

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS

**FATOR DE RESPOSTA DA PRODUÇÃO (K_y) DO MILHO
SAFRINHA PARA A REGIÃO DE DOURADOS, MS**

JAQUELINE ALVES DA SILVA

**DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
SETEMBRO - 2017**

**FATOR DE RESPOSTA DA PRODUÇÃO (K_y) DO MILHO
SAFRINHA PARA A REGIÃO DE DOURADOS, MS**

JAQUELINE ALVES DA SILVA
Engenheira Agrônoma

Orientador: PROF. DR. DANILTON LUIZ FLUMIGNAN

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Grande Dourados, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de Mestre.

DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

S586f	<p>Silva, Jaqueline Alves da.</p> <p>Fator de resposta da produção (K_y) do milho safrinha para a região de Dourados, MS. / Jaqueline Alves da Silva. – Dourados, MS : UFGD, 2017. 43f.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Danilton Luiz Flumignan. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal da Grande Dourados.</p> <p>1. Déficit hídrico. 2. Evapotranspiração. 3. Coeficiente de sensibilidade. 4. <i>Zea mays</i> . I. Título.</p>
-------	---

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central – UFGD.

©Todos os direitos reservados. Permitido a publicação parcial desde que citada a fonte.

FATOR DE RESPOSTA DA PRODUÇÃO (Ky) DO MILHO SAFRINHA PARA A REGIÃO
DE DOURADOS/MS

por

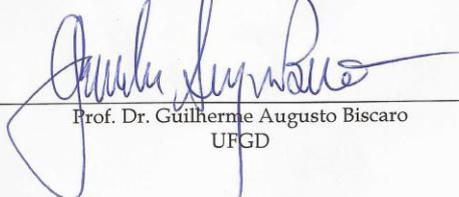
Jaqueline Alves da Silva

Dissertação apresentada como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título
de MESTRE EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

Aprovada em: 01/09/2017



Prof. Dr. Danilton Luiz Flumignan
orientador – UFGD



Prof. Dr. Guilherme Augusto Biscaro
UFGD



Prof. Dr. Carlos Ricardo Fietz
EMBRAPA/CPAO

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Luiz Carlos da Silva e Eva C. A. S. da Silva.

Aos avós Joaquim e Adália e Arlindo e Anita (in memoriam).

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, pela educação, esforço, carinho e suporte que me oportunizaram chegar até aqui, contribuindo para a formação da pessoa que sou hoje.

À Michelli Neves, pelo carinho, pela motivação em continuar, por estar sempre presente com palavras de incentivo quando precisei e pela amizade.

Ao meu orientador “pai” Danilton Luiz Flumignan, pela orientação, conhecimento, paciência e amizade.

À Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PGEA) pela oportunidade de realização deste mestrado.

À Embrapa Agropecuária Oeste pela disponibilização de seu espaço, funcionários e tudo o que foi necessário para a realização deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa.

Ao corpo docente do PGEA pelos ensinamentos e também a secretária Diani Conceição Pereira.

À todos os funcionários da Embrapa Agropecuária Oeste, em especial a equipe da Agrometeorologia, Dr. Carlos Ricardo Fietz, Dr. Eder Comunello, João Cezário, Carlos, Lucas, Maiara, Stael e Rafaela.

Aos meus amigos Daiane, Ana, Rodrigo, Elizete, Marizete, Joelma, Dhiones, Diego, Fernanda, Júlia, Osmar, Fabiano e Antônio pelos momentos de risos, alegrias e amizade sincera.

Por fim, a todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

A todos meu muito obrigada!

SUMÁRIO

RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Cultura do milho do milho safrinha	3
2.2 Necessidades climáticas e hídricas do milho safrinha	4
2.3 Efeitos do déficit hídrico	6
2.4 Evapotranspiração de referência (ET_0)	7
2.5 Evapotranspiração máxima (ET_m)	9
2.6 Evapotranspiração real (ET_r)	9
2.7 Balanço hídrico	11
2.8 Fator de resposta da produção (K_y)	12
3. MATERIAL E MÉTODOS	15
3.1 Descrição do local de estudo	15
3.2 Balanço hídrico	15
3.2.1 Equação do balanço hídrico utilizada	15
3.2.2 Parâmetros de entrada de dados do balanço hídrico	16
3.2.3 Estimativa da evapotranspiração	17
3.2.4 Dados climatológicos utilizados	18
3.3 Ajuste do fator de resposta da produção (K_y)	19
3.3.1 Parâmetros de produtividade e evapotranspiração utilizados	19
3.3.2 Obtenção do fator de resposta da produção (K_y)	19
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
4.1 Balanço hídrico	21
4.1.1 Análise de todas as safras	21
4.1.2 Ano chuvoso	22
4.1.3 Ano de precipitação normal	23
4.1.4 Ano seco	24
4.2 Relação entre produtividade e precipitação e evapotranspiração	25
4.3 Determinação do fator de resposta da produção (K_y)	28
5. CONCLUSÃO	36
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Dinâmica da água disponível no solo e da precipitação simulada para o milho safrinha durante o ano-safra 2013 para a região de Dourados, MS. 22
- Figura 2.** Dinâmica da água disponível no solo e da precipitação simulada para o milho safrinha durante o ano-safra 2003 para a região de Dourados, MS. 23
- Figura 3.** Dinâmica da água disponível no solo e da precipitação simulada para o milho safrinha durante o ano-safra 2009 para a região de Dourados, MS.25
- Figura 4.** Análise de correlação entre a produtividade e a precipitação (A) e entre a produtividade e a evapotranspiração (B) no cultivo de milho safrinha com sementes de 01 de fevereiro a 15 de março na região de Dourados, MS. 27
- Figura 5.** Ajuste do fator de resposta da produção (K_y) a partir da relação entre o déficit da evapotranspiração relativa ($1 - ET_r/ET_m$) e a queda do rendimento relativos ($1 - Y_r/Y_m$) para o milho safrinha cultivado nas safras de 2001 a 2013 na região de Dourados, MS. 29
- Figura 6.** Ajuste do fator de resposta da produção (K_y) a partir da relação entre o déficit da evapotranspiração relativa ($1 - ET_r/ET_m$) e a queda do rendimento relativos ($1 - Y_r/Y_m$) para a sementeira em 01 de fevereiro do milho safrinha cultivado nas safras de 2001 a 2013 na região de Dourados, MS. 33
- Figura 7.** Ajuste do fator de resposta da produção (K_y) a partir da relação entre o déficit da evapotranspiração relativa ($1 - ET_r/ET_m$) e a queda do rendimento relativos ($1 - Y_r/Y_m$) para a sementeira em 15 de fevereiro do milho safrinha cultivado nas safras de 2001 a 2013 na região de Dourados, MS. 33
- Figura 8.** Ajuste do fator de resposta da produção (K_y) a partir da relação entre o déficit da evapotranspiração relativa ($1 - ET_r/ET_m$) e a queda do rendimento relativos ($1 - Y_r/Y_m$) para a sementeira em 01 de março do milho safrinha cultivado nas safras de 2001 a 2013 na região de Dourados, MS. 34
- Figura 9.** Ajuste do fator de resposta da produção (K_y) a partir da relação entre o déficit da evapotranspiração relativa ($1 - ET_r/ET_m$) e a queda do rendimento relativos ($1 - Y_r/Y_m$) para a sementeira em 15 de março do milho safrinha cultivado nas safras de 2001 a 2013 na região de Dourados, MS. 34

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1.** Valores da constante do denominador (Cd) e constante do numerador (Cn). . 8
- Tabela 2.** Coeficientes de cultivo (K_c) do milho safrinha determinado por lisimetria de acordo Rezende (2016)..... 18
- Tabela 3.** Valores médios (considerando as quatro épocas de semeadura testadas) de número de dias chuvosos (DC; dias), precipitação (P; mm), evapotranspiração de referência (ET_0 ; mm), evapotranspiração máxima (ET_m ; mm), evapotranspiração real (ET_r ; mm) e déficit hídrico (DH; mm) para as safras de milho safrinha simuladas, na região de Dourados, MS, no período de 2001 a 2013.. 21
- Tabela 4.** Produtividade real do milho safrinha ($sc\ ha^{-1}$) e valores médios de precipitação (mm) e evapotranspiração real (ET_r ; mm) para a região de Dourados, MS, considerando quatro épocas de semadura (1 e 15 de fevereiro e 1 e 15 de março). 26
- Tabela 5.** Valores médios da evapotranspiração máxima (ET_m , mm), evapotranspiração real (ET_r , mm), do déficit de evapotranspiração relativa ($[(1 - ET_r/ET_m)]$, mm), da produtividade real (Y_r , $sc\ ha^{-1}$), produtividade máxima (Y_m , $sc\ ha^{-1}$) e da queda do rendimento relativo ($[(1 - Y_r/Y_m)]$, $sc\ ha^{-1}$) para as safras de milho safrinha analisadas na região de Dourados, MS.....28
- Tabela 6.** Valores médios da evapotranspiração máxima (ET_m , mm), evapotranspiração real (ET_r , mm), do déficit de evapotranspiração relativa ($[(1 - ET_r/ET_m)]$, mm) para as semeaduras em 01 de fevereiro nas safras de milho safrinha analisadas na região de Dourados, MS.31
- Tabela 7.** Valores médios da evapotranspiração máxima (ET_m , mm), evapotranspiração real (ET_r , mm), do déficit de evapotranspiração relativa ($[(1 - ET_r/ET_m)]$, mm) para as semeaduras em 15 de fevereiro nas safras de milho safrinha analisadas na região de Dourados,MS..31
- Tabela 8.** Valores médios da evapotranspiração máxima (ET_m , mm), evapotranspiração real (ET_r , mm), do déficit de evapotranspiração relativa ($[(1 - ET_r/ET_m)]$, mm) para as semeaduras em 01 de março nas safras de milho safrinha analisadas na região de Dourados, MS.32
- Tabela 9.** Valores médios da evapotranspiração máxima (ET_m , mm), evapotranspiração real (ET_r , mm), do déficit de evapotranspiração relativa ($[(1 - ET_r/ET_m)]$, mm) para as semeaduras em 15 de março nas safras de milho safrinha analisadas na região de Dourados,MS..32

RESUMO

SILVA, JAQUELINE ALVES da¹; FLUMIGNAN, DANILTON LUIZ². **Fator de resposta da produção (K_y) do milho safrinha para a região de Dourados – MS.** 2017. 43p. (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal da Grande Dourados.

¹ Mestranda em Engenharia Agrícola, Faculdade de Ciências Agrárias, UFGD.

