodos fenológicos, da emergência ao final do desenvolvimento vegetativo, do início ao fim do florescimento e do início ao final da frutificação, ocorridas desde 1975 até 2008 nos plantios simulados tiveram variações pequenas entre os anos, menores que cinco dias (Tabela 3). Os coeficientes de variação (CV) não ultrapassaram 20% em nenhum dos casos, ou seja, os desvios de comprimento do subperíodo estiveram abaixo de 20% do valor médio. Lembre-se que a duração do período de semeadura à emergência foi considerada como igual a um decêndio e o de final da frutificação até o final da maturação como 25 dias.

Tabela 3 – Médias de 33 anos das durações estimadas, em dias, das fases fenológicas (desenvolvimento vegetativo, florescimento e frutificação) iniciadas a partir da emergência, para os 18 decêndios de semeadura, com os respectivos valores de desvio padrão (δ) em dias e de coeficiente de variação (CV) em %

Decêndio de semeadura	Desenv. vegetativo*			Florescimento*			Frutificação*		
	média	δ	CV	Média	δ	CV	média	δ	CV
01 a 10/setembro	64	4,2	6,6	15	1,6	10,4	20	1,5	7,3
11 a 20/setembro	61	4,2	6,8	15	1,6	10,6	21	1,2	5,9
21 a 30/setembro	60	3,7	6,2	14	1,4	9,8	21	1,1	5,1
01 a 10/outubro	58	3,6	6,2	14	1,3	9,3	21	1,2	5,7
11 a 20/outubro	57	3,1	5,5	14	1,3	9,4	21	1,2	5,5
21 a 31/outubro	56	2,7	4,8	13	1,2	8,7	21	1,4	6,6
01 a 10/novembro	56	2,7	4,9	13	1,3	10,0	21	1,2	6,0
11 a 20/novembro	55	2,6	4,8	13	1,3	9,9	21	1,4	6,9
21 a 30/novembro	54	2,3	4,2	13	1,2	9,8	21	1,2	5,9
01 a 10/dezembro	54	2,5	4,7	12	1,2	9,9	21	1,4	6,9
11 a 20dezembro	53	2,6	4,9	12	1,3	10,7	21	0,9	4,3
21 a 31/dezembro	53	2,5	4,6	12	1,2	9,9	21	1,1	5,4
01 a 10/janeiro	52	2,4	4,5	12	1,3	10,8	22	1,4	6,4
11 a 20janeiro	52	2,7	5,1	12	1,2	9,4	23	1,7	7,6
21 a 31/janeiro	52	2,5	4,9	13	1,6	12,6	24	2,3	9,5
01 a 10/fevereiro	53	2,7	5,1	14	1,7	12,6	26	2,8	10,9
11 a 20fevereiro	54	2,8	5,3	15	2,5	17,0	28	3,2	11,2
21 a 28/fevereiro	55	3,3	6,0	17	3,2	19,3	31	3,3	10,6

Nota: (*) corresponde à fase completada a partir do final da emergência: final do desenvolvimento vegetativo, final do florescimento e final da frutificação.

As sementeiras nos meses de setembro a início de outubro (01/10) e fevereiro levaram a uma oscilação maior nas durações do subperíodo desenvolvimento vegetativo (considerado a partir do final da emergência, ou seja, no segundo decêndio a partir da data de sementeira) ao longo dos anos, devido à sua ocorrência nos períodos primaveril e outonal, quando há aumento e diminuição gradual da temperatura, respectivamente.

Os plantios no mês de fevereiro e final de janeiro (21/01) tiveram o florescimento e a frutificação ocorrendo no início do outono e a queda gradual da temperatura ao longo do ciclo acarretou em CV mais altos em relação aos outros meses (média de 15,4% no florescimento e 10,6% na frutificação). Nos outros meses, os CV foram menores e os desvios padrões indicaram diferenças de aproximadamente um dia e meio nas durações dos subperíodos.

A duração total do ciclo desde o plantio até a maturidade fisiológica, assumindo-se a duração desta última como 25 dias, variou entre 126 a 134 dias nas sementeiras de setembro a outubro, 122 a 125 nas sementeiras de novembro/dezembro e de 122 a 138 nas sementeiras de janeiro/fevereiro. Foram todas mais elevadas que as durações sugeridas pela Embrapa Milho e Sorgo (100 a 120 de setembro a dezembro e 105 a 125 dias de janeiro a fevereiro) e pela média de 125 a 130 dias apresentada por Fancelli (1986). Por outro lado, essas durações estão dentro do intervalo de 120 a 140 dias utilizado pelo MAPA (2009) no projeto de Zoneamento Agrícola para cultivares de ciclo médio a tardio.

Em geral, pode-se dizer que as variações nas durações dos subperíodos fenológicos ao longo dos 33 anos foram suficientemente pequenas para permitirem a utilização de valores médios para cada um e tiveram pouca interferência nos resultados finais de redução de produtividade. As durações médias das fases fenológicas do milho para cada um dos 18 decêndios de plantio foram, então, aproximadas para a escala quinquidial (Tabela 4).

Tabela 4 – Médias de 33 anos das durações das fases fenológicas (desenvolvimento vegetativo, florescimento e frutificação) para os 18 decêndios de semeadura aproximadas para a escala quinquidial

Decêndio de semeadura	Desenv.vegetativo*	Florescimento*	Frutificação*
01 a 10/setembro	65	15	20
11 a 20/setembro	60	15	20
21 a 30/setembro	60	15	20
01 a 10/outubro	60	10	25
11 a 20/outubro	55	15	20
21 a 31/outubro	55	15	20
01 a 10/novembro	55	15	20
11 a 20/novembro	55	15	20
21 a 30/novembro	55	10	25
01 a 10/dezembro	55	10	20
11 a 20dezembro	55	10	20
21 a 31/dezembro	55	10	20
01 a 10/janeiro	55	10	20
11 a 20janeiro	50	15	20
21 a 31/janeiro	50	15	25
01 a 10/fevereiro	55	10	25
11 a 20fevereiro	55	15	30
21 a 28/fevereiro	55	15	35

Nota: (*) corresponde à fase completada: final do desenvolvimento vegetativo (a partir do final da emergência), final do florescimento, final da frutificação.

4.2 Probabilidades de ocorrência de déficit de produtividade

4.2.1 Comparação entre os ajustes das distribuições beta e gama

As 18 séries de déficit de produtividade relativa (1-PR/PP) obtidas, uma para cada decêndio de plantio, foram submetidas aos ajustes de distribuições de probabilidade. Na tabela 5 encontram-se os parâmetros de cada distribuição.

O parâmetro α da função de densidade gama determina a forma da curva de distribuição. Valores mais elevados de α indicam menor grau de assimetria, isto é, menor dispersão em relação à média. O parâmetro β refere-se à escala, definindo o alcance dos dados na curva de distribuição.

Pela metodologia, os parâmetros da função gama foram obtidos com as séries ausentes de zeros. Deste modo, a comparação entre os parâmetros da gama foi realizada com base nos anos em que não houve ocorrência de valores nulos. Esse fato não introduz erros apreciáveis na análise, porque somente em três simulações das séries de plantio ocorreram déficits relativos de

produtividade (1-PR/PP) iguais a zero: último decêndio de novembro (21/nov), referente ao ano de 1998/99, e do primeiro decêndio de dezembro (1/dez), referente aos anos 1975/76 e 1998/99.

A distribuição gama apresentou o melhor ajuste, sendo a hipótese (H_0) aceita para todas as séries ao nível de significância 20% do teste de Kolmogorov-Smirnov ($D_{\max} < 0,182$). A distribuição beta teve menor grau de aderência, havendo nove rejeições nesse nível de significância, ou seja, os valores de D_{\max} superaram àqueles de D_{33} (relativos a $n=33$) da tabela de Kolmogorov-Smirnov.

Tabela 5 – Parâmetros α e β da distribuição gama e parâmetros p e q da distribuição beta obtidos no ajuste das distribuições às séries de 33 anos de produtividades relativas (em porcentagem), geradas por simulações de plantios decendiais, do primeiro decêndio de setembro ao terceiro decêndio de fevereiro; valores obtidos no teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov (D_{\max})

Decêndio de semeadura	distribuição gama			distribuição beta		
	α	β	D_{\max}	P	Q	D_{\max}
01 a 10/setembro	1,360	0,158	0,063	3,328	0,376	0,137
11 a 20/setembro	1,190	0,148	0,038	4,474	0,320	0,202*
21 a 30/setembro	1,150	0,119	0,013	5,252	0,548	0,249***
01 a 10/outubro	1,184	0,075	0,036	7,679	0,111	0,267***
11 a 20/outubro	1,174	0,101	0,034	4,909	0,122	0,197*
21 a 31/outubro	0,959	0,106	0,035	7,006	0,102	0,197*
01 a 10/novembro	0,973	0,120	0,019	4,060	0,149	0,167
11 a 20/novembro	1,116	0,100	0,020	6,054	0,069	0,224**
21 a 30/novembro	0,964 ¹	0,129 ¹	0,025	4,030	0,056	0,212**
01 a 10/dezembro	1,319 ¹	0,125 ¹	0,040	3,097	0,000	0,196*
11 a 20/dezembro	1,068	0,179	0,075	1,886	0,186	0,182*
21 a 31/dezembro	0,924	0,225	0,041	1,714	0,211	0,146
01 a 10/janeiro	1,231	0,177	0,019	2,559	0,272	0,152
11 a 20/janeiro	1,432	0,163	0,045	2,714	0,294	0,169
21 a 31/janeiro	1,701	0,165	0,061	2,654	0,450	0,140
01 a 10/fevereiro	1,854	0,180	0,072	2,118	0,520	0,176
11 a 20/fevereiro	1,750	0,203	0,077	1,875	0,634	0,133
21 a 28/fevereiro	1,645	0,215	0,104	1,431	0,392	0,174

Notas: (1) parâmetros estimados com valores não nulos da série.

(*) rejeitado a 5% de significância ($D_{33}=0,231$).

(**) rejeitado a 10% de significância ($D_{33}=0,208$).

(***) rejeitado a 20% de significância ($D_{33}=0,182$).

As maiores rejeições da distribuição beta foram nas simulações de 21/set e 1/out, ao nível de 5% de significância.

Nas Figuras 1 a 6 são mostradas de forma gráfica as comparações das probabilidades estimadas pelas duas distribuições, com as frequências relativas observadas para cada um dos seis intervalos de classe de déficit relativo de produtividade.