² Orientador, Docente Colaborador da Faculdade de Ciências Agrárias, UFGD; Embrapa-Agropecuária Oeste.

A produtividade vegetal é direta e fortemente influenciada pela quantidade de água que é disponibilizada para seu uso, sendo que até mesmo pequenos déficits podem impactar significativamente a produtividade. Neste sentido, o fator de resposta da produção (K_y) permite avaliar a quebra na produtividade em função da evapotranspiração que ocorre, podendo ser utilizado, portanto para a previsão de safras. Por isso, o presente trabalho visou determinar o K_y para o milho safrinha na região de Dourados, MS. Para a obtenção do K_y utilizou-se o modelo de regressão linear, que requer dados de produtividade real (Y_r) e máxima (Y_m), bem como evapotranspiração real (ET_r) e máxima (ET_m). Y_m foi assumida como 8820 kg ha^{-1} (147 sc ha^{-1}), enquanto Y_r foi obtida em cada safra a partir do banco de dados do IBGE. ET_m e ET_r foram estimadas por balanço hídrico diário sequencial, considerando quatro diferentes épocas de semeadura (todas na safrinha) e usando a média das mesmas como resultado final. Foram analisadas as safras de 2001 a 2013. O milho safrinha cultivado na região de Dourados, MS, demonstrou ter sua produtividade fortemente relacionada à disponibilidade hídrica. Haja vista o alto valor de K_y obtido (1,22), o milho safrinha deve ser considerado de alta sensibilidade ao déficit hídrico, requerendo irrigação para obtenção de produtividades no nível potencial e/ou mitigação dos efeitos dos eventos de seca por falta de chuvas.

Palavras Chave: Déficit hídrico, evapotranspiração, coeficiente de sensibilidade, *Zea mays*.

ABSTRACT

Response factor of production (K_y) of off-season maize for the region of Dourados, MS.

Plant productivity is directly and strongly by the amount of water that is made available for use, and even small deficits can significantly impact productivity. In this sense, the response factor of production (K_y) allows to evaluate the decrease in productivity due to the evapotranspiration that occurs, and therefore be used for crops forecast. Therefore, the present study aimed to determine the K_y for off-season maize crops in the region of Dourados, MS. In order to obtain the K_y , the linear regression model was used this requires data from real productivity (Y_r) and maximum potential (Y_m), as well real evapotranspiration (ET_r) and maximum (ET_m). Y_m was assumed to 8820 kg ha^{-1} (147 sc ha^{-1}), while Y_r was obtained in each crop from the IBGE database. ET_m and ET_r were estimated by sequential daily water balance, considering four diferente sowing seasons (all in the off-season) and using their mean as final result. Yields were analyzed from 2001 to 2013. The off-season maize crops grown in the region of Dourados, MS, has been shown to have your productivity strongly related to water availability. Given the high value of K_y obtained (1.22), the off-season maize crops should be considered of high sensivity to water deficit, requiring irrigation for capacitive potential level and/or mitigate the effects of drought events due to lack of rainfall.

Key words: Water deficit, evapotranspiration, sensitivity coefficient, *Zea mays*.

1. INTRODUÇÃO

A estimativa do ano de 2016 para a safra nacional de cereais, leguminosas e oleaginosas totalizou 191,8 milhões de toneladas, 8,4% inferior à obtida em 2015 (209,4 milhões de toneladas). Em termos absolutos são 17,6 milhões de toneladas a menos. Essa redução deve-se as intempéries climáticas a qual trouxe como resultado uma redução na produção de milho de 17% (IBGE, 2016).

Conforme Fietz et al. (2001), na região de Dourados, MS, a ocorrência de déficit hídrico é uma das principais causas de perdas agrícolas. Nas safras de verão ocorrem com frequência os “veranicos”, os quais são caracterizados por períodos de alta demanda evapotranspirativa ocorrendo concomitantemente com uma distribuição irregular ou pouca oferta de chuvas. Na safrinha as perdas também ocorrem. Muito embora as taxas de evapotranspiração são menores nesta época, a oferta de chuvas também é menor em decorrência da estiagem que é característica do outono e inverno, o que torna o armazenamento hídrico frequentemente desfavorável.

Devido a relevância econômica para a região, boas práticas de cultivo do milho safrinha devem ser adotadas. Nesse sentido, o conhecimento das exigências climáticas da cultura e das relações da água no sistema de cultivo contribui para a redução dos riscos de perdas ocasionados pelo clima na produção agrícola. Em geral, a redução na produtividade ocasionada por déficit hídrico durante o período vegetativo, é relativamente pequeno, pois, neste período não estão sendo formados os componentes do rendimento, como a formação do zigoto. Mas durante o florescimento e os períodos de enchimento de grãos a queda é acentuada, pois não haverá a recuperação da sua capacidade produtiva plena, mesmo que haja chuvas após o período crítico de déficit (ALLEN et al., 1998).

Para Bernardo et al. (2005), tecnicamente é possível modelar a produtividade das culturas por meio de funções de produção. Segundo o autor, estas relacionam a produtividade com lâminas aplicadas via irrigação, evapotranspiração ou umidade do solo. Presume-se que quando a quantidade de água disponível atende de forma satisfatória às necessidades hídricas do cultivo em questão, o rendimento é pleno. Por outro lado, caso o fornecimento de água seja limitado, o rendimento esperado é menor e determinado em função do quanto se pode atender às

necessidades hídricas durante todo o ciclo (MARTIN e VALERO, 1993; apud, BARROS, 2002).

As variáveis da função de produção água-cultura são expressas de diferentes formas. A água como uma variável independente pode ser representada pela precipitação, evapotranspiração e lâmina de água de irrigação aplicada durante o ciclo. Já a variável dependente refere-se a produtividade agrícola final, seja ela, grãos, frutos, matéria verde ou seca (FRIZZONE et al., 2005). Considerando que a água é um dos principais fatores de produção, fica evidente a relação existente entre o nível de deficiência hídrica experimentado pelas culturas e a redução de produtividade das mesmas.

Dentre os métodos existentes para prever a produtividade em função do déficit hídrico das plantas, o fator de resposta da produção (K_y) se destaca. Este fator foi introduzido por Doorenbos e Kassam (1979), os quais propuseram um modelo matemático com base na penalização da produtividade potencial da cultura, em função da redução evapotranspiração real durante o ciclo da mesma, devido à deficiência hídrica.

Diante do exposto, nota-se que a existência de uma função de produção baseada na deficiência hídrica (relação entre a evapotranspiração máxima e a real), pode-se constituir em uma importante ferramenta de planejamento e gestão, tanto a nível de produtor, quando Estado ou até mesmo de outros atores envolvidos na cadeia de produção do milho safrinha na região de Dourados, MS. Esta função de produção, após um prévio e adequado trabalho de modelagem do valor de K_y , permitirá determinar os níveis de produtividade das lavouras a partir das taxas de evapotranspiração observadas.

Neste contexto, considerando a importância de se prever a produtividade e produção dessa cultura, realizou-se esse estudo, cujo objetivo foi determinar o fator de resposta da produção (K_y), para a cultura do milho safrinha para a região de Dourados, MS.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cultura do milho safrinha

O milho safrinha (*Zea mays* L.) é uma cultura de grande importância agrícola para os estados de Paraná, São Paulo, Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, regiões onde o clima e o solo são propícios ao seu desenvolvimento. O milho safrinha caracteriza-se pelo cultivo em sequeiro com a semeadura realizada nos meses de janeiro a abril, após a cultura de verão, geralmente a soja (CRUZ et al., 2010).

A área plantada em Mato Grosso do Sul para a safra 2017 está estimada em 1,750 milhões de hectares, com uma produtividade média esperada de 5.140 kg ha⁻¹, representando um incremento de 5,1% em relação à área da safra anterior. Aliado a uma maior disponibilidade de cultivares adaptadas e de alto potencial produtivo, o maior aporte tecnológico para a cultura contribuiu para este aumento da produtividade do cereal no estado (CONAB, 2017).

O desenvolvimento de tecnologias apropriadas ao cultivo do milho safrinha, junto ao trabalho dos produtores rurais, proporcionou grande aumento da produtividade média brasileira de grãos, que dobrou nos últimos 20 anos, para cerca de 5 t ha⁻¹. Mas a variação da produtividade ainda é muito grande entre os anos e o maior desafio é a sua estabilidade de produção (DUARTE, 2015). Apesar dos grandes avanços agrotecnológicos a causa desta variabilidade entre os anos se deve às condições pluviométricas da região de cultivo (BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2014).

O plantio do milho realizado na safrinha, também chamada de segunda safra, em regiões como sul e sudeste do País, não apresentam desempenho satisfatório devido à redução na disponibilidade hídrica e temperaturas desfavoráveis em fases fenológicas consideradas cruciais (NASCIMENTO et al., 2011). Por isso em Mato Grosso do Sul, deve-se preferir semear entre fevereiro e o primeiro decêndio de março, afim de evitar o plantio tardio devido a menor disponibilidade hídrica, e de radiação solar, além do principal que são as quedas bruscas de temperatura nos meses de inverno, o que pode culminar com a formação de geadas. Fabris (2016), em estudos sobre a produtividade de híbridos de milho em diferentes

épocas de semeadura, constatou que em semeaduras a partir de 1º de março o milho safrinha de sequeiro tem queda de 1,6 sc ha⁻¹ na produtividade por dia de atraso na semeadura. A mesma queda aconteceu no cultivo irrigado, porém ainda mais acentuada, sendo de 2,6 sc ha⁻¹. Em ambos os casos a queda observada foi definida pela autora como sendo um reflexo direto da menor oferta de radiação.

Dessa forma, quanto mais eficiente for o planejamento das atividades relacionadas com a produção, maior será o sucesso com a cultura (SANS; MORAIS; GUIMARÃES, 2006).

2.2 Necessidades climáticas e hídricas do milho safrinha

No momento de implantar determinada cultura no campo, o produtor deve compreender a demanda hídrica da cultura escolhida, para planejar a melhor época de semeadura e quantificar o volume de água necessário durante o seu ciclo de desenvolvimento. Devido o Brasil possuir uma grande extensão territorial, em algumas estações do ano podem ocorrer períodos de déficit hídrico e grande variabilidade climática (CARVALHO et al., 2013).

Em relação ao clima, os fatores climáticos de maior influência sobre a cultura do milho são a radiação solar, a precipitação e a temperatura. Estes fatores atuam eficientemente nas atividades fisiológicas interferindo diretamente na produção de grãos e de matéria seca (ALVES et al., 2010). Por isso, o rendimento de grãos pode variar conforme o local e o ano de cultivo (MUNDSTOCK; SILVA, 2005).