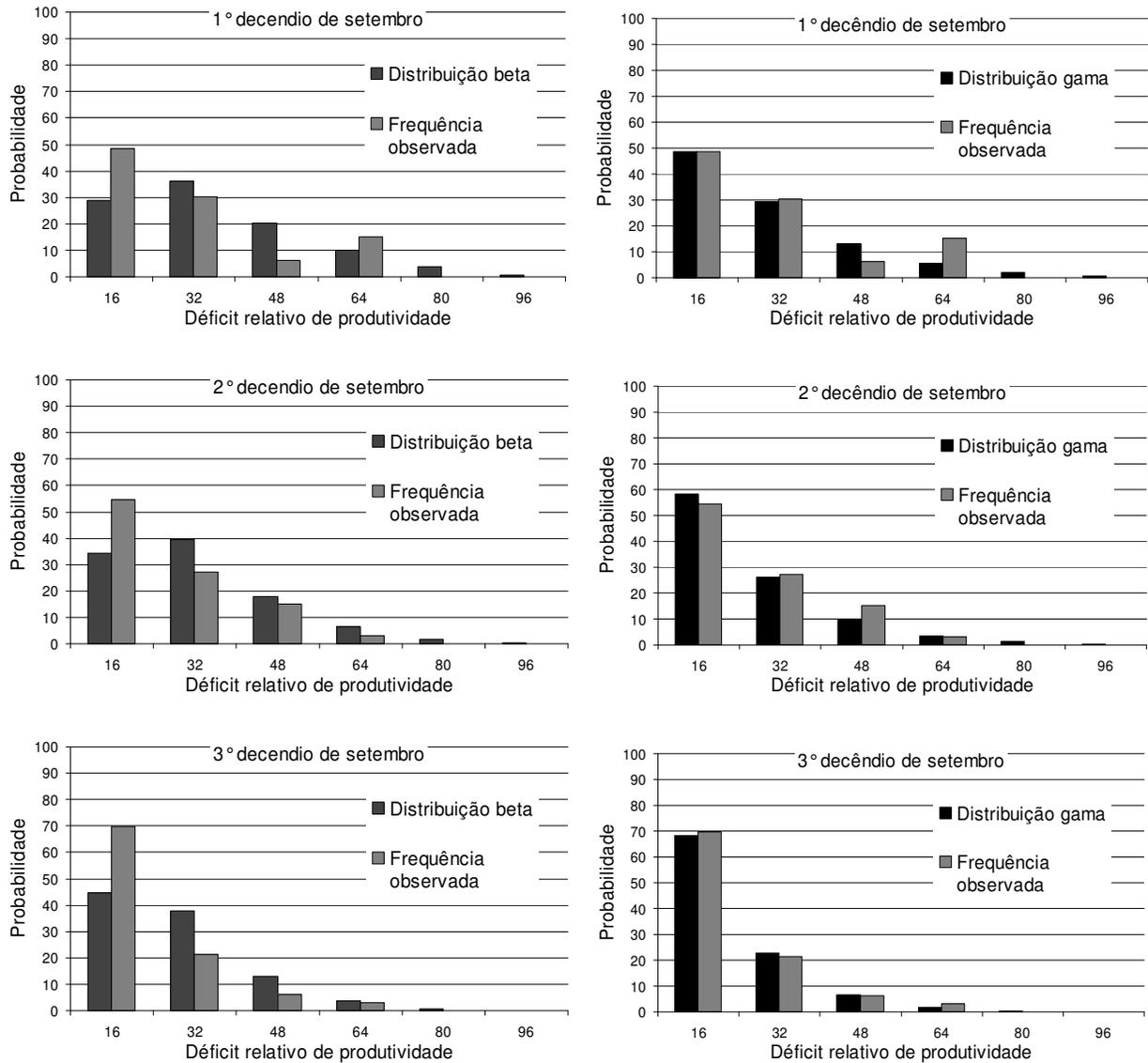


Figura 1 – Comparação das probabilidades estimadas pelas distribuições beta e gama com as frequências observadas de déficit relativo de produtividade por intervalos de classe, referentes às simulações de plantio de setembro. Valores das variáveis expressos em porcentagem

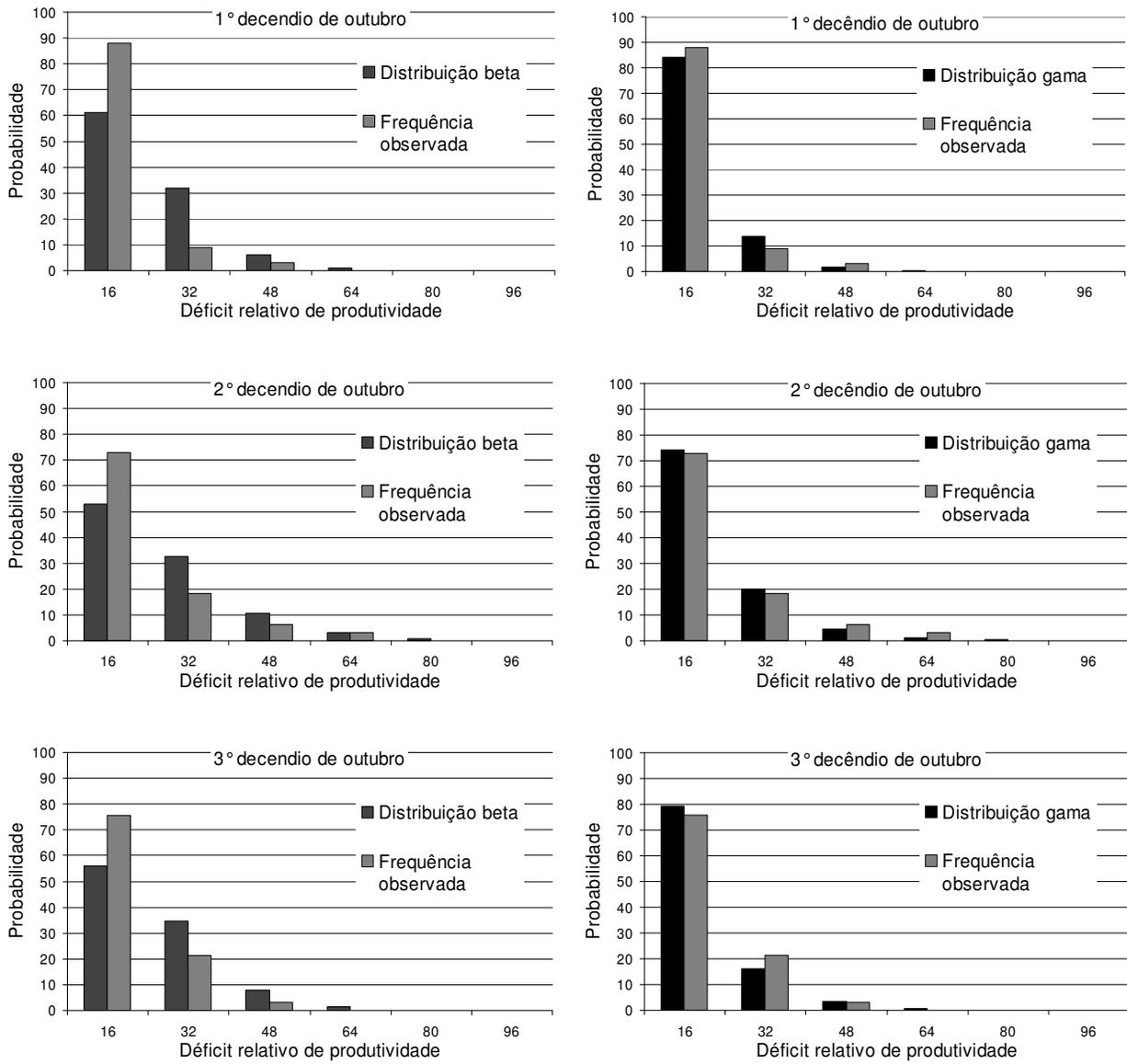


Figura 2 – Comparação das probabilidades estimadas pelas distribuições beta e gama com as frequências observadas de déficit relativo de produtividade por intervalos de classe, referentes às simulações de plantio de outubro. Valores das variáveis expressos em porcentagem

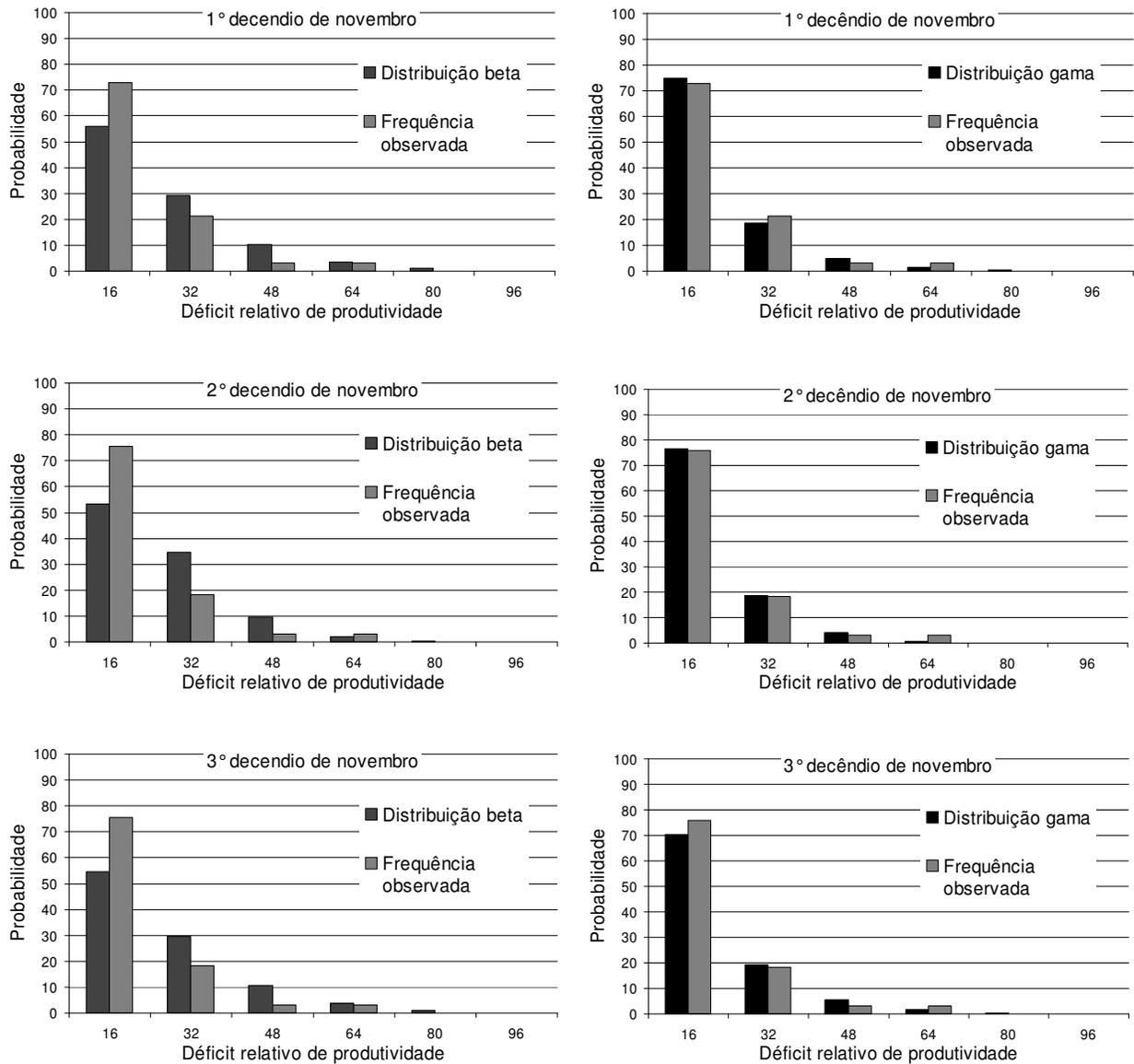


Figura 3 – Comparação das probabilidades estimadas pelas distribuições beta e gama com as frequências observadas de déficit relativo de produtividade por intervalos de classe, referentes às simulações de plantio de novembro. Valores das variáveis expressos em porcentagem

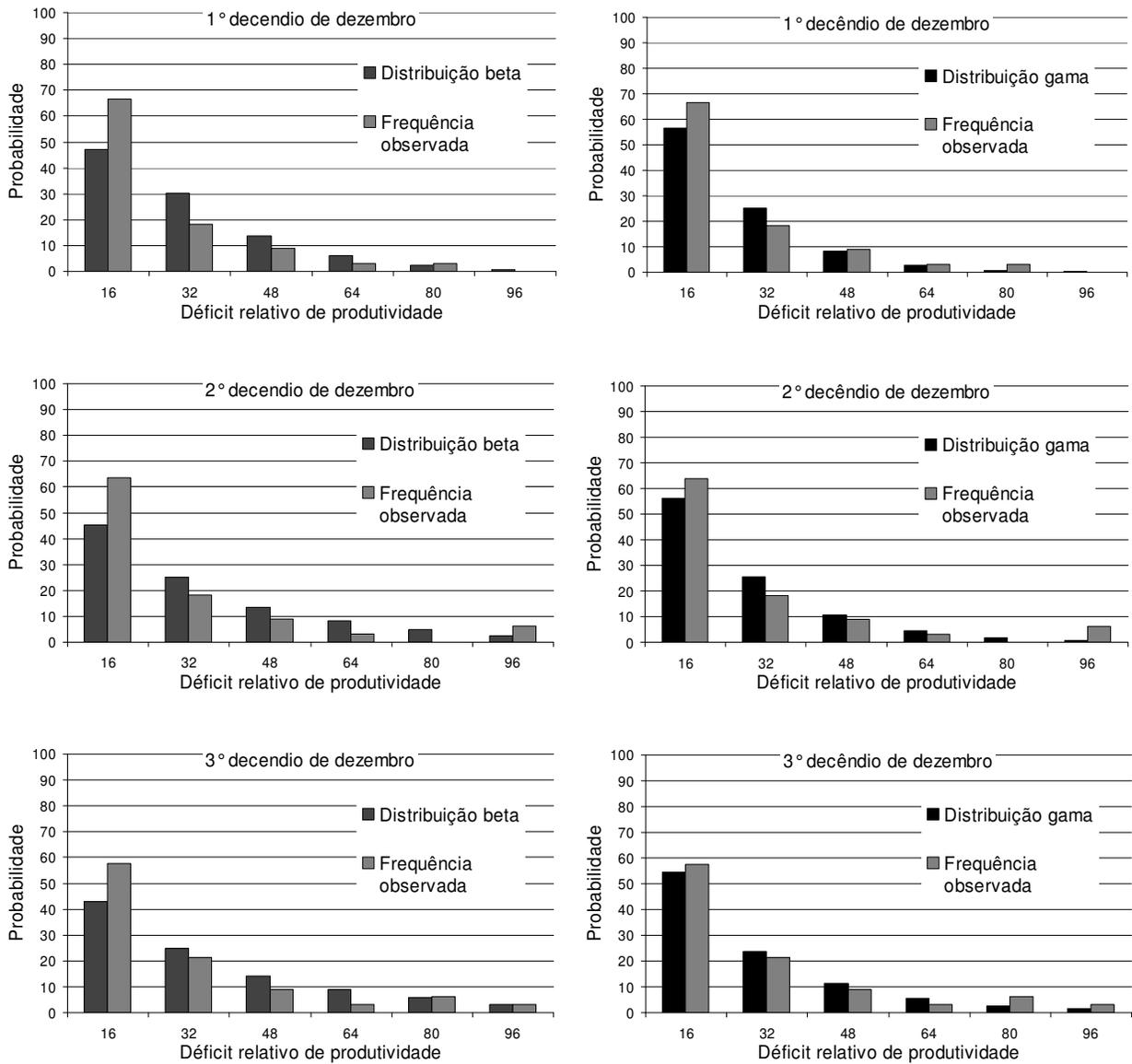


Figura 4 – Comparação das probabilidades estimadas pelas distribuições beta e gama com as frequências observadas de déficit relativo de produtividade por intervalos de classe, referentes às simulações de plantio de dezembro. Valores das variáveis expressos em porcentagem

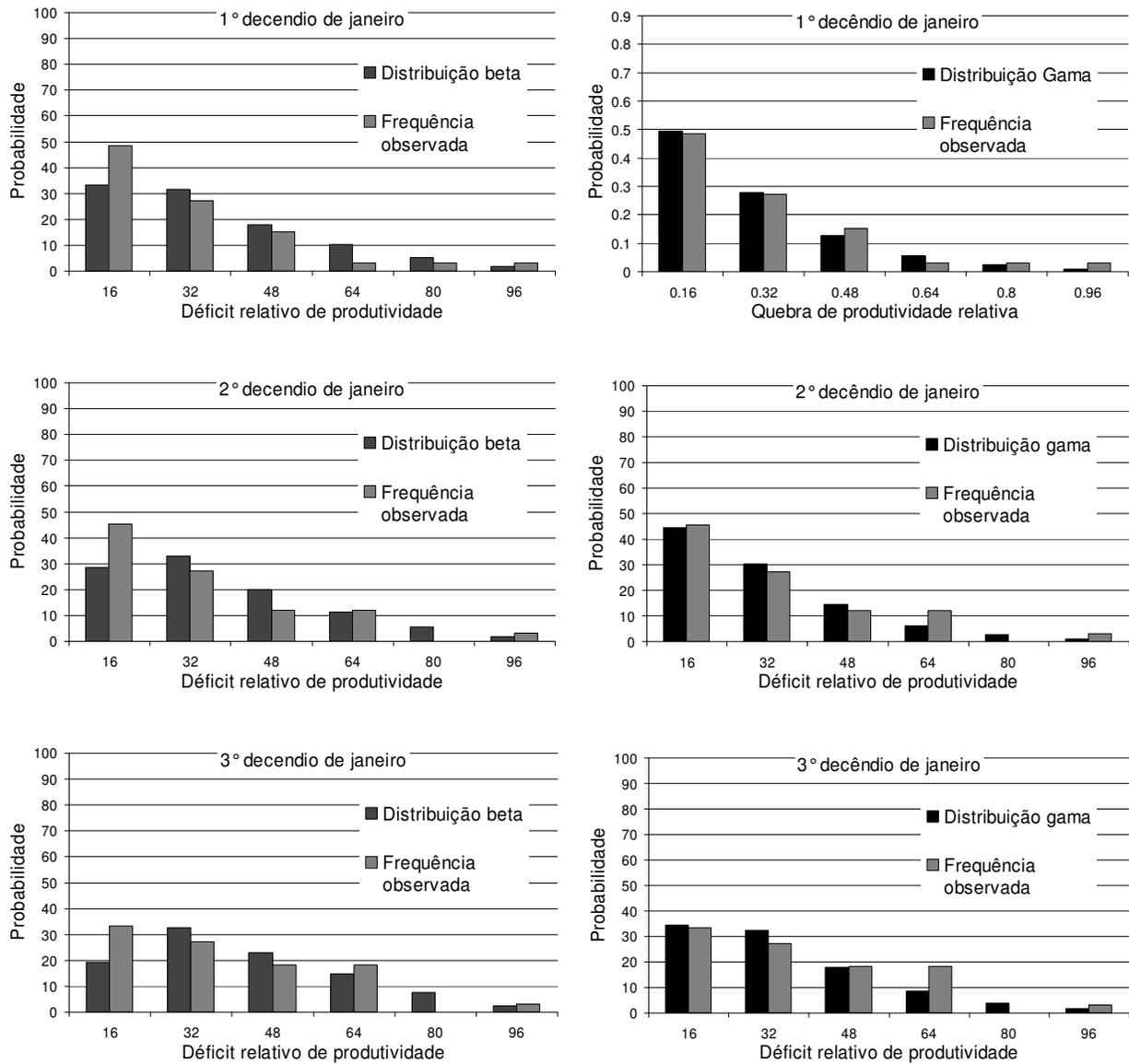


Figura 5 – Comparação das probabilidades estimadas pelas distribuições beta e gama com as frequências observadas de déficit relativo de produtividade por intervalos de classe, referentes às simulações de plantio de janeiro. Valores das variáveis expressos em porcentagem