A quantidade de radiação incidente varia com a posição geográfica de cada região, ou seja, com sua latitude e altitude (GARDNER et al., 1985). Para a região de Dourados, MS, sabe-se que a radiação solar constitui a principal variável climática, responsável pelas taxas de evapotranspiração que ocorrem na região, mesmo no inverno quando ocorre menor incidência de radiação solar (FLUMIGNAN et al., 2016).

Embora a energia radiante incida na região, a eficiência de interceptação da radiação e de sua conversão e partição em produtos orgânicos depende de outros

fatores climáticos, com destaque para temperatura do ar e disponibilidade hídrica (NASCIMENTO et al., 2011).

Os níveis ótimos de temperatura são variáveis de acordo com o estágio fenológico em que a cultura do milho se encontra e a temperatura da planta é muito próxima da temperatura do ambiente, entre 25 e 30 °C, logo alterações bruscas interferem diretamente nos processos metabólicos da planta (PEREIRA FILHO; CRUZ, 2003). Temperaturas abaixo de 10 °C por períodos longos implica em o crescimento da planta quase nulo e sob temperaturas noturnas acima de 30 °C, o rendimento de grãos decresce, como consequência da senescência precoce das folhas. Verões com temperatura média diária inferior a 19 °C e noites com temperatura média inferior a 12,8 °C não são recomendados para a produção de milho (LANDAU; MAGALHÃES; GUIMARÃES, 2017).

De acordo com Renato et al. (2013), o desenvolvimento de cada fase fenológica é controlado a partir da soma térmica diária necessária para cada estágio da planta, sendo que, para acionar os seus dispositivos metabólicos, necessita-se da temperatura basal inferior, que somente acima desta a planta pode se desenvolver. E também da temperatura basal superior, porém acima desta, ocorre paralisação de suas atividades metabólicas. Para o milho utiliza-se a temperatura basal inferior de 10 °C e a basal superior de 32 °C (ASSIS et al., 2006). Durante o período de cultivo do milho safrinha para a região de Dourados, MS, com base em uma série histórica de dados, Fietz e Fisch (2008), observaram que as temperaturas máximas variam de 31,2 a 24,5 °C e as temperaturas mínimas variam de 20,6 a 12,1 °C, sendo os maiores valores nos meses de verão e os mínimos nos meses de inverno.

Para Pegorare et al. (2009) a possibilidade de geadas durante a fase de florescimento constitui um importante fator de risco para o cultivo do milho safrinha na região Sul de Mato Grosso do Sul. Conforme Fietz et al. (2013), em semeaduras realizadas a partir da segunda quinzena de março, há grande risco de ocorrência desse fenômeno, pois a maior parte da fase crítica da cultura ocorre após a segunda quinzena de maio e em junho, períodos com alto índice de geadas, sendo a maioria de intensidade média ou forte.

No tocante a necessidade hídrica a cultura do milho é considerada exigente. Para Fancelli e Dourado Neto (2004) esta necessita de uma lâmina de 400

a 600 mm de água durante o ciclo para adequado desenvolvimento e produção de grãos. Ainda segundo estes autores, esta exigência de água pela planta de milho é variável conforme o genótipo, estágio de desenvolvimento e ciclo da planta, e claro em associação com os fatores ambientais. Já Silva et al. (2010) relata que as máximas produtividades ocorrem quando o consumo de água durante todo o ciclo varia entre 500 e 800 mm e, ainda, que a cultura exige de 350 a 500 mm para que ocorra a produção sem necessidade de irrigação suplementar.

Em períodos críticos do desenvolvimento do milho, florescimento à maturação fisiológica, o milho é sensível ao déficit hídrico, podendo-se observar esta sensibilidade nos processos fisiológicos ligados à formação do zigoto e início do enchimento de grãos, e na elevada transpiração que ocorre nesse período, em razão do maior índice de área foliar podendo ocasionar redução direta no rendimento final (BERGAMASCHI et al., 2004). Estresses prolongados, ocasionados pela falta de irrigação ou chuva durante o pendoamento e estádios de formação de grãos podem resultar em perdas de 66 a 93% no rendimento total de grãos (ÇAKIR, 2004).

Para que o desenvolvimento das espécies vegetais ocorra de modo satisfatório, ou seja, para que a acumulação de massa seca, decorrente da síntese de carboidratos, se processe de maneira ótima, os fatores água e luz são essenciais, evidenciando a importância desses fatores climáticos durante o ciclo fenológico das culturas (PEGORARE et al., 2009).

2.3 Efeitos do déficit hídrico

A instabilidade da produção agrícola está diretamente relacionada com a inconstância do regime hídrico, em épocas essenciais ao desenvolvimento das culturas, principalmente nas fases de florescimento e enchimento de grãos. Normalmente o déficit hídrico nas plantas é causado pela falta de chuvas em áreas que não utilizam a irrigação como recurso para suprir as necessidades hídricas das plantas em períodos de estiagem (MORANDO et al., 2014).

A deficiência hídrica afeta quase todos os aspectos relacionados ao desenvolvimento das culturas, diminuindo a sua expansão celular, por consequência a inibição da taxa de crescimento da planta e redução da fotossíntese. Com isso, em

períodos de estiagens a captura da radiação solar incidente reduz pela diminuição da área foliar, além da murcha e enrolamento das folhas, afetando diversos processos, como: brotação, polinização, absorção de nutrientes e translocação de fotossintatos (BERGAMASCHI e MATZENAUER, 2014).

A irreversibilidade destes processos, assim como, as respostas das plantas as condições de estresse hídrico, irá depender do genótipo, cultivar, severidade, estágio de desenvolvimento da planta, fatores edáficos, entre outros. Não existe uma única variável fisiológica que, por si só, seja indicativa de tolerância à seca (NASCIMENTO et al., 2011). Por exemplo na análises de Costa et al. (2008), o estresse aplicado no estágio vegetativo do milho reduziu o conteúdo relativo de água, sua área foliar, matéria seca das raízes e parte aérea das plantas, sendo esses parâmetros afetados também no estágio reprodutivo.

A frequência e a intensidade em que estes processos ocorrem, ressalta a importância do conhecimento das condições meteorológicas durante o período de desenvolvimento das plantas, principalmente quanto aos períodos de baixa precipitação e elevada demanda na evapotranspiração. Na agricultura de sequeiro, a prioridade é associar a época de plantio ao período mais adequado de disponibilidade de água às plantas (SANTOS; CARLESSO, 1998). Este trabalho é rotineiramente realizado pelos agrometeorologistas e constitui o Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC).

2.4 Evapotranspiração de referência (ET_0)

O consumo de água de uma cultura corresponde ao fluxo de vapor d'água do sistema solo-planta para a atmosfera, de modo que a quantidade de água armazenada nos tecidos da planta é tão pequena, que a considera insignificante, assim sendo expresso na forma de evapotranspiração (ALLEN et al., 1998). Esta constitui de um processo simultâneo de dois fatores, que são a evaporação da água presente no solo e a transpiração das plantas. Esses processos variam de acordo com o desenvolvimento da cultura, uma vez que na fase inicial a maior perda ocorre por evaporação do solo, e posteriormente, com a planta desenvolvida, esse fenômeno deve-se mais ao componente da transpiração das plantas do que a evaporação do

solo, voltando a evaporação a pesar bastante no processo na fase final quando ocorre a senescência foliar (ALLEN et al., 1998).

A evapotranspiração, pode ser classificada sob diferentes aspectos, o que torna mais fácil distinguir os tipos de evapotranspiração, como, evapotranspiração de referência, máxima ou da cultura e a real. De acordo com Allen et al. (1998) a evapotranspiração de referência (ET_0) pode ser descrita como a evapotranspiração de uma superfície de referência, a qual não possui restrições hídricas, usando como referência uma superfície hipotética de vegetação rasteira com características específicas, assemelhando-se muito a uma superfície gramada.

Considerando as condições para a determinação de ET_0 , em que os fatores planta e solo não afetam, e a água estará sempre disponível, portanto a ET_0 pode ser considerada uma variável climática. Atualmente o método mais qualificado para a estimativa de ET_0 , o qual pode fornecer valores nas escalas diária ou horária é chamado de Penman-Monteith. Este que é método combinado requer dados de temperatura e umidade do ar, velocidade do vento e radiação solar (ALLEN et al., 1998).

Para a estimativa de valores a equação é descrita abaixo:

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta (R_n - G) + \gamma \frac{C_n}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma + (1 + C_d u_2)} \quad (1)$$

onde ET_0 é a evapotranspiração de referência estimada pelo método Penman-Monteith na escala diária (mm d^{-1}) ou em escala horária (mm hora^{-1}); Δ é a declividade da curva de pressão de vapor da água à temperatura do ar ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); R_n é a radiação líquida na superfície ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ ou $\text{MJ m}^{-2} \text{hora}^{-1}$); G é o fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ ou $\text{MJ m}^{-2} \text{hora}^{-1}$); γ é a constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), C_n é a constante do numerador que varia com o tempo de análise (Tabela 1); T é a temperatura média do ar medida a 2 m de altura ($^\circ\text{C}$), u_2 é a velocidade do vento a 2 m de altura (m s^{-1}), e_s é a tensão de saturação de vapor (kPa), e_a é a tensão parcial de vapor (kPa) e C_d é a constante do denominador que varia com o tempo de análise (Tabela 1).

Tabela 1. Valores da constante do denominador (C_d) e constante do numerador (C_n).

Método para a estimativa de ET_o	C_d	C_n
ET_o Penman-Monteith diário	0,34	900
ET_o Penman-Monteith horário $R_n \leq 0$	0,96	37
ET_o Penman-Monteith horário $R_n > 0$	0,24	37

2.5 Evapotranspiração máxima (ET_m)

A ET_m refere-se às condições em que a oferta de água é suficiente para o crescimento e desenvolvimento de uma cultura sadia, sem restrição, cultivada em grandes áreas sob condições ótimas de manejo agrônômico (DOORENBOS; KASSAM, 1994).

Para Reichardt (1990) a ET_m representa a máxima perda de água que certa cultura sofre em dado estágio de desenvolvimento, quando não existe restrição de água no solo, razão pela qual a mesma é utilizada para se calcular a demanda hídrica máxima de uma cultura, em projetos de irrigação.

Conforme a metodologia proposta em Allen et al. (1998), a estimativa da ET_m baseia-se em duas fases. Na primeira os valores de ET_o são estimados utilizando dados locais de estações meteorológicas e, na segunda, a partir de valores do coeficiente de cultivo (K_c) determinados experimentalmente para cada cultura. Desse modo, os valores de ET_m podem ser obtidos pela equação, multiplicando a ET_o pelo (K_c):

$$ET_m = ET_o \times K_c \quad (2)$$

sendo ET_m a evapotranspiração máxima (mm dia^{-1}), ET_o a evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}) e K_c o coeficiente de cultivo (adimensional).