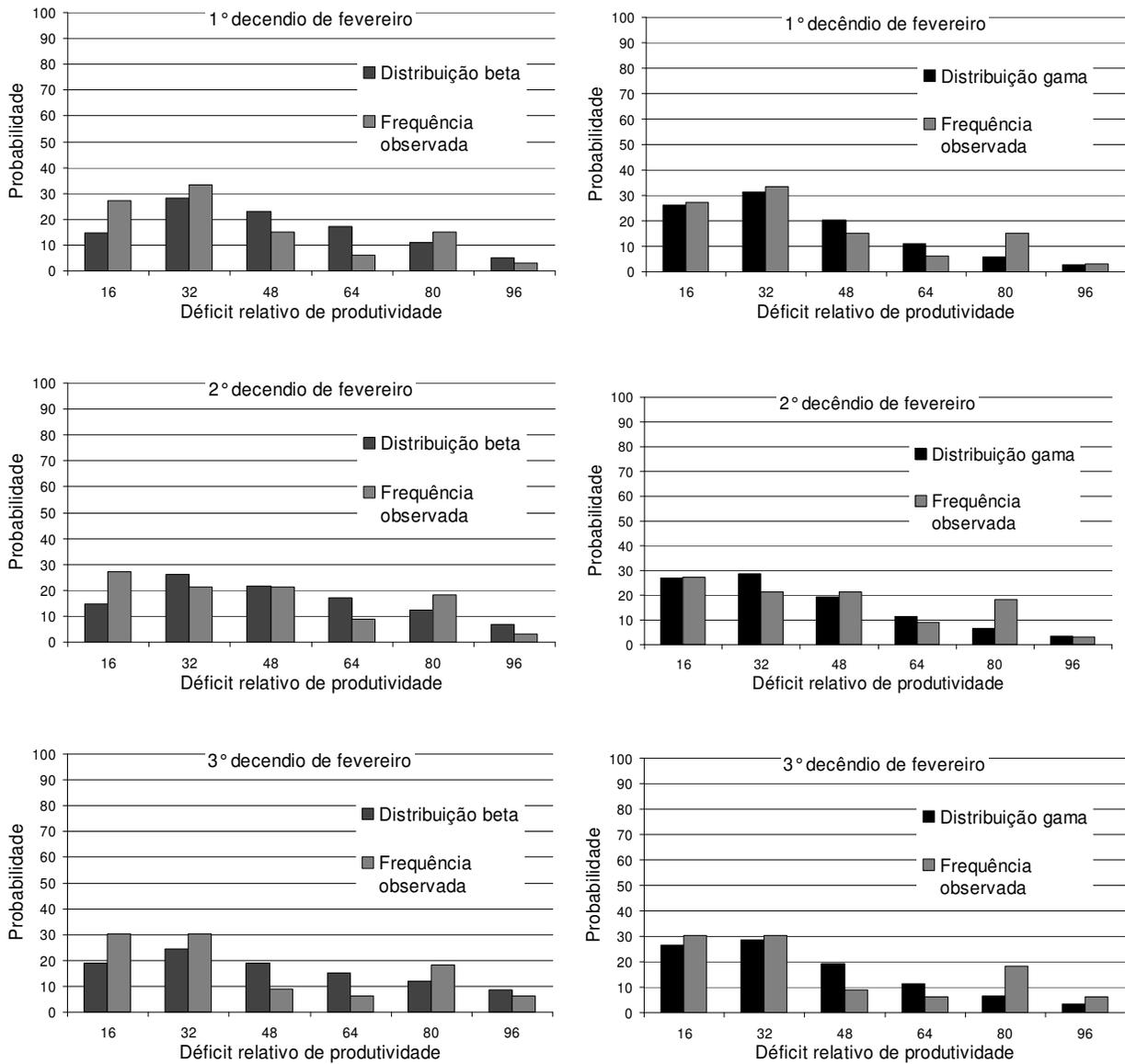


Figura 6 – Comparação das probabilidades estimadas pelas distribuições beta e gama com as frequências observadas de déficit relativo de produtividade por intervalos de classe, referentes às simulações de plantio de fevereiro. Valores das variáveis expressos em porcentagem

Analisando os valores do teste de Kolmogorov-Smirnov (Tabela 5) e observando-se as Figuras 1 a 6, conclui-se que a gama representa melhor a distribuição dos dados observados, e por esse motivo, ela foi escolhida para representar a distribuição de frequência das séries de déficit de produtividade.

4.2.2 Probabilidades de déficit de produtividade estimadas pela distribuição gama

Na análise da distribuição gama, valores de α menores que 1,2 (Tabela 5) foram observados no período que vai de 11/set a 21/dez (com exceção do primeiro decêndio de dezembro, igual a 1,319), indicando maior assimetria nas distribuições. Os menores valores de β ($\beta \leq 0,12$) ocorreram de terceiro decêndio de setembro ao segundo de novembro, e mostram menor escala dos valores de $(1-PR/PP)$ na curva de distribuição, significando que os déficits de produtividade relativa nesse período estão mais distantes de valores extremos de perda. Nos decêndios dos meses de janeiro e fevereiro observa-se o inverso. Os valores dos parâmetros α são maiores em relação aos decêndios dos outros meses originando curvas com menor assimetria, e os de β também, indicando alcance de perdas mais elevadas. Estes fatos podem ser observados graficamente nas **Figuras 7 a 9**, obtidas a partir da análise da distribuição gama com intervalos de classe de 10% para o déficit relativo de produtividade.

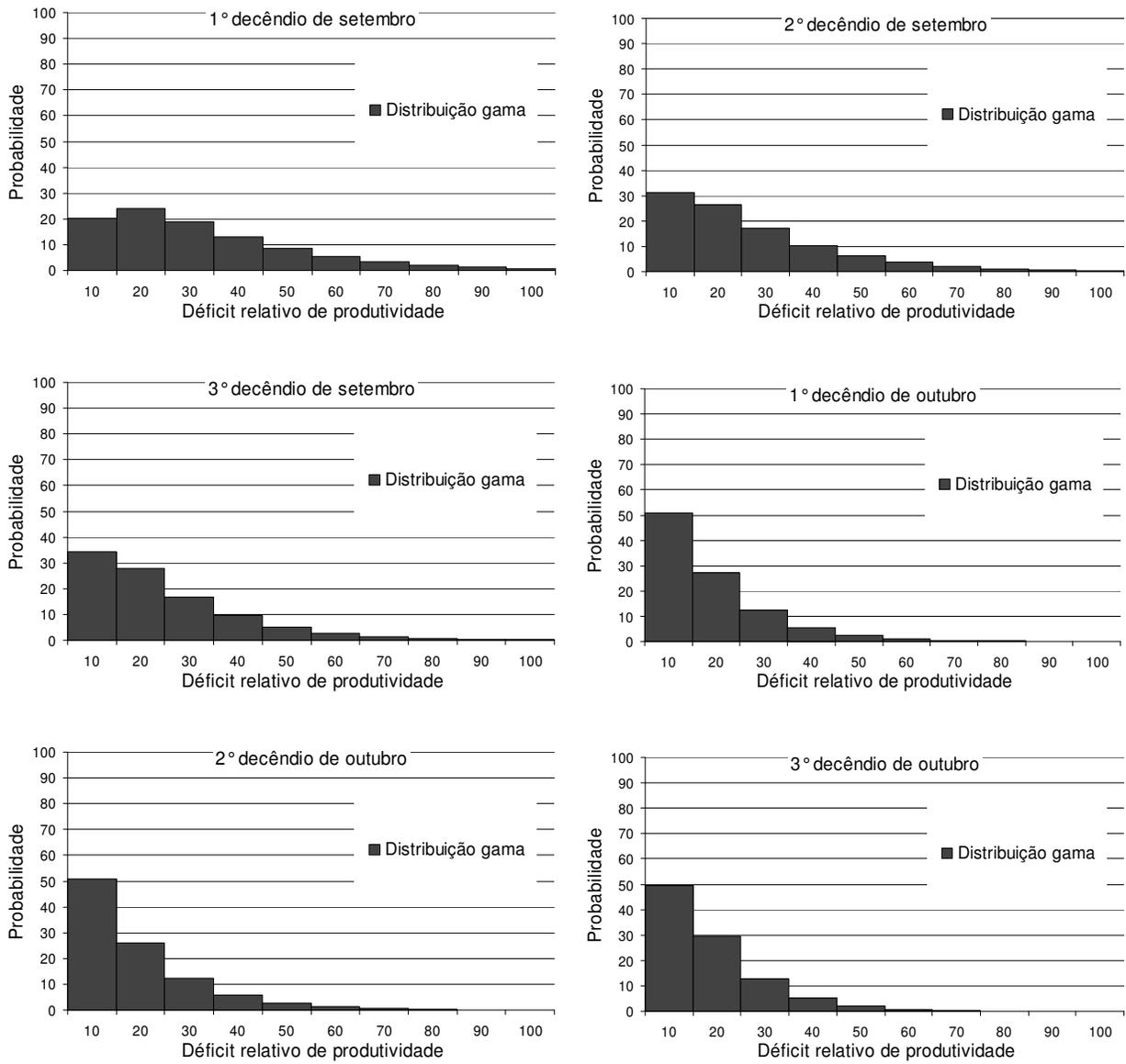


Figura 7 – Distribuições de frequência das probabilidades gama para intervalos de classe de déficit relativo de produtividade, em valores percentuais, referentes às simulações decendiais de plantio de setembro e outubro

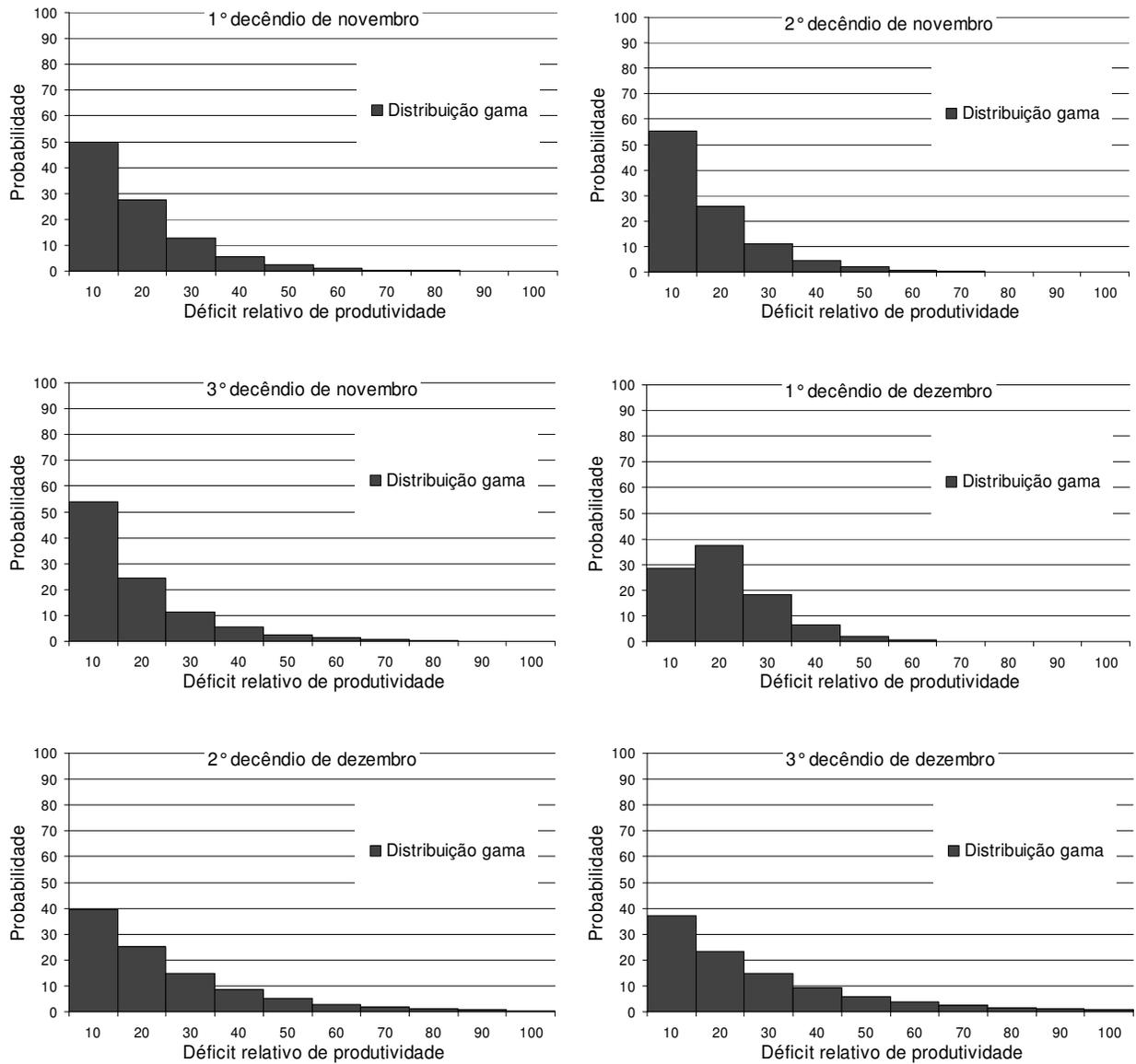


Figura 8 – Distribuições de frequência das probabilidades gama para intervalos de classe de déficit relativo de produtividade, em valores percentuais, referentes às simulações decenais de plantio de novembro e dezembro