2.6 Evapotranspiração real (ET_r)

De acordo com o Boletim da FAO nº 56 (ALLEN et al., 1998), a evapotranspiração real (ET_r), refere-se a evapotranspiração de culturas crescidas sob condições ambientais e de manejo que difere das condições padrão, podendo resultar

em crescimento limitado da planta. Devido à essas condições não ótimas a ET_r muitas vezes pode divergir da ET_m .

Quando a umidade do solo está próxima da capacidade de campo, a evapotranspiração de uma cultura será máxima, ao passo que, à medida que o solo perde água, a evapotranspiração real da cultura tende a apresentar valores menores do que evapotranspiração máxima da cultura (BERNARDO et al., 2005).

Sendo assim, se houver água disponível no solo e o fluxo de água na planta atender à demanda atmosférica, a ET_r será igual a ET_m ; se houver restrição de água no solo e a demanda atmosférica não for atendida, a ET_r será menor que a ET_m . A disponibilidade de água afeta a produtividade e a situação ideal para a cultura seria a ET_r igual a ET_m . Toda vez que a $ET_r < ET_m$, existe restrição de água e a produtividade pode ser afetada (FREITAS et al., 1999).

Assim como a determinação da ET_m , as taxas de ET_r são determinadas conforme o disposto em Allen et al. (1998). Esta é baseada no cálculo da disponibilidade real da umidade do solo. Para determiná-la, multiplica-se o valor da evapotranspiração máxima da cultura por um coeficiente de estresse hídrico (K_s) em que o seu valor dependa da umidade do solo, de acordo com a equação:

$$ET_r = K_s \times ET_m \quad (3)$$

sendo ET_r a evapotranspiração real da cultura (mm dia^{-1}), K_s o coeficiente de estresse hídrico, adimensional e variável de 0 a 1, o qual é determinado pela Equação 4 e ET_m a evapotranspiração máxima da cultura (mm dia^{-1}).

$$K_s = \frac{CAD - D_r}{CAD - AFD} = \frac{CAD - D_r}{(1 - p) CAD} \quad (4)$$

onde K_s coeficiente de estresse hídrico (adimensional e variável de 0 a 1), CAD: capacidade de água disponível no solo (mm), D_r a depleção de água na zona radicular (mm), p a fração da CAD que a cultura pode extrair da zona radicular (mm) sem sofrer estresse hídrico, AFD a água do solo facilmente disponível na zona radicular (mm).

O K_s está relacionado ao nível de tolerância ao estresse, que demonstra a aptidão da planta para enfrentar um ambiente desfavorável. O déficit hídrico também pode ser definido como todo o conteúdo de água de um tecido ou célula que está abaixo do conteúdo de água mais alto exibido no estado de maior hidratação (TAIZ; ZEIGER, 2004). O K_s descreve o efeito do estresse sofrido pela planta durante seu ciclo. Para condições climáticas onde ocorrem poucos eventos de precipitação, o K_s será menor que 1 ($K_s < 1$), por outro lado, em situações onde não exista nenhum estresse hídrico, o K_s será igual a 1 ($K_s = 1$).

2.7 Balanço hídrico

O acompanhamento contínuo das condições hídricas do solo mostra-se fundamental no gerenciamento das áreas cultivadas e para a previsão de safras. Este acompanhamento é realizado através balanço hídrico, sendo um dos métodos mais utilizados para o acompanhamento da umidade no solo. Visando calcular o balanço de água contida no solo, levando-se em consideração, tanto o tipo de vegetação, quanto o seu estágio fenológico e oferecendo um conjunto de informações a respeito de cultivos temporários, com base na ocorrência de déficit hídrico durante o período de safra (SISDAGRO, 2017).

O balanço hídrico pode ser compreendido como uma contabilização da água presente no solo, através da variação da lâmina de água durante um período de tempo, essa variação ocorre através de entradas e saídas de água na camada em que se concentra a maior parte das raízes das plantas, obtendo-se a variação no armazenamento hídrico do solo (CONCEIÇÃO, 2010).

Para Borges et al. (2012), em se tratando de aspectos práticos somente são levadas em consideração as entradas de água no solo por meio de precipitação e irrigação e saídas pela evapotranspiração e escoamento superficial, esse último quando a lâmina de água da chuva ou irrigação ultrapassa a capacidade do solo reter a água.

De acordo com PEREIRA et al. (1997), este método se constitui no sistema contábil de monitoramento de água no solo, onde são fornecidos dados de precipitação e de demanda atmosférica para serem estimados valores de

evapotranspiração da cultura, da deficiência, do excedente e do armazenamento de água no solo.

Para a determinação do balanço hídrico de cultivos deve-se determinar a capacidade de água disponível no solo (CAD). O cálculo da CAD deve ser realizado para cada tipo de solo e para cada uma das camadas de solo, pois esta variável é determinada pelas características do solo e pela profundidade das raízes das culturas. Além da CAD é necessário ter conhecimento sobre a fenologia das plantas, sua demanda hídrica e os fatores climatológicos (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2007).

O uso desta metodologia tem sido necessária ao produtor para quantificar as deficiências hídricas, estimativa da produtividade relativa de uma safra semeada em data definida e as necessidades de irrigação total e suplementar, informações estas fundamentais para o planejamento da irrigação, época de semeadura, a nível de propriedade e/ou em escala regional (ANDRADE JUNIOR, 2000).

De acordo com Dantas, Carvalho e Ferreira (2007) o estudo desta metodologia pode ser utilizado para o zoneamento agroclimático da região, monitoramento da água na cultura irrigada, e no conhecimento do regime hídrico para definir épocas de semeadura ou optar por cultivos irrigados, pois as atividades agrícolas estão sempre expostas a riscos e insucessos, devido as variações climáticas.

2.8 Fator de resposta da produção (K_y)

Os fatores referentes ao solo, planta e à atmosfera interagem entre si, determinando a produtividade das culturas agrícolas. Existe uma relação entre esses fatores e a produção das culturas, característica de cada condição ambiental, chamada de fator de resposta da produção ou, simplesmente, função de produção (SILVA, 2009).

De acordo com Bernardo (1998), uma função de produção é tida como a relação entre um conjunto específico de fatores envolvidos no processo produtivo e a sua produtividade final obtida. Dentre as diferentes aplicações da função de produção, pode-se determinar a relação entre dois fatores que afetam diretamente a produção final, o rendimento da cultura e o suprimento de água que podem ser

determinados quando se puder quantificar, de um lado, as necessidades hídricas da cultura e os efeitos do seu déficit e, de outro, os rendimentos máximo e real da cultura (ALMEIDA et al., 2013).

Quando as necessidades hídricas da cultura não são atendidas plenamente, o déficit hídrico na planta pode ser desenvolvido até um ponto em que o crescimento e o rendimento da cultura tornam-se afetados. A forma em que o déficit hídrico afeta o crescimento e o rendimento da cultura variam de acordo com a espécie e o estágio fenológico que experimenta o déficit (DOORENBOS e KASSAN, 1994) e cada cultura possui a quantidade de água que resulta em seu crescimento e rendimento máximo (SANTOS JUNIOR, 2011).

Como a necessidade hídrica varia entre as espécies, e ao longo do seu ciclo, conhecer as respostas das espécies a esse fator é de grande importância para a elaboração de planos de manejo adequados, considerando o uso racional dos recursos disponíveis, de maneira a se obter rendimentos econômicos mais altos (LIMA et al., 2012).

Assim, o efeito da falta de água disponível no solo sobre o decréscimo da produtividade potencial, ocorrida durante o ciclo da cultura é quantificado mediante a determinação do coeficiente K_y , que é considerado uma medida da sensibilidade da cultura ao déficit hídrico (SILVA et al., 2014).

De acordo com Arruda e Grande (2003), para a quantificação do efeito hídrico na produção, o uso do fator de resposta da produção (K_y) ou índice de sensibilidade ao déficit hídrico é o que vem recebendo destaque e recomendação pela FAO (DOORENBOS e KASSAN, 1979). Este método evidencia os efeitos no rendimento da cultura decorrentes do nível de suprimento da necessidade hídrica de determinado cultivo e este, por sua vez, sendo influenciado indiretamente pelo conteúdo hídrico do solo. Pode ser descrito a partir da equação:

$$\left(1 - \frac{Y_r}{Y_m}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET_r}{ET_m}\right) \quad (5)$$

onde: Y_r é o rendimento real (kg ha^{-1}), Y_m o rendimento máximo ou potencial (kg ha^{-1}), K_y o fator de resposta da produção, ET_r a evapotranspiração real da cultura (mm), ET_m a evapotranspiração máxima da cultura (mm).

Os valores de K_y para a maioria das culturas foram determinados a partir de relações lineares, devido que o rendimento relativo (Y_r/Y_m) é relacionado linearmente com a evapotranspiração relativa (ET_r/ET_m), ou seja, quando ocorre alterações com a variável independente, conseqüentemente, a variável dependente se altera. Esses valores estão baseados em análise de dados experimentais de campo que abrangem uma ampla faixa de condições de crescimento, de variedades altamente produtivas, bem adaptadas ao ambiente de crescimento e desenvolvidas sob alto nível de manejo (FRIZZONE et al., 2005).

Para Doorenbos e Kassam (1979), a sensibilidade das culturas ao déficit hídrico pode ser classificada como: baixa ($K_y < 0,85$); baixa/média ($0,85 < K_y < 1$); média/alta ($1 < K_y < 1,15$) e alta ($K_y > 1,15$). De modo geral, o valor de $K_y < 1$ representa redução na produção proporcionalmente menor ao se aumentar o déficit hídrico. Porém, $K_y > 1$ significa que a redução no rendimento é proporcionalmente maior em relação ao aumento do déficit hídrico.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Descrição do local de estudo

O presente estudo foi desenvolvido visando sua aplicação para a região de Dourados – MS, muito embora extrapolações possam ser feitas para um contexto regional ainda mais amplo.

O clima na região é do tipo Cwa, mesotérmico úmido, com verões quentes e inverno seco, segundo a classificação de Köppen-Geiger (KOTTEK et al., 2006). Esta região se caracteriza pelo clima bastante irregular, sobretudo no que concerne à distribuição das chuvas no período das safras. Segundo o banco de dados do GUIA CLIMA (2017) referente ao período de 1980 a 2016 (37 anos), a precipitação média anual é de 1389 mm, sendo dezembro considerado o mês mais chuvoso, com 178 mm, e julho o mais seco, com 44 mm. A temperatura média anual é de 22,5 °C, sendo julho o mês mais frio com 18 °C e dezembro e janeiro, os meses mais quentes, com 25,4 °C.

O solo da região é classificado como Latossolo Vermelho Distroférico, de característica profunda e textura muito argilosa (60% a 70% de argila). A capacidade de água disponível (CAD) considerada para este tipo de solo é de 83 mm para o primeiro metro de profundidade (AMARAL et al., 2000; FLUMIGNAN et al., 2015).

3.2 Balanço hídrico

3.2.1 Equação do balanço hídrico utilizada

O balanço hídrico diário sequencial foi implementado conforme a metodologia apresentada pela FAO (ALLEN et al., 1998) e pode ser descrito através da Equação 6, foi implementado no período de cultivo das safras de milho safrinha para a região de Dourados – MS, a partir de 2001 até o ano de 2013, totalizando 13 safras simuladas e analisadas.

$$ET = I + P - RO - DP + CR \pm \Delta SF \pm \Delta SW \dots\dots\dots(6)$$

onde: ET é a evapotranspiração (mm), I a irrigação (mm), P a precipitação (mm), RO o escoamento superficial (mm), DP a percolação profunda que eventualmente reabastece o lençol freático (mm), CR a ascensão capilar das partes mais rasas do lençol freático para a zona das raízes (mm), ΔSF a variação da água que flui horizontalmente através do escoamento sub-superficial (mm) e ΔSW a variação do armazenamento num determinado período de tempo (mm).

3.2.2 Parâmetros de entrada de dados do balanço hídrico

Nas simulações foram consideradas as entradas e saídas de água no sistema. Devido ao milho safrinha ser cultivado, predominantemente, sob sistema de sequeiro, a irrigação foi desconsiderada para tais condições. A precipitação foi quantificada a partir de dados diários desta variável, obtidos da estação meteorológica da Embrapa - Agropecuária Oeste, a partir do banco de dados do GUIA CLIMA (2017). A CR constitui um parâmetro de entrada de água de água muito pequeno e ocorrem em locais com lençol freático superficial e em longos períodos de seca, sendo também desconsiderado. A ET_r foi considerada como a saída de água deste sistema. Sendo que, o RO e DP foram desprezados, pois para RO a topografia da região de estudo, em sua maioria é considerada plana, e a DP via saída de água do volume do solo ocorre em períodos com excesso de chuvas. Assim, a ΔSW foi determinada pela diferença dos valores do armazenamento de água nos tempos inicial e final de cada dia do período considerado.

Considerou-se que, no início do balanço hídrico, o solo estava com armazenamento hídrico pleno, ou seja, na condição de CC.

A duração de cada fase do milho safrinha durante o ciclo foi aquela recomendada por Rezende (2016). Sendo assim, a Fase 1 (Inicial) teve duração de 18 dias, seguido da Fase 2 (Crescimento) com 16 dias, Fase 3 (Intermediária) com 67 dias e Fase 4 (Final) com 39 dias. Portanto, considerou-se que o ciclo total teve 140 dias.

Em cada safra considerou-se a semeadura sendo realizada em quatro épocas diferentes: 01 de fevereiro, 15 de fevereiro, 01 de março e 15 de março. Essas

datas foram utilizadas em função do que recomenda o zoneamento agrícola de risco climático (ZARC) para a região e também o histórico das épocas em que se dá preferencialmente a semeadura por parte dos produtores, porém a semeadura de 15 de março está fora do recomendado pelo (ZARC). A adoção destas diferentes épocas possibilitou melhor qualidade ao estudo, pois a semeadura nas diferentes áreas, na prática ocupa toda esta janela temporal, ao invés de ser realizada pontualmente em uma única época. Logo, isso permitiu reproduzir mais assertivamente a realidade do campo.

A profundidade efetiva do sistema radicular foi obtida a partir de estudos prévios, ainda não publicados, realizados na Embrapa Agropecuária Oeste, e estabelecida pelo monitoramento da tensão da água no solo em diferentes profundidades durante o ciclo e identificando as camadas onde havia extração de água pelo sistema radicular do milho safrinha. Assim, assumiu-se que essa profundidade efetiva era de 15 cm na Fase 1 (Inicial), 30 cm na Fase 2 (Crescimento) e 40 cm nas Fases 3 e 4 (Intermediária e Final). Desta forma, a capacidade de água disponível (CAD) considerada foi de 12,5 mm, 24,9 mm e 33,2 mm nas referidas fases, respectivamente.

Nas simulações considerou-se que sempre que o armazenamento de água no solo superava a CAD (excesso hídrico), o armazenamento seria limitado à própria CAD.

Com base em Allen et al. (1998), definiu-se que o milho tolera situações onde o armazenamento é rebaixado até 45% da CAD. Devido a isso, o fator de depleção de água no solo (f) foi definida como 0,55, ou seja, nenhuma restrição às taxas de evapotranspiração seria imposta até que 55% da CAD foi reduzida. Desse modo, quando restasse no solo menos de 45% da CAD, começaria a se estabelecer restrição nas taxas de evapotranspiração. Considerando estes valores, definiu-se que o armazenamento crítico de água no solo era de 5,6 mm para a Fase 1 (Inicial), 11,2 mm para a Fase 2 (Crescimento) e 14,9 mm para as Fases 3 e 4 (Intermediária e Final).

3.2.3 Estimativa da evapotranspiração

Foi utilizada uma série histórica de dados climatológicos diários do período de 2001 a 2013. Estes foram obtidos a partir do banco de dados da estação meteorológica de Dourados (GUIA CLIMA, 2017), localizada na Embrapa – Agropecuária Oeste, cujas coordenadas geográficas são: 22° 17' de latitude sul, 54° 49' de longitude oeste e 408 metros de altitude.

3.2.4 Dados climatológicos utilizados

Os dados meteorológicos incluíram a temperatura e umidade relativa do ar, radiação solar e velocidade do vento. Com exceção da radiação solar, as demais variáveis foram medidas a 2 m acima da superfície de referência. Ressalta-se que essa é uma condição requerida para a aplicação destes dados para fins de estimativa das taxas de ET_0 pelo o método de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998) demonstrado pela Equação 1.

Os dados horários e diários foram aferidos quanto a sua qualidade seguindo as recomendações constantes em Allen (1996). Após essa aferição, estimou-se a ET_0 em ambas as escalas temporais pelo método de Penman-Monteith, seguindo três diferentes padronizações: ASCE-PM (JENSEN; BURMAN; ALLEN, 1990), FAO56-PM (ALLEN et al., 1998) e ASCE-stPM (ASCE-EWRI, 2005). A estimativa dos valores de ET_0 foi realizada com software REF-ET (ALLEN, 2000).

A evapotranspiração máxima da cultura (Et_m) foi determinada com a finalidade de se desenvolver avaliações sobre a disponibilidade hídrica e delimitações de períodos de deficiência hídrica.

A estimativa da ET_m foi realizada através da Equação 2, utilizando valores de ET_0 e valores do coeficiente de cultivo (K_c) determinados experimentalmente para a cultura do milho por Rezende (2016) de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2. Coeficientes de cultivo (K_c) do milho safrinha determinado por lisimetria de acordo Rezende (2016).

Recomendação	K_c	Duração (dias)
Kc ini	0,5	34
Kc mid	1,2	67
Kc end	0,47	39

A ET_r , foi determinada pela Equação 3, multiplicando-se ET_m pelo coeficiente de estresse hídrico (K_s) dependente da umidade do solo (Equação 4).

3.3 Ajuste do fator de resposta da produção (K_y)

O modelo linear (polinômio de primeiro grau) proposto por Doorenbos e Kassam (1979) (Equação 5) foi utilizado para determinar a redução do rendimento relativo, em função da deficiência hídrica.

3.3.1 Parâmetros de produtividade e evapotranspiração utilizadas

Os valores de rendimento real (Y_r) foram oriundos do banco de dados agregados do Sistema do IBGE de Recuperação Automática (SIDRA) (IBGE, 2016), por meio deste conseguiu-se o histórico de produtividade média do milho safrinha da região de Dourados, MS, para o período de 2001 a 2013.

Por sua vez, o valor de rendimento máximo (Y_m) foi assumido como igual a 8820 kg ha^{-1} (147 sc ha^{-1}). Este valor foi obtido a partir do trabalho desenvolvido por Rezende (2016), em Dourados, na Embrapa Agropecuária Oeste, ao avaliar a produtividade do milho safrinha cultivado sob condições otimizadas de produção. Essas condições incluíram a ausência de deficiência hídrica, por ser a cultura irrigada.

Embora tenham sido simuladas quatro épocas de semeadura, foi considerado para efeito de análise dos valores de ET_m e ET_r , a média dessas quatro épocas gerando valores característicos para cada safra. Os anos de 2001, 2004 e 2011 foram retirados da modelagem do K_y , pois ficou evidente que as quebras de safra que

ocorreram foram decorrentes da ocorrência de geadas, o que fez com que o esforço de modelagem produzisse resultados insatisfatórios.

3.3.2 Obtenção do fator de resposta da produção (K_y)

Para a obtenção da função de produção foi utilizada a análise de regressão entre a variável dependente (rendimento relativo) e a evapotranspiração como variável independente. Esse procedimento matemático resultou no coeficiente de inclinação da regressão linear que originou os valores de K_y .

Portanto, $[1 - (Y/Y_m)]$ representa a redução do rendimento relativo e $[1 - (ET/ET_m)]$ representa o déficit de evapotranspiração relativo. O déficit hídrico (ET/ET_m) pode ocorrer de forma contínua, ao longo de todo o ciclo da cultura, ou durante qualquer uma das fases de desenvolvimento (DOORENBOS & KASSAM, 1979).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Balanço hídrico

4.1.1 Análise de todas as safras

A análise dos dados de precipitação e evapotranspiração possibilitou a interpretação do comportamento das chuvas e a sua relação com o déficit hídrico ao longo do ciclo da cultura do milho safrinha, principalmente nas suas fases críticas, nas quais a falta de água reduz a produção de grãos.

Verifica-se na Tabela 3 a variação das médias para a precipitação, evapotranspiração de referência, máxima e real e deficiência hídrica para o balanço hídrico referente as safras de milho safrinha analisadas. Os valores obtidos para cada safra na simulação variaram em função da precipitação efetiva e evapotranspiração no ciclo total de cultivo.