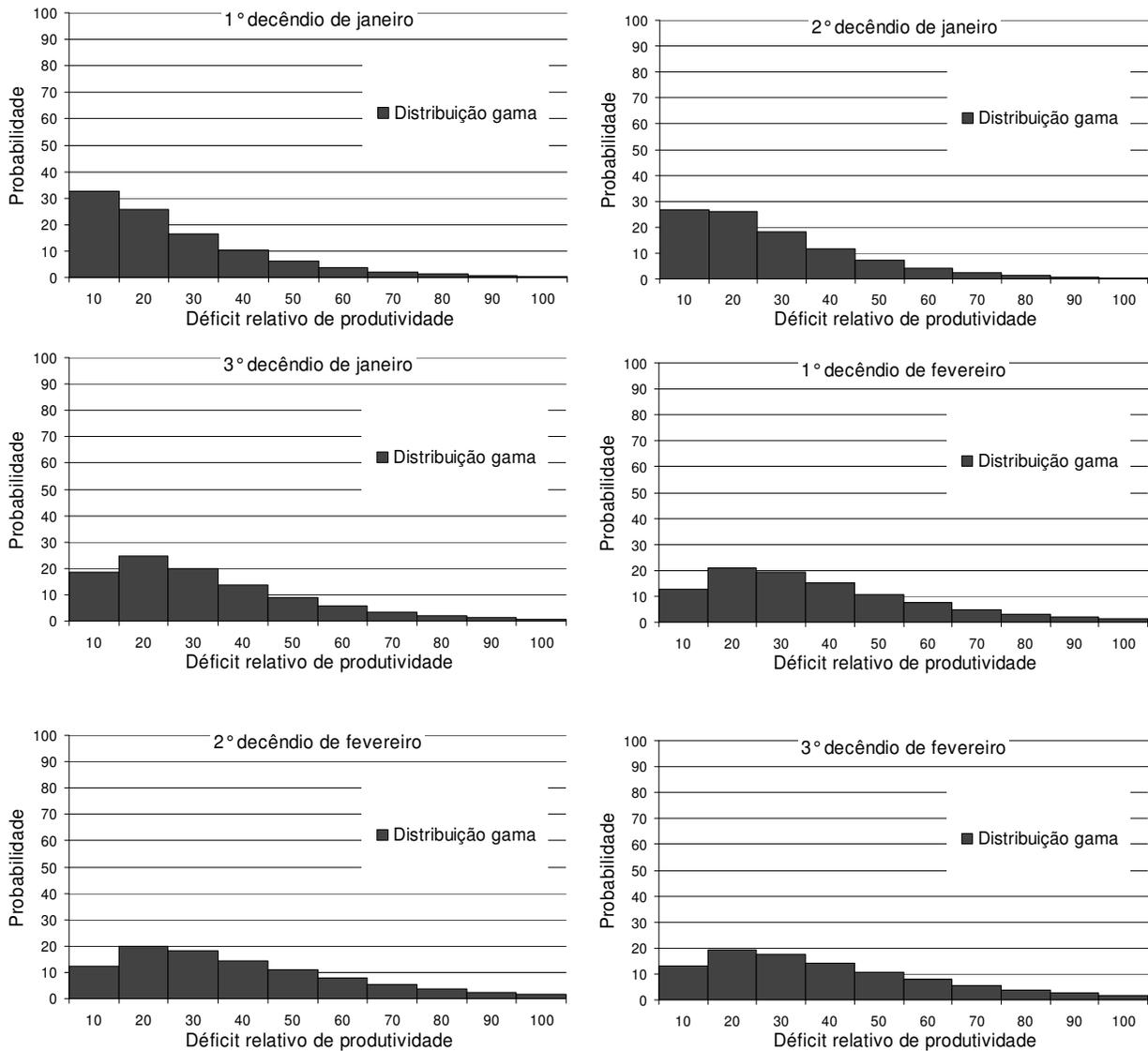


Figura 9 – Distribuições de frequência das probabilidades gama para intervalos de classe de déficit relativo de produtividade, em valores percentuais, referentes às simulações decendiais de plantio de janeiro e fevereiro

Na transição entre os plantios de setembro e outubro o parâmetro α aumenta de forma gradativa ao passo que β diminui. Observa-se, pela Figura 7, que para o plantio de 1/set o alcance do déficit relativo de produtividade chega à classe de 90 a 100% de perda de produtividade (β grande), enquanto que em 1/out o alcance vai até em torno de 50 a 60% (β pequeno). Perdas abaixo de 10% têm probabilidade de ocorrência em torno de 30% no ciclo iniciado em 1/set (α pequeno), em contrapartida, no plantio em 1/out a probabilidade foi maior que 65% (α grande).

A assimetria acentuada da curva de distribuição referente à semeadura de 1/out fica menos expressiva nos decêndios seguintes. Por outro lado, até o final de novembro as probabilidades concentram-se em mais de 98% nas classes de déficit relativo de produtividade até 50%, ou seja, nesses meses, as chances de que ocorram perdas relativas da produtividade potencial maiores que 50%, devido ao déficit hídrico, são menores que 2% (**Figura 8**).

A partir dos plantios de dezembro, o efeito do déficit hídrico sobre a produtividade origina um padrão diferenciado em relação aos meses de outubro e novembro (Figura 8). Apesar dos plantios nesses meses ocorrerem dentro do período em que estão concentradas 78% das chuvas em Piracicaba, que vai de outubro a março (ASSIS, 1991), os riscos de perda de rendimento aumentam. Isso é resultante do período seco que atinge os ciclos de plantio iniciados em dezembro. No plantio em 01/dez, por exemplo, uma boa parte do efeito é consequência do que ocorre no último quinquídio da frutificação (início em 1/mar), quando começa a época do ano com maiores sequências de dias sem chuva – entre oito e dezesseis dias, que perdura de março a agosto (ASSIS, 1991). Segundo Mariano (1998), em estudo climático da região de Piracicaba, no mês de março a probabilidade de armazenamento hídrico decendial de 90 mm em um solo com CAD = 100 mm é de aproximadamente 50%, caindo para cerca de 20% em abril e maio.

Essa diminuição no regime hídrico a partir de março é, também, o motivo da queda significativa de produtividade dos plantios em janeiro e fevereiro, em função do déficit hídrico no período crítico da cultura. Graficamente, observa-se que há menor assimetria nas curvas de distribuição e maior alcance (**Figura 9**). Resultado similar também foi encontrado por Alfonsi et al. (1997b), para a região de Campinas, onde ocorre ótimo suprimento hídrico no subperíodo vegetativo dos ciclos de plantio iniciados em dezembro e queda drástica no atendimento hídrico no florescimento e frutificação, sendo recomendável o uso de irrigação para que haja viabilidade econômica do milho.

Os períodos de semeadura que propiciam menores perdas na produtividade relativa, abaixo de 10%, são os decêndios dos meses de outubro e novembro, para os quais a probabilidade gama (P_{gama}) ficou acima de 55% (Tabela 6). No primeiro e no terceiro decêndios de outubro são observados os maiores valores P_{gama} , respectivamente 67% e 63%, o que equivale dizer que a cada cinco anos espera-se que pelo menos três anos tenham déficits relativos de produtividade menores que 10% em decorrência do déficit hídrico.

Tabela 6 – Valores percentuais da distribuição de probabilidade gama (P_{gama}) para as classes de déficit relativo de produtividade (1-PR/PP) menor ou igual a 10%, 20%, 30%, 40% e 50%, referentes aos plantios nos decêndios relacionados, em função do grau de déficit hídrico

Decêndio de semeadura	Valores da distribuição gama (P_{gama})				
	1-PR/PP≤10%	1-PR/PP≤20%	1-PR/PP≤30%	1-PR/PP≤40%	1-PR/PP≤50%
01 a 10/setembro	31,2	58,2	75,5	86,0	92,1
11 a 20/setembro	40,4	67,4	82,5	90,8	95,1
21 a 30/setembro	49,9	76,9	89,5	95,3	97,9
01 a 10/outubro	67,0	90,5	97,3	99,3	99,8
11 a 20/outubro	55,5	82,2	93,1	97,3	99,0
21 a 31/outubro	63,0	85,9	94,6	97,9	99,2
01 a 10/novembro	57,9	81,9	92,2	96,6	98,6
11 a 20/novembro	58,4	83,9	93,9	97,7	99,1
21 a 30/novembro	57,0	80,5	91,1	95,9	98,1
01 a 10/dezembro	44,9	71,8	86,1	93,3	96,8
11 a 20dezembro	39,6	64,6	79,4	88,1	93,1
21 a 31/dezembro	39,7	62,4	76,3	85,0	90,5
01 a 10/janeiro	32,8	58,5	75,0	85,1	91,2
11 a 20janeiro	27,7	54,2	72,3	83,6	90,5
21 a 31/janeiro	19,1	43,9	63,5	77,1	86,0
01 a 10/fevereiro	13,5	34,9	54,2	69,0	79,6
11 a 20fevereiro	13,2	33,3	51,5	65,9	76,6
21 a 28/fevereiro	14,4	34,5	52,3	66,2	76,5

As probabilidades de déficit relativo de produtividade igual ou menor que 10% vão diminuindo à medida que os plantios se afastam do período supracitado (outubro e novembro). Em setembro e dezembro as probabilidades do déficit de produtividade ser maior que 10% situam-se entre 39% e 50%, ou seja, ao menos uma vez em cada dois plantios as perdas por deficiência hídrica chegam a mais de 10%. Nos plantios de janeiro e fevereiro aumenta a probabilidade de maiores déficits de produtividade, evidenciando a entrada do ciclo da cultura em um período menos chuvoso. Considerando ainda o nível de até 10% de perda de produtividade, há probabilidade de somente em um de cada 3 anos ter-se esse limite nos plantios no primeiro decêndio de janeiro, cerca de 1 em cada cerca 4 anos e 1 em cada 5 anos no segundo e no terceiro decêndios desse mês, enquanto para fevereiro essa frequência diminui para 1 em cada cerca de 7 a 7,5 anos. As semeaduras nesses meses têm o florescimento desencadeado a partir do início de março, quando também se inicia o período com maiores sequencias de dias sem chuva, como citado anteriormente.