Tabela 3. Valores médios (considerando as quatro épocas de semeadura testadas) de número de dias chuvosos (DC; dias), precipitação (P; mm), evapotranspiração de referência (ET₀; mm), evapotranspiração máxima (ET_m; mm), evapotranspiração real (ET_r; mm) e déficit hídrico (DH; mm) para as safras de milho safrinha simuladas, na região de Dourados, MS, no período de 2001 a 2013.

Safras	DC	P	ET ₀	ET _m	ET _r	DH
2001	28,5	528,4	498,7	472,6	299,4	173,1
2002	13,5	271,7	554,2	535,1	182,8	352,3
2003	16,3	432,5	396,3	471,3	258,7	212,6
2004	35,0	725,8	475,9	438,5	314,5	124,0
2005	14,0	280,0	527,0	502,1	183,3	318,8
2006	18,7	399,0	459,6	431,5	221,9	209,7
2007	16,3	323,6	498,0	473,6	194,5	279,1
2008	17,5	368,6	466,2	436,5	219,1	217,4
2009	12,5	251,7	479,2	459,1	174,6	284,4
2010	14,7	364,5	484,9	455,4	198,8	256,6
2011	23,0	548,4	442,4	420,2	259,4	160,9
2012	22,3	639,6	426,7	400,3	278,0	122,3
2013	28,5	796,0	412,1	387,7	244,3	143,3
Média	20,1	456,1	470,9	452,6	233,0	219,6

Ao avaliar os dados descritos na Tabela 3, nota-se a caracterização do clima da região, com anos-safra bastante irregulares, em relação a distribuição de chuvas no período de cultivo do milho safrinha com ocorrência frequente de veranicos. Essa irregularidade desencadeia períodos de baixa e de alta pluviosidade.

A deficiência hídrica variou de 122,3 mm em 2012 a 352,3 mm em 2002, sendo determinante nos diferentes rendimentos de grãos obtidos.

O rendimento de grãos no sistema de sequeiro é altamente dependente das interações entre suas fases fenológicas e as variações interanuais do clima. Toda cultura plantada nesse sistema depende da quantidade, da distribuição e da intensidade das precipitações (SILVA et al., 2009).

4.1.2 Ano chuvoso

O ano-safra com maior índice pluviométrico foi 2013 com 796 mm (Tabela 3), distribuídos irregularmente em cada fase fenológica da cultura (Figura 1). Essa distribuição irregular influencia negativamente a produtividade do milho safrinha, pois veranicos e estiagens que ocorrem frequentemente nos meses em que é cultivado este sistema (FIETZ et al., 2013), causam a sua redução, pois a maioria dos produtores, não fazem uso de irrigação suplementar para suprir a necessidade de água.

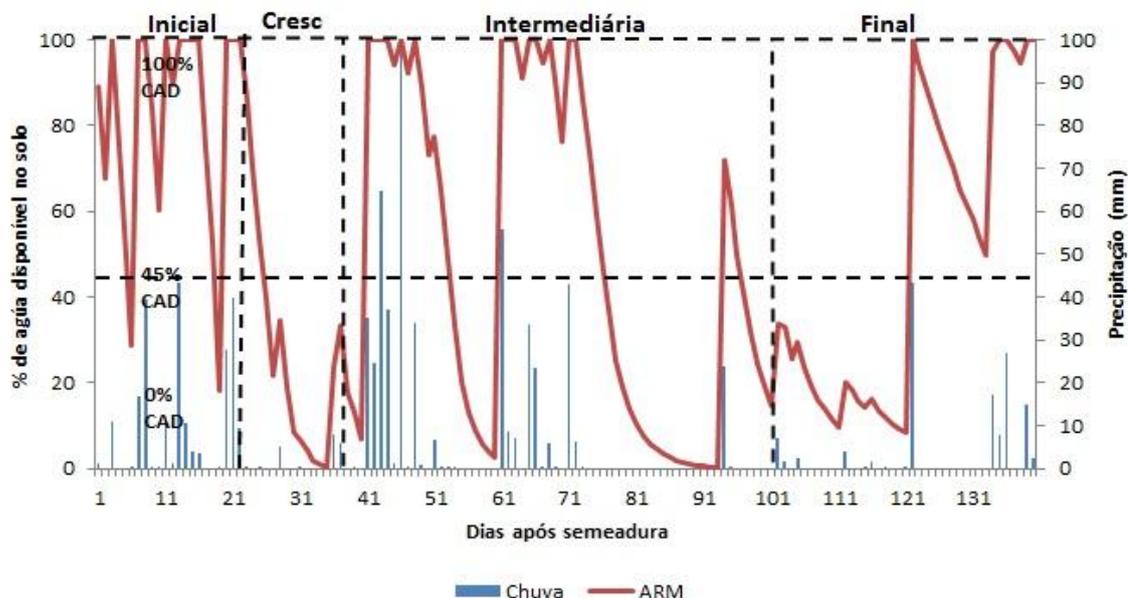


Figura 1. Dinâmica da água disponível no solo e da precipitação simulada para o milho safrinha durante o ano-safra 2013 para a região de Dourados, MS.

Pode-se notar que, mesmo com as chuvas sendo abundantes a cultura experimentou períodos de deficiência hídrica na sua fase intermediária, por

aproximadamente 27 dias, período este que determina o potencial produtivo da planta, por abranger as fases de R1 (florescimento), R2 (bolha d'água) e R3 (grãos leitosos). Nesses períodos a planta necessita de maior eficiência no uso da água do solo, por ser considerada uma cultura que demanda muita água, o milho também é das mais eficientes no seu uso, isto é, produz uma grande quantidade de matéria seca por unidade de água absorvida (ALBUQUERQUE; ANDRADE, 2001).

4.1.3 Ano de precipitação normal

O ano-safra de 2003 teve chuva considerada normal para a região, com volume de 432,5 mm (Tabela 3). Na Figura 2 podemos observar o comportamento da chuva e da água disponível no solo para este período.

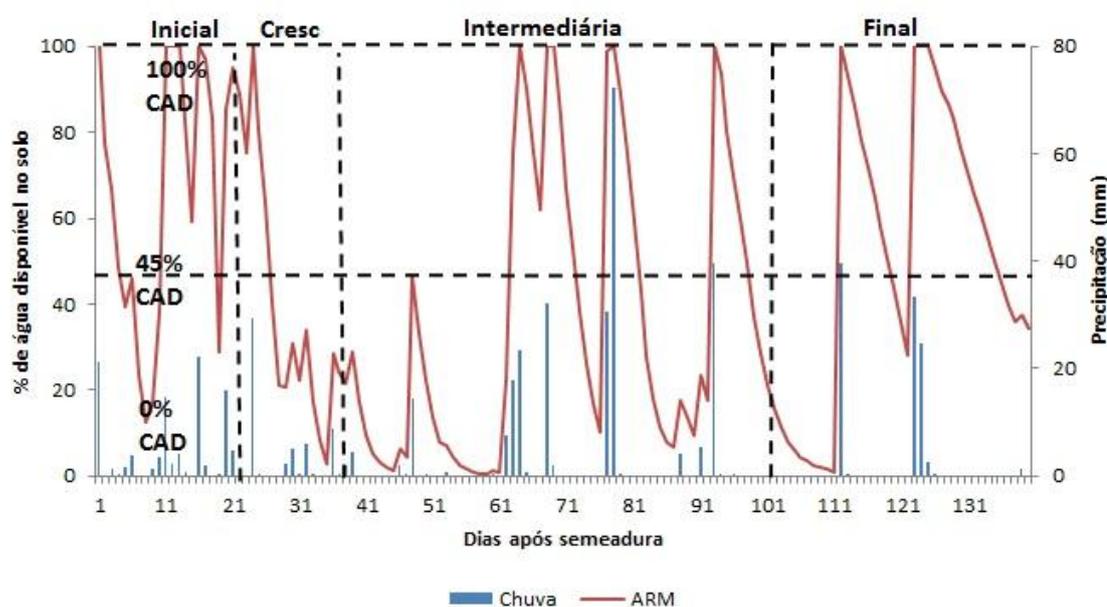


Figura 2. Dinâmica da água disponível e da precipitação simulada para o milho safrinha durante o ano-safra de 2003 para a região de Dourados, MS.

Verifica-se que houve má distribuição das chuvas no período considerado, pois a cultura experimentou déficit hídrico em sua fase intermediária, aos 40 a 61 e na fase final aos 111 dias após a sementeira, totalizando 33 dias em que o solo esteve abaixo de sua umidade crítica. De acordo com Weismann (2008), neste

período crítico a falta de água pode ocasionar quedas no rendimento, pois nessa fase ocorre alta taxa de desenvolvimento de órgão florais e enchimento de grãos.

Para Detomini et al. (2009) e Fancelli e Dourado Neto (2004) a redução na disponibilidade hídrica em fase de desenvolvimento e intermediária resultam em perdas quantitativas e qualitativas dos grãos, pois o milho possui desenvolvimento influenciado pelas condições de umidade do solo. A duração e a intensidade da escassez de água, podem acarretar injúrias à planta, que responde de diversas formas. Pode ocorrer redução do teor de água, diminuindo o potencial hídrico foliar, perda de turgor, fechamento dos estômatos e diminuição do crescimento celular, são algumas respostas de uma planta submetida ao estresse hídrico (JALEEL et al., 2009).

4.1.4 Ano seco

A safra 2009 teve o menor índice pluviométrico, com média de chuva de 251,7 mm (Tabela 3). Nas fases de maior demanda hídrica da cultura, crescimento e intermediária, ocorreram, respectivamente 23,3 e 71,0 mm, contribuindo expressivamente para um déficit hídrico de 284,4 mm. Magalhães e Durães (2006) observaram que dois dias de estresse hídrico no florescimento diminui o rendimento em mais de 20%, enquanto quatro a oito dias reduzem em mais de 50%. Assim, sendo o milho uma planta de metabolismo do tipo C4, sua elevada produtividade está associada a sua máxima área foliar, quando ocorre maior disponibilidade de radiação solar, desde que não ocorra escassez de água.