Considerando nível de até 20% de perda de produtividade potencial, os meses de outubro e novembro continuam sendo os mais propícios, sendo P_{gama} acima de 80%, com destaque para o

primeiro decêndio de outubro em que a P_{gama} é de 90,5%, ou seja, a cada dez plantios anuais, em nove há chance do déficit de produtividade ser igual ou abaixo de 20%. Nesses ciclos de cultivo, a probabilidade de a precipitação pluvial decendial superar ou igualar-se à evapotranspiração máxima da cultura (ETm) durante o período crítico (florescimento e frutificação) está entre 60 e 80%, para a região de Campinas (Alfonsi et al. 1997b), levando à recomendação de plantio no intervalo de 01/out a 21/nov (Alfonsi et al.; 1997a). As melhores épocas de semeadura, em função de possíveis limitações não somente de déficit de secas, mas também de ocorrência de geadas ou excesso de chuvas, para diversas regiões do estado de São Paulo, incluindo Piracicaba, situam-se em outubro e novembro, de acordo com Brunini et al. (2001), considerando o plantio em solos de textura média ou argilosa.

Segundo Assis (1991), de novembro a janeiro praticamente não ocorrem períodos superiores a 10 dias sem chuva. Essa frequência de precipitação favorece os plantios de setembro ao segundo decêndio de novembro, que têm suas fases críticas desenvolvidas entre novembro e janeiro. Por outro lado, a chance de ocorrer déficits relativos de produtividade abaixo de 20% diminui bastante nas semeaduras do mês de setembro em relação a outubro (76,9% em 21/set e 90,5% em 1/out). Essa diferença pode ser resultado de um efeito mais intenso do déficit hídrico no início do período vegetativo que ocorre na transição do inverno para primavera.

Ainda para perdas de até 20%, ocorre uma diminuição de probabilidade do último plantio simulado para novembro, para o primeiro de dezembro (P_{gama} de 80,5 para 71,8%). Brunini et al. (2001) informam que restrições hídricas começam a ocorrer fortemente nas semeaduras de dezembro, com deficiência hídrica entre 60 e 70 dias após a semeadura. Nas semeaduras iniciadas no terceiro decêndio de janeiro, o valor de P_{gama} para déficits de produtividade iguais ou inferiores a 20% fica abaixo de 50% e em fevereiro essa probabilidade diminui para 34,5%, resultado de o período crítico desenrolar-se na fase de redução das precipitações como citado anteriormente. Nesses plantios, o subperíodo crítico (florescimento/frutificação) também ocorre no período com menos chuvas e, como agravante, tem-se desenvolvimento mais lento por ocorrer no outono (temperaturas mais amenas), durando em torno de quatro decêndios, enquanto nos outros meses (setembro a dezembro) a duração é de três a três e meio decêndios, o que significa a extensão do período de vulnerabilidade da planta ao déficit hídrico e, por conseguinte, maior probabilidade de perda de produtividade. Principalmente durante o período crítico dos ciclos

iniciados a partir de janeiro, recomenda-se irrigação suplementar para a viabilidade econômica do milho nessas semeaduras (ALFONSI et al., 1997b).

Quando aumentado o limite de déficit relativo de produtividade para até 30%, as probabilidades dentro desse novo limite são maiores que 80% para os plantios desde o segundo decêndio de setembro até o primeiro decêndio de dezembro, e P_{gama} acima de 70% nas semeaduras que vão do início de setembro até o segundo decêndio de janeiro (1/set a 11/jan). Esses foram os períodos mais favoráveis. Avançando para 21/jan até o final de fevereiro o risco de perda aumenta, pois P_{gama} situa-se entre 64 e 52%.

Efeitos de déficit hídrico que levem a déficits relativos de produtividade acima de 50% são pouco prováveis em todos os períodos de plantio analisados, com probabilidades pela distribuição gama menor que 10% de setembro ao segundo decêndio de janeiro, menor que 14% na semeadura de 21/jan e mantendo-se inferior a 25% em fevereiro.

Os resultados obtidos indicam que as semeaduras de milho realizadas nos meses de outubro e novembro em Piracicaba levam a probabilidades menores de redução de produtividade por efeito de deficiências hídricas ocorrentes durante o ciclo da cultura. Eles confirmam, de forma geral, o que já foi estabelecido nos outros trabalhos sobre melhores épocas de plantio em regiões do Planalto Paulista. A contribuição do presente estudo refere-se à indicação de níveis de probabilidade de perda por deficiência hídrica para cada decêndio simulado de semeadura, fornecendo subsídios tanto ao produtor como aos órgãos interessados no planejamento agrícola. Verificando estritamente o efeito de déficit hídrico, os decêndios de 01 a 10 e 21 a 31 de outubro mostram-se mais favoráveis quanto ao aspecto de perda de produtividade, seguidos com pequenas diferenças, pelo decêndio de 11 a 20 de outubro e pelos três de novembro.

4.3 Considerações finais

Deve-se ressaltar três condições adotadas neste estudo, que evidentemente interferem nos resultados. A primeira refere-se ao fato de ter-se assumido que a disponibilidade hídrica no solo na época de semeadura era favorável a um nível satisfatório de emergência. A segunda, a adoção de um valor de capacidade de armazenamento de água disponível com base em um solo de textura argilosa e a terceira a aplicação da metodologia a uma cultivar de ciclo médio. O estudo de Brunini et al. (2001) sobre épocas de cultivo de milho no estado de São Paulo com base em

balanço hídrico indica diferenças que são encontradas quando são simulados déficits hídricos com base em diferentes valores de CAD, de acordo com as características do solo. Assim, sugere-se que a metodologia aqui empregada, seja utilizada em estudos adicionais, com diversificação das condições de solo e de cultivares (ciclos precoces e tardios), para se ter resultados de aplicações mais abrangentes quanto a esses aspectos.

Outro aspecto a se considerar é que o modelo linear de efeito do déficit hídrico que emprega o coeficiente de sensibilidade K_y é aplicável para a gama de valores de $(1-ETR/ET_m)$ variando de 0,0 a 0,5 ou 0,6. Num levantamento da série de dados dessa variável, verificou-se que a frequência de valores fora desses limites foi baixa, atingindo na média geral 1% das situações. As maiores frequências de situações fora desses limites ocorreram para as semeaduras em setembro e fevereiro, com 2,3% no primeiro decêndio de setembro e 4,0% no terceiro de fevereiro, para $(1-ETR/ET_m)$ maior que 0,6 e 5,0% e 7,0%, respectivamente para $(1-ETR/ET_m)$ maior que 0,5. Pode-se concluir, portanto, que a exigência da relação linear do modelo de sensibilidade ao déficit hídrico foi atendida de maneira satisfatória, não afetando essencialmente os resultados.

Embora seja difícil testar o desempenho do modelo de cálculo do balanço hídrico de Thornthwaite e Mather (1955) adaptado por Barbieri et al. (2003), ele representa uma alternativa que mantém a simplicidade da metodologia original, e que aproxima o balanço hídrico de culturas a uma situação mais próxima à realidade, por acompanhar o crescimento radicular da planta, admitindo a variação da capacidade de armazenamento de água disponível ao longo do tempo. O seu emprego, com uso de planilha Excel, para gerar estimativa de déficits de evapotranspiração potencial a partir de séries climáticas extensas, como usado no presente trabalho, indica ser uma ferramenta muito interessante em estudos que se fundamentam na estimativa da disponibilidade hídrica no solo. Saliente-se, também, que na elaboração desse balanço, o método de estimativa de ETP e o intervalo de tempo (mensal, decendial, semanal, quinquidial, etc.) em que os cálculos são feitos são aspectos importantes a serem considerados na elaboração do balanço. O método de Thornthwaite utilizado tem, por exemplo, restrições quando empregado em clima semi-árido ou em condições advectivas acentuadas. Por outro lado, seria interessante se estudar como o intervalo de tempo utilizado nos cálculos afetam a resposta e o próprio desempenho do modelo em simular a realidade de um balanço hídrico do solo.

5 CONCLUSÕES

A metodologia do balanço hídrico de Thornthwaite e Mather (1955) adaptado por Barbieri et al. (2003) é uma alternativa que mantém a simplicidade da metodologia original, e que aproxima o cálculo do balanço hídrico de cultura a uma situação mais próxima à realidade, por acompanhar o crescimento radicular da planta, admitindo a variação da capacidade de armazenamento de água disponível ao longo do tempo.

A função de distribuição de probabilidade Gama completa apresentou melhor aderência que a distribuição Beta às séries de déficit relativo de produtividade, podendo ser utilizada para estimar a probabilidade de ocorrência de níveis de déficit de produtividade relativa em culturas de milho de ciclo médio em Piracicaba, em função das datas de semeadura de setembro a fevereiro, permitindo avaliar o risco de perda de produtividade por déficit hídrico e fornecendo subsídios para o planejamento de plantio.

Considerando a probabilidade de redução de produtividade pela ocorrência de déficits hídricos, o primeiro e o terceiro decêndio de outubro são os que apresentam maior probabilidade de menores reduções, seguidos pelos três de novembro e pelo segundo de outubro.

Há baixa probabilidade (menor que 10%) de ocorrerem déficits de produtividade igual ou maior que 50% para plantios de setembro até o segundo decêndio de janeiro, a qual aumenta (14%) para o plantio no último decêndio de janeiro, até atingir cerca de 23,5% para plantios nos dois últimos decêndios de fevereiro.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, R. Estiagem: como conviver com esse fenômeno? **Revista Extensão Rural e Desenvolvimento Sustentável**, Porto Alegre, v. 1, n. 4, p.11-14, nov./dez. 2005.
- ALFONSI, R.R.; PEDRO JUNIOR, M.P.; ARRUDA, F.B. **Métodos agrometeorológicos para o controle da irrigação**. Campinas: IAC/PRONI, 1990. 62 p. (IAC. Boletim Técnico, 133).
- ALFONSI, R.R.; VICTORIA FILHO, R.; SENTELHAS, P.C. Épocas de semeadura para a cultura do milho no Estado de São Paulo, baseadas na probabilidade de atendimento hídrico. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 43-49, 1997a.
- ALFONSI, R.R.; PEZZOPANE, M.J.R.; MORAES, A.V.C.; VICTORIA FILHO, R. Probabilidade de suprimento hídrico para a cultura do milho no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 2, p. 241-248, 1997b.
- ALFONSI, R.R.; BRUNINI, O.; CAMARGO, M.B.P. de; PEZZOPANE, R.M. Disponibilidade hídrica no solo para a cultura do milho no Estado de São Paulo, em função de épocas de semeadura e cultivares. **Bragantia**, Campinas, v.57, n.1,p. 127-133, 1998
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998. 300 p. (FAO Irrigation and Drainage paper, 56).
- ASAKEREH, H. The changes of precipitation frequency distribution in Iran. **Journal of Humanities**, The University of Isfahan, v. 30, n. 2, p. 81-90, 2008.
- ASSIS, F.N. **Modelagem da ocorrência e da quantidade de chuva e de dias secos em Piracicaba-SP e Pelotas-RS**. 1991. 134 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.
- ASSIS, F.N.; ARRUDA, H.V; PEREIRA, A.R. **Aplicações de estatística à climatologia**. Pelotas: Universidade Federal de Pelotas, Universitária, 1996. 196 p.
- ASSIS, J.P.; DOURADO NETO, D.; REICHARDT, K.; MANFRON, P.A.; MARTIN, T.N.; BONNECARRÈRE, R.A.G. Dados climáticos simulados e produtividade potencial do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n.5, p. 731-737, 2006.
- BACK, A.J. Variação da evapotranspiração de referência calculada em diferentes intervalos de tempo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p. 139-145, jan./abr. 2007.

BARBANO, M.T.; DUARTE, A.P.; BRUNINI, O.; RECO, P.C.; PATERNIANI, M.E.A.G.Z.; KANTHACK, R.A.D. Acúmulo térmico e duração do subperíodo semeadura-florescimento masculino em cultivares de milho no Estado de São Paulo. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 23., 2000, Uberlândia. **Resumos...** Uberlândia: ABMS/UFU/EMBRAPA Milho e Sorgo, 6 p., 2000. 1 CD-ROM

BARBANO, M.T.; SAWAZAKI, E.; BRUNINI, O.; GALLO, P.B.; PAULO, E.M. Temperatura base e soma térmica para cultivares de milho pipoca (*Zea mays* L.) no subperíodo emergência-florescimento masculino. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.11, n.1, p. 79-84, 2003.

BARBIERI, V.; DUJMOVICH, M.N.; ANGELOCCI, L.R. Metodologias para estimativa edafoclimática dos componentes do balanço hídrico agrícola. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOLOGIA, 13., 2003, Santa Maria. **Anais...** Piracicaba: SBA; ESALQ, p. 265-266, 2003.

BARRETO, A.C. **Efeito de sistema de rotação, sucessão e níveis de calagem, sobre características físicas e químicas do solo e no desenvolvimento do sistema radicular e produção de grãos do milho (*Zea mays* L.).** Piracicaba, 1991. 154 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.

BASSOI, L.H.; JUNIOR, L.F.; JORGE, L.A.C.; CRESTANA, S.; REICHARDT, K. Distribuição do sistema radicular do milho em terra roxa estruturada latossólica: II. Comparação entre cultura irrigada e fertirrigada. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 51, n.3, p. 541-548, 1994.

BLAIN, G.C.; BRUNINI, O. Quantificação da seca agrícola pelo índice padronizado de evaporação real (IPER) no Estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 65, n.3, p. 517-525, 2006.

BLAIN, G.C.; BRUNINI, O. Análise da escala temporal de monitoramento das secas agrícolas e meteorológicas no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 2, p. 255-261, 2007.

BLAIN, G.C.; BRUNINI, O. Caracterização do regime de evapotranspiração real, em escala decenal, no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 1, p.75-82, 2007.

BLAIN, G.C.; KAYANO, M.T.; SENTELHAS, P.C.; LULU, J. Variabilidade sazonal da evapotranspiração relativa em Campinas (SP): caracterização climática e análise de tendências. **Bragantia**, Campinas, v. 68, n. 2, p. 545-553, 2009.

BLAINEY, H.F.; CRIDDLE, W. D. **Determining water requirements in irrigated areas from climatological data.** Washington, DC: Soil Conservation Service, 1950.48p. (Technical Publication, 96)

BRUNINI, O.; ABRAMIDES, P.L.G.; BRUNINI, A.P.C.; CARVALHO, J.P. **Caracterizações macroclimáticas, agrometeorológicas e restrições ambientais para o cultivo de milho em regiões tropicais baixas.** 2006. Disponível em:

<http://www.infobibos.com/Artigos/2006_3/ambientemilho/index.htm>. Acesso em: 04 set. 2009.

BRUNINI, O.; BORTOLETO, N.; MARTINS, A.L.M; LANDELL, M.G.A.; PEREIRA, J.C.V.N.A.; et al. Determinação das exigências térmicas e hídricas de cultivares de milho. In: SEMINÁRIO SOBRE A CULTURA DO MILHO “SAFRINHA”, 3., 1995, Assis, SP.

Resumos... Campinas: Instituto Agrônômico, 1995. p. 141-145.

BRUNINI, O.; ZULLO JUNIOR, J.; PINTO, H.S.; ASSAD, E.; SAWAZAKI, E.; DUARTE, A.P.; PATTERNIANI, M.E.Z. Riscos climáticos para a cultura de milho no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v. 9, n. 3, (Nº Especial: Zoneamento Agrícola), p. 519-526, 2001.

BURGOS, J.J.; VIDAL, A.L. The climates of the Argentina Republica according to the Thornthwaite climatic classification. Buenos Aires: **Association of American Geographers**, Washington, US, v. 41, n. 3, p. 237-263, 1951.

CAMARGO, A.P.; Contribuição para a determinação da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 2, p. 163-213, 1962.

CAMARGO, A.P. de Balanço hídrico no Estado de São Paulo. São Paulo: Instituto Agrônômico, 1971. 28p. (Boletim, 116).

CAMARGO, A.P.; CAMARGO, M.B.P. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. **Bragantia**, Campinas, v. 59, n. 2, p.125-137, 2000.

CAMARGO, A.P; PEREIRA, A.R. **Prescrição de rega por modelo climatológico.** Campinas: Fundação Cargill, 1990. 27 p.

CAMARGO, A.P.; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CARDOSO, M.J.; CARVALHO, H.W.L. de; PACHECO, C.A.P.; SANTOS, M.X. dos; LEAL, M. de L. da S. Adaptabilidade e estabilidade de cultivares de milho no Estado do Piauí no biênio 1993/94. **Revista Científica Rural**, Bagé, v. 2, n. 1, p. 35-44, 1997.

CARDOSO, C.O.; FARIA, R.T. de; FPLEGATTI, M.V. Simulação do rendimento e riscos climáticos para o milho safrinha em Londrina PR, utilizando o modelo Ceres-maize. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 2, p. 291-300, mai./ago. 2004.

THOM, H.C.S. A note on the gamma distribution. **Monthly Weather Review**, Washington, D.C., v. 86, n. 4, Apr.p117-122, 1958.

CHEN, D.; GAO, G.; XU, C.; GUO, J.; REN, G. Comparison of the Thornthwaite method and pan data with the standard Penman-Monteith estimates of reference evapotranspiration in China. **Climate Research**, Oldendorf/Luhe, Alemanha , v. 28, p. 123-132, 2005.

COSTA, J.R.; PINHO, J.L.N.; PARRY, M.M. Produção de matéria seca de cultivares de milho sob diferentes níveis de estresse hídrico. **Revista de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 12, n. 5, p. 443-450, 2008.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Yield response to water**. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome: FAO, 1979. 193 p. (Irrigation and Drainage paper, 33).

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Estudos FAO, Irrigação e Drenagem 33. Tradução Gheyi, H.R. e outros, UFPB, Campina Grande. FAO. 1994. 306 p.

DOURADO NETO, D.; ASSIS, J.P. de; TIMM, L.C.; MANFRON, P.A.; SPAROVEK, G.; MARTIN, T.N. Ajuste de modelos de distribuição de probabilidade a séries históricas de precipitação pluvial diária em Piracicaba-SP. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 2, p. 273-283, 2005.

DOURADO NETO, D.; JONG VAN LIER, Q. de. **Programa para elaboração do balanço hídrico para culturas anuais e perenes**: manual do usuário. Piracicaba, SP: Departamento de Agricultura, ESALQ, USP, 1991 (Manual referente a software).

EMBRAPA Milho e Sorgo. Sistemas de Produção, 2 [Versão Eletrônica] 4. ed. Set. 2008. ISSN 1679-012X. Disponível em: <<http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/milho/plantio.htm>>. Acesso em: 05 set. 2009.

EMBRAPA Milho e Sorgo. Sistemas de Produção, 2. [Versão Eletrônica] 4. ed., set. 2008. ISSN 1679-012X. Disponível em: <<http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/milho/climaesolo.htm>>. Acesso em: 05 set. 2009.

FANCELLI, A.L. **Plantas alimentícias**: guia para aula, estudos e discussão. Piracicaba: ESALQ, 1986. 131 p.

FANCELLI, A.L.; DOURADO NETO, D.. Fenologia do milho. In: FANCELLI, A.L.; DOURADO NETO, D. (Org.). **Tecnologia da produção de milho**. Piracicaba: Publique, 1997. p. 131-140.

FANCELLI, A.L.; DOURADO NETO, D. **Milho**: estratégias de manejo para alta produtividade. Piracicaba: Universidade de São Paulo, 2003. v. 1, 208 p.

FARRÉ, I.; FACI, J.M. Déficit irrigation in maize for reducing agricultural water use in a Mediterranean environment. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 96, p. 383-394, 2009.