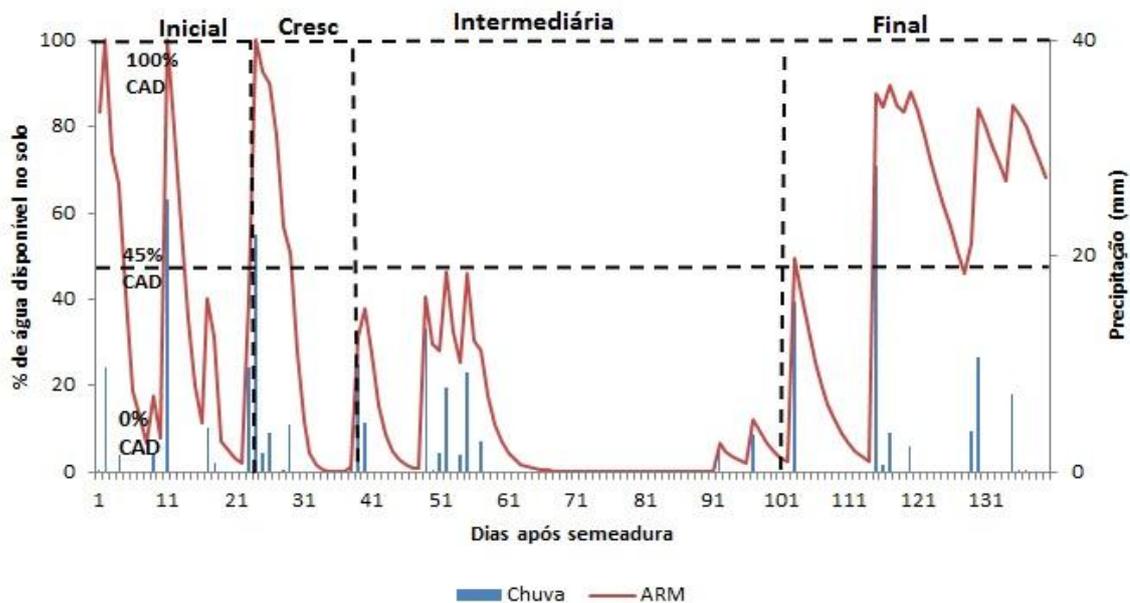


Figura 3. Dinâmica da água disponível e da precipitação simulada para o milho safrinha durante o ano-safra de 2009 para a região de Dourados, MS.

O período de 60 dias de falta de chuva dos 41 aos 101 DAS (dias após a sementeira), compreende a fase VT (pendoamento), onde as plantas encontram-se na definição do tamanho das espigas, até início da fase R4, com espigas apresentando grãos pastosos. O efeito da falta de água, é particularmente importante nestes estádios de desenvolvimento, pois nesse período o potencial da produção de grãos é determinado. Observa-se que neste período a cultura enfrentou longos eventos de deficiência hídrica. Para o período de deficiência demonstrado na Figura 3, as plantas se encontravam em alta demanda no suprimento de água e nutrientes, devido ao desenvolvimento de órgãos florais, estresse hídrico nesse período pode afetar a fotossíntese, necessária ao processo de formação de grãos, ocasionando possivelmente plantas de menor porte e redução da produção pela dessecação dos grãos de pólen.

4.2 Relação Entre Produtividade e Precipitação e Evapotranspiração

A relação entre a produção de matéria seca e a quantidade de água consumida para produzi-la busca comparar o retorno da oferta de água quanto a sua eficiência em transformar-se em produto final. Ressalta-se que a produção de matéria

seca dependente de vários fatores, tais como, variabilidade climática, práticas de manejo e material genético.

Na Tabela 4 pode-se observar, de uma maneira superficial, a correlação do rendimento de grãos com regime de chuvas. É possível inferir acerca da importância da precipitação para um bom rendimento da cultura, haja vista que a produtividade tende a ser maior quanto maior for o total de chuva na safra. O mesmo pode ser dito em relação à evapotranspiração. Por esse motivo, em sistemas de produção de sequeiro, como é o caso da maioria do milho safrinha cultivado na região, o melhor aproveitamento dos recursos hídricos é obtido com o ajuste da data de semeadura ao regime de chuvas (SOLER et al., 2007).

Tabela 4. Produtividade real do milho safrinha (sc ha⁻¹) e valores médios de precipitação (mm) e evapotranspiração real (ET_r; mm) para a região de Dourados, MS, considerando quatro épocas de semeadura (1 e 15 de fevereiro e 1 e 15 de março).

Safras	Precipitação	Produtividade real	ET _r
2002	271,7	37,1	182,8
2003	432,5	70,0	258,7
2005	279,9	24,8	183,3
2006	399,0	50,0	221,8
2007	323,6	48,3	194,5
2008	368,6	52,0	219,1
2009	251,7	21,2	174,6
2010	364,5	67,5	198,7
2012	639,5	83,7	277,9
2013	795,9	83,1	244,3

Em safras como, 2002, 2005 e 2009, as quais apresentaram baixos índices pluviométricos durante o ciclo de cultivo (média de 267,8 mm), a produtividade não foi satisfatória (média de 27,7 sc ha⁻¹). Nessas situações, com índices pluviométricos desfavoráveis, a água recebida através da precipitação não é suficiente para atender toda demanda hídrica da cultura, gerando estresse hídrico severo. Esse estresse é comprovado pela redução das taxas de evapotranspiração, o que é responsável por grandes perdas de produtividade na cultura do milho (WAGNER et al., 2013). Por outro lado, para as safras de 2003, 2010, 2012 e 2013, nas quais o regime de chuvas foi melhor distribuído e teve volume satisfatório (média de 558,1 mm), verificou-se aumento considerável da produtividade (média de 76,1 sc ha⁻¹).

A forte relação entre a produtividade e a precipitação e entre a produtividade e a evapotranspiração ficou comprovada a partir da análise de correlação apresentada na Figura 4.

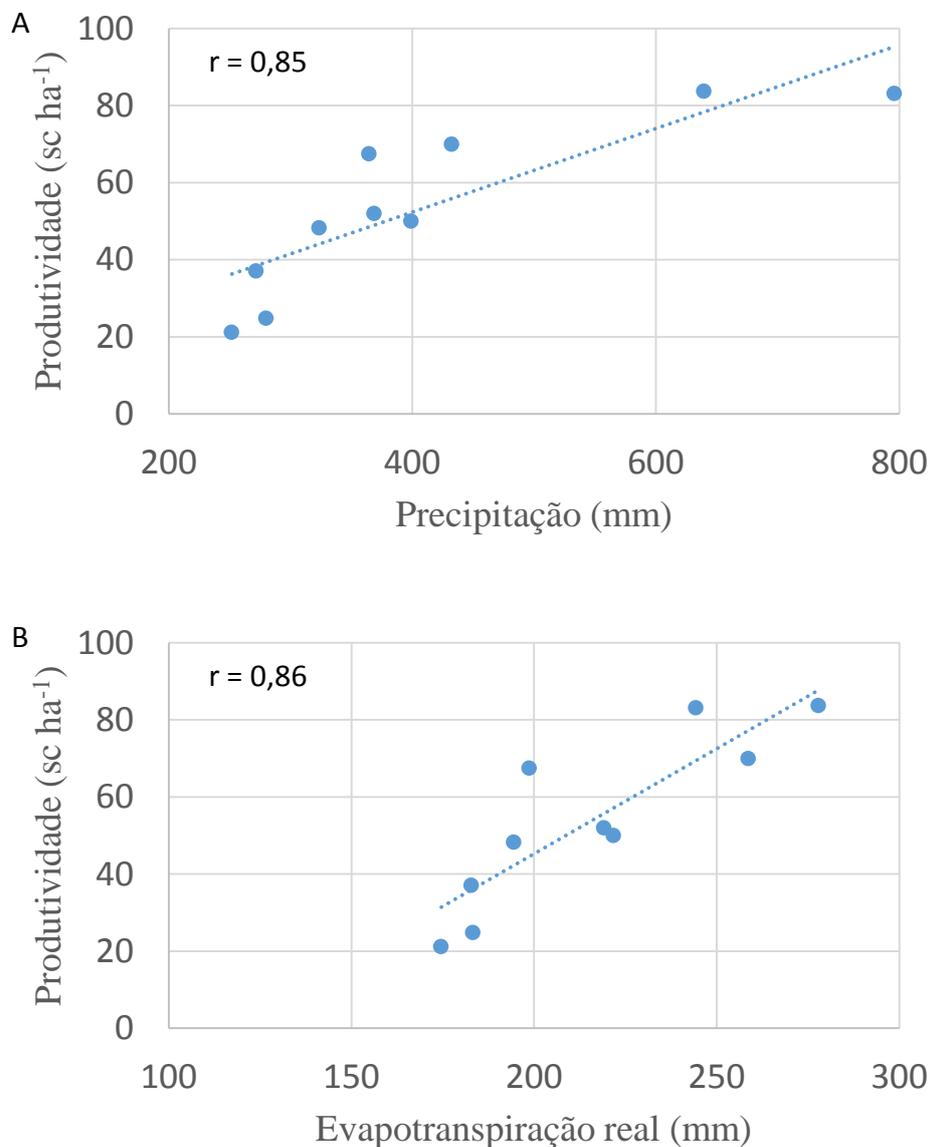


Figura 4. Análise de correlação entre a produtividade e a precipitação (A) e entre a produtividade e a evapotranspiração (B) no cultivo de milho safrinha com semeaduras de 01 de fevereiro a 15 de março na região de Dourados, MS.

Pela Figura 4 percebe-se que a relação entre as variáveis tem forte tendência linear e positiva, justificado pelos altos e positivos valores de coeficiente de correlação de Pearson (0,85 e 0,86 para precipitação e evapotranspiração, respectivamente). Esta análise demonstra que quanto maior a precipitação, por

consequência a evapotranspiração, maior a produtividade do milho safrinha. Além disso, considerando-se os valores de “r” próximos de 1, estas variáveis são as principais responsáveis por definir a produtividade, sugerindo possuir alto potencial de uso destas para fins de modelagem.

4.3 Determinação do Fator Resposta da Produção (K_y)

Para investigar os efeitos da deficiência hídrica sobre a produtividade da cultura do milho safrinha, foram determinados os coeficientes de resposta da cultura ao déficit hídrico, mais conhecido por fator de resposta da produção (K_y). Isso foi feito considerando-se o déficit que ocorreu no ciclo total em todas as safras avaliadas e para todas as épocas de semeadura testadas.

Conforme a Tabela 5, as safras mais críticas foram as de 2002, 2005 e 2009, devido ao déficit ocorrido nessas safras, o que resultou em redução de 65,8, 63,5 e 62% na evapotranspiração observada, respectivamente. Tal redução na evapotranspiração resultou em queda na produtividade de 74,8, 83,2 e 85,6%, nestas safras. Segundo Bergamaschi e Matzenauer (2014), este déficit hídrico acentuado afeta diversos processos, como a brotação, polinização, absorção de nutrientes e translocação de fotossintatos, efeitos estes que combinados convergem para a redução da produtividade. De acordo com Almeida (2016), a produtividade real da cultura decresce à medida que a severidade do déficit hídrico aumenta.