- FESSEL, S.A.; VIEIRA, R.D.; MENDONÇA, E.A.F. de; CARVALHO, R.V. de. Maturidade fisiológica das sementes de milho. **Revista Brasileira de Sementes**, Brasília, v. 23, n.1, p. 191-197, 2001.
- FORNASIERI FILHO, D. **A cultura do milho**. Jaboticabal: FUNEP, 1992. 273 p.
- FORSTHOFER E.L.; SILVA, P.R.F. da; STRIEDER, M.L.; MINETTO, T.; RAMBO, L.; ARGENTA, G.; SANGOI, L.; SUHRE, E.; SILVA, A.A. Desempenho agrônômico e econômico do milho em diferentes níveis de manejo e épocas de semeadura. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 3, p. 399-407, mar. 2006.
- FRATTINI, J.A. **Cultura do milho**: instruções sumáris. Campinas: CATI/COT, 1975. 26p. Mimeografado.
- GADIOLI, J.L.; DOURADO NETO, D.; GARCIA, A.G.; BASANTA, M.V. Temperatura do ar, rendimento de grãos de milho e caracterização fenológica associada à soma calórica. **Scientia Agricola**, Piracicaba, SP, v. 57, n. 3, p. 377-383, 2000.
- GRANT, R.F.; JACKSON, B.S.; KINIRY, J.R.; ARKIN, G.F. Water deficit timing effects on yield components in mayze. **Agronomy Journal**, Madison, v. 81, n.1, p. 61-65, 1989.
- GUISCHEM, J.M.; SANS, L.M.A.; NAKAGAWA, J.; CRUZ, J.C.; PEREIRA FILHO, A.; MATEUS, G.P. Crescimento e desenvolvimento da cultura do milho (*Zea mays* L.) em semeadura tardia e sua relação com graus-dia e radiação solar global. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 2, p. 251-260, 2001.
- HUSAK, G.J.; MICHAELSEN J.; FUNK, C. Use of the Gamma distribution to represent monthly rainfall in Africa for drought monitoring applications. **International Journal of Climatology**, Chichester, v. 27, p. 935-944, 2007.
- JUNQUEIRA JUNIOR; J.A.; GOMES, N.M.; MELLO, C.R. de; SILVA, A.M. da. Precipitação provável para a região de Madre de Deus, Alto Rio Grande: modelos de probabilidades e valores característicos. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, MG, v. 31, n. 3, 2007.
- LU, J.; SUN, G.; McNULTY, S.G.; AMATYA, D.M. A comparison of six potential evapotranspiration methods for regional use in the southeastern United States. **Journal of the American Water Resources Association**, Herndon, US, v. 41, n. 3, p. 621-633, 2007.
- LONGO, A.J.; SAMPAIO, S.C.; QUEIROZ, M.M.F. de; SUSZEK, M. Uso das distribuições gama e log-normal na estimativa de precipitação provável quinzenal. **Revista Varia Scientia**, Cascavel, v. 6, n. 11, p. 107-118, 2006.
- MANFRON, P.A.; BACCHI, O.O.S.; DOURADO NETO, D.; PEREIRA, A.R.; MEDEIROS, S.L.P.; PILAU, F.G. Modelo da Profundidade Efetiva do Sistema Radicular na Cultura de Milho em Função de Graus-Dia Acumulados. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, RS, v. 11, n. 2, p. 327-332, 2003.

BRASIL, Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. **Zoneamento agrícola de risco climático da cultura do milho no Estado de São Paulo, referente à safra 2009/2010.** 2009.

MARIANO, Z.F. **Variação temporal do balanço hídrico e do clima, de acordo com os critérios de Köppen (1918) e Thornthwaite (1948), na região de Piracicaba – SP.** 1998. 90p. Dissertação (Mestre em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – Universidade de São Paulo, Piracicaba-SP, 1998.

MARQUES JUNIOR, S.; SAAD, J.C.C, MOURA, M.V.T. Modelo iterativo para estimativa da evapotranspiração de referência provável. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, SP, v. 52, n. 2, p. 221-225, 1995.

MAVI, H.S.; TUPPER, G.J. **Agrometeorology: principles and applications of climate studies in agriculture.** New York: Food Products Press, 2004. 364 p.

MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M.A.; RIBOLDI, J. Relações entre rendimento de milho e variáveis hídricas. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 3, p. 85-92, 1995.

MEDEIROS, S.L.P.; WESTPHALEN, S.L.; MATZENAUER, R. et. al. Relações entre evapotranspiração e rendimento de grãos de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 26, n. 1, p. 1-10, 1991.

MICHELON, C.J.; FIORIN, T.T.; CARLESSO, R.; PETRY, M.T.; MELO, G.L. ; SPOHR, R.B. Disponibilidade de água no solo e rendimento de grãos de milho semeado em duas épocas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., 2003, **Anais...** Ribeirão Preto. Solo: Alicerce dos Sistemas de Produção, 2003.

MOURA, M.S.B.; SOUZA, L.S.B.; SANTOS, W.S.; SOARES, J.M.; BRANDÃO, E.O.; SILVA, T.G.F. Graus-dia acumulados para o milho no semi-árido de Pernambuco. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOLOGIA, 15., 2007, **Anais...** Aracajú, SE: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2007. 1 CD-ROM.

NADARAJAH S.; KOTZ S. A generalized beta distribution II. *interstat.statjournals.net* 2003. Disponível em: <<http://interstat.statjournals.net/YEAR/2003/articles/0312002.pdf>>. Acesso em: 16 jul. 2009.

NIED, S.H.; HELDWEIN, A.B.; ESTEFANEL, V.; SILVA, J.C.; ALBERTO, C.M. Épocas de semeadura do milho com menos risco de ocorrência de deficiência hídrica no município de Santa Maria, RS, Brasil. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 5, p. 995-1002, 2005.

NIST/SEMATECH **e-Handbook of Statistical Methods.** Disponível em: <<http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>>. Acesso em: 16 jul. 2009.

OLIVEIRA, A.S. de. **Estudos comparativos da evapotranspiração potencial estimada por tanques e pelo método de penman.** 1971. 91 p. (Livre-Docência) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1971.

ORTOLANI, A.A.; CAMARGO, M.B.P. Influência dos fatores climáticos na produção. In: CASTRO, P.R.C.; FERREIRA, S.O.; YAMADA, T. **Ecofisiologia da produção agrícola**. Piracicaba: Instituto da Potassa e Fosfato, 1987. p. 71-100.

PELTON, W.L.; KING, K.M.; TANNER, C.B. An evaluation of the Thornthwaite and mean temperature methods for determining potential evapotranspiration. **Agronomy Journal**, Madison, v. 52, p. 387-395, 1960.

PEREIRA, A.R.; CAMARGO, A.P. An analysis of the criticism of the Thornthwaite's equation for estimating potential evapotranspiration. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 46, p. 149-157, 1989.

PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. **Agrometeorologia: Fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Livraria e Editora Agropecuária, 2002. 478 p.

PEREIRA, A.S.; SANTOS, E.H. dos; ASSAD, E.D.; ROMANI, L.A.S.; OTAVIAN, A.F. Compilação de coeficientes de cultura (kc) determinados em condições brasileiras. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 14., 2005, Campinas. **Anais...** Campinas, SP: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2005. 1 CD-ROM.

PRIESTLEY, C.H.B.; TAYLOR, R.J. On the assessment of the surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. **Monthly Weather Review**, Boston, US, v. 100, n. 2, p. 81-92, 1972.

PRUITT, W.O. Cyclic relations between evapotranspiration and radiation **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 7, n. 3, p. 271-275, 1964.

PRUITT, W.O.; DOORENBOS, J. **Empirical calibration: a requisite for evapotranspiration formulae based on daily or longer mean climate data**. Budapest: International Commission on Irrigation and Drainage, 1977. 19 p.

SAAD, J.C.C. **Estudo das distribuições de frequência da evapotranspiração de referência e da precipitação pluvial para fins de dimensionamento de sistemas de irrigação**. 1990. 124 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba-SP. 1990.

SANDERSON, M. The climates of Canada according to the new Thornthwaite climatic classification. **Scientific Agriculture**, Toronto, v. 28, p. 501-517, 1948.

SANDERSON, M. Three years of evapotranspiration at Toronto. **Canadian Journal of Research**, Toronto, v. 28, p. 482-492, 1950.

SANTOS, R.F.; CARLESSO, R. Déficit hídrico e os processos morfológico e fisiológico das plantas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, DEAg/UFPB, v. 2, n. 3, p. 287-294, 1998.

SEDIYAMA, A.D. **Estudos de métodos para estimativa de evapotranspiração potencial em Viçosa**. 1972. 43 p. Tese (Magister Scientiae) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1972.

SENTELHAS, P.C. ; PEREIRA, A.R. ; MARIN, F.R.; ANGELOCCI, L.R.; ALFONSI, R.R.; CARAMORI, P.H.; SWART, S. **Balancos hídricos climatológicos do Brasil**. Piracicaba: Departamento de Ciências Exatas, 1999 (Boletim Técnico).

SILVA, J.C. da; HELDWEIN, A.B.; TRENTIN, G.; STRECK, N.A.; MARTINS, F.B. Funções de distribuição de probabilidade decendial e mensal para a deficiência hídrica no solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 7, p. 1893-1899, out. 2008.

SIVAKUMAR, M.V.K.; MOTHA, R.P.; DAS, H.P. **Natural disasters and extreme events in agriculture**. The Netherlands: Springer, 2005. chap. 1/2, 367 p.

STANHILL, G. A comparison of methods of calculating potential evapotranspiration from climatic data. **Israel Journal of Agricultural Research**, Bet- Dagan, v. 11, p. 159-171, 1961.

THOM, H.C.S. A note on the gamma distribution. **Monthly Weather Review**, Washington, v. 86, p. 117-122, 1958.

THOM, H.C.S. Some methods of climatological analysis. Genebra: Word Meteorological Organizatios. 1966. 103 p. (Nota técnica, 81).

THORNTHWAITE, C.W. An approach toward a national classification of climate. **Geographical Review**, New York, v. 38, p. 55-94, 1948.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance**. Centerton: Drexel Institute of Technology – Laboratory of Climatology, 1955. 104 p. (Publications in climatology, v. 8, n.1).

TOMMASELLI, J.T.G.; VILLA NOVA, N.A. Deficiências hídricas no solo e épocas de semeadura de milho (*Zea mays* L.) e seus efeitos sobre a produção em Londrina – PR. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 2, p. 69-75, 1994.

BAVEL, C.H.M. van. A nomogram to estimate maximum evapotranspiration. Charlotte, North Carolina State College, 1956. n.p. (Mimeografado)

WILKS, D.S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. 2nd ed. Burlington, MA (USA): Elsevier, 2006. 627 p.

YAO, A.Y.M.; SHAW, R.H. Effect of plant population and planting pattern of corn on water use and yield. **Agronomy Journal**, Madison, v. 56, p. 147-152, 1964.

YAO, A.Y.M. The index for plant water requirement. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, n. 6, p. 259-273, 1969.

YIN, Z.Y.; BROOK, G.A. Evapotranspiration in the Okefenokee Swamp Watershed: A Comparison of Temperature-Based and Water Balance Methods. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 131, n. 1/4, p. 293-312, 1992.

YOO, C.; JUNG, K-S.; KIM, T-W. Rainfall frequency analysis using a mixed Gamma distribution: evaluation of the global warming effect on daily rainfall. **Hidrological Process**, v. 19, n. 19, p. 3851-3861, 2005.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)