Tabela 5. Valores médios da evapotranspiração máxima (ET_m , mm), evapotranspiração real (ET_r , mm), do déficit de evapotranspiração relativa ($[(1 - ET_r/ET_m)]$, mm), da produtividade real (Y_r , sc ha⁻¹), produtividade máxima (Y_m , sc ha⁻¹) e da queda do rendimento relativo ($[(1 - Y_r/Y_m)]$, sc ha⁻¹) para as safras de milho safrinha analisadas na região de Dourados, MS.

Safras	ET_r	ET_m	$(1-ET_r/ET_m)$	Y_r	Y_m	$(1-Y_r/Y_m)$
2002	182,8	535,1	0,658	37,1	147,0	0,748
2003	258,7	471,3	0,451	70,0	147,0	0,524
2005	183,3	502,1	0,635	24,8	147,0	0,832
2006	221,9	431,6	0,486	50,0	147,0	0,66
2007	194,5	473,6	0,589	48,3	147,0	0,671
2008	219,1	436,5	0,498	52,0	147,0	0,646
2009	174,6	459,1	0,62	21,2	147,0	0,856
2010	198,8	455,4	0,564	67,5	147,0	0,541
2012	277,8	400,3	0,306	83,7	147,0	0,431
2013	244,3	387,7	0,37	83,1	147,0	0,435
Médias	215,6	455,3	0,518	53,8	147,0	0,634

Com base na Tabela 5, a função de produção, conforme o modelo linear proposto por Doorenbos & Kassam (1979), resultou em ajuste do valor de K_y igual a 1,22 (Figura 5). O ajuste do modelo obteve alto coeficiente de determinação ($R^2=0,75$) e significância a 5% de probabilidade, além do erro padrão da estimativa igual a 0,07 (7%). Esta qualidade obtida no ajuste permite afirmar que de fato a produtividade do milho safrinha cultivado na região de Dourados, MS é fortemente influenciada pelo nível de deficiência hídrica que as plantas experimentam em cada safra. Além disso, o modelo tendo sido ajustado com tal qualidade que viabiliza a utilização do mesmo para inferir ou prever a quebra da produtividade em safras futuras, com margem de erro da ordem de 7% apenas, para mais ou para menos. De acordo com Doorenbos e Kassam (1979), valores de K_y maiores que 1,15 remetem a uma planta considerada altamente sensível ao déficit hídrico. Além disso, o valor que é recomendado por estes autores, para milho (1,25), é muito próximo do que foi encontrado no presente estudo.

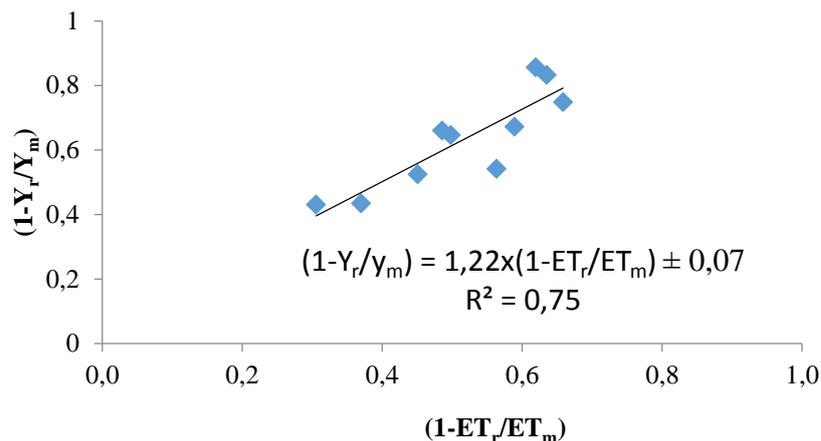


Figura 5. Ajuste do fator de resposta da produção (K_y) a partir da relação entre o déficit da evapotranspiração relativa ($1 - ET_r/ET_m$) e a queda do rendimento relativo ($1 - Y_r/Y_m$) para o milho safrinha cultivado nas safras de 2001 a 2013 na região de Dourados, MS.

Estes valores diferem do observados por Almeida (2016), que em estudo sobre o déficit e excesso hídrico na cultura do milho em ambiente protegido, obteve valor de K_y de 0,8 durante todo o ciclo da cultura, essa diferença pode ser explicada devido a característica do ambiente protegido, adaptabilidade da cultivar ao ambiente e também a oferta de água, via precipitação ou irrigação. De qualquer modo, este valor parece ser incoerente, haja vista que o milho é uma planta de metabolismo C4, ávida por água, temperaturas altas e radiação solar, o que certamente leva a mesma a ser considerada uma planta altamente sensível à deficiência hídrica. Por esse motivo, valores de K_y acima de 1,15 podem ser considerados razoáveis, portanto, pode-se considerar recomendável para uso em aplicações práticas o valor de 1,22 obtido no presente estudo.

Bouazzama et al. (2012), analisando o efeito do estresse hídrico sobre o crescimento, consumo de água e produção de milho de silagem sob inundação em clima semi-árido, observou que o (K_y), calculado foi de 1,12 para todo o ciclo da cultura, valor ligeiramente menor do que o recomendado por Doorenbos e Kassam (1979) e que o encontrado no presente estudo, o que demonstra que este coeficiente varia de acordo com o estágio de crescimento e a região de cultivo, ressaltando que não há valores padrão de coeficientes de sensibilidade ao déficit hídrico.

Este coeficiente indica a penalização da produtividade da cultura em relação à deficiência hídrica ocorrida no ciclo total, sendo que, para cada 1% de

redução na evapotranspiração reduzir-se-á 1,22% na produtividade. Considerando os dados médios da Tabela 5, na média para a região, tem-se redução na evapotranspiração de 51,8% e redução na produtividade de 63,4%. Essa redução na produtividade poderia ser agronomicamente superada com o uso da irrigação, em caráter total ou suplementar, podendo ser economicamente viável.

Os valores de ET_r , ET_m e $[(1 - ET_r/ET_m)]$, calculados para cada uma das épocas de semeaduras simuladas, 01 de fevereiro, 15 de fevereiro, 01 de março e 15 de março, são apresentados nas Tabelas 6, 7, 8 e 9. Convém lembrar que esta última época de semeadura é considerada fora do zoneamento agrícola de risco climático para o milho safrinha na região.

E por possuírem valores fixos, as variáveis Y_r , Y_m e, por consequência, a queda do rendimento relativo $[(1 - Y_r/Y_m)]$ (Tabela 5), não sofrem variação nos resultados obtidos independente da época de semeadura.

Tabela 6. Valores médios da evapotranspiração máxima (ET_m , mm), evapotranspiração real (ET_r , mm), do déficit de evapotranspiração relativa ($[(1 - ET_r/ET_m)]$, mm) para as semeaduras em 01 de fevereiro nas safras de milho safrinha analisadas na região de Dourados, MS.

Safras	ET_r	ET_m	$(1-ET_r/ET_m)$
2002	226,0	591,8	0,618
2003	299,0	520,7	0,426
2005	169,9	562,7	0,698
2006	274,6	479,0	0,427
2007	268,4	525,7	0,489
2008	280,3	488,4	0,426
2009	181,4	526,4	0,655
2010	234,0	517,3	0,548
2012	306,8	460,6	0,334
2013	284,9	450,0	0,367
Médias	252,5	512,3	0,499

Tabela 7. Valores médios da evapotranspiração máxima (ET_m , mm), evapotranspiração real (ET_r , mm), do déficit de evapotranspiração relativa ($[(1 - ET_r/ET_m)]$, mm) para as semeaduras em 15 de fevereiro nas safras de milho safrinha analisadas na região de Dourados, MS.

Safras	ET_r	ET_m	$(1-ET_r/ET_m)$
2002	184,9	552,3	0,665
2003	270,8	485,6	0,442
2005	182,2	516,6	0,647
2006	234,1	436,8	0,464
2007	201,5	486,7	0,586
2008	241,3	444,6	0,457
2009	172,8	476,4	0,637
2010	208,7	469,6	0,555
2012	292,5	415,8	0,296
2013	248,1	398,6	0,377
Médias	223,7	468,3	0,513

Tabela 8. Valores médios da evapotranspiração máxima (ET_m , mm), evapotranspiração real (ET_r , mm), do déficit de evapotranspiração relativa ($[(1 - ET_r/ET_m)]$, mm) para as semeaduras em 01 de março nas safras de milho safrinha analisadas na região de Dourados, MS.

Safras	ET_r	ET_m	$(1-ET_r/ET_m)$
2002	163,3	517,8	0,685
2003	252,2	450,0	0,440
2005	196,5	475,9	0,587
2006	209,4	412,7	0,493
2007	153,9	456,4	0,663
2008	187,5	417,8	0,551
2009	171,7	438,0	0,608
2010	177,5	433,1	0,590
2012	269,9	378,5	0,287
2013	240,0	365,4	0,343
Médias	202,2	434,6	0,525

Tabela 9. Valores médios da evapotranspiração máxima (ET_m , mm), evapotranspiração real (ET_r , mm), do déficit de evapotranspiração relativa ($[(1 - ET_r/ET_m)]$, mm) para as semeaduras em 15 de março nas safras de milho safrinha analisadas na região de Dourados, MS.

Safras	ET_r	ET_m	$(1-ET_r/ET_m)$
2002	156,9	478,4	0,672
2003	212,9	428,8	0,504
2005	184,5	453,3	0,593
2006	169,3	397,7	0,574
2007	154,1	425,6	0,638
2008	167,4	395,3	0,577
2009	172,6	395,5	0,563
2010	174,8	401,6	0,565
2012	242,7	346,2	0,299
2013	204,2	336,6	0,393
Médias	183,9	405,9	0,538

Conforme observado nas tabelas apresentadas, ocorre uma diminuição nos valores médios de ET_m com o avanço das épocas de semeadura, juntamente com um menor déficit hídrico, que apresenta valores de 259,7 mm, 244,6 mm, 232,4 mm e 222 mm, para 01 de fevereiro, 15 de fevereiro, 01 de março e 15 de março, respectivamente. Essa diminuição é decorrente da diminuição da temperatura, e principalmente da menor oferta de radiação solar e do menor fotoperíodo.

Nas Figuras 6 e 7 encontra-se a relação entre a produtividade relativa e o déficit de evapotranspiração durante todo o ciclo da cultura do milho safrinha para as semeaduras realizadas em 01 de fevereiro e 15 de fevereiro. O ajuste do modelo linear do K_y apresentou valores de 1,26 para 01 de fevereiro e 1,23 para 15 de fevereiro. Este ajuste obteve coeficiente de determinação (R^2) de 0,72 e 0,73, respectivamente.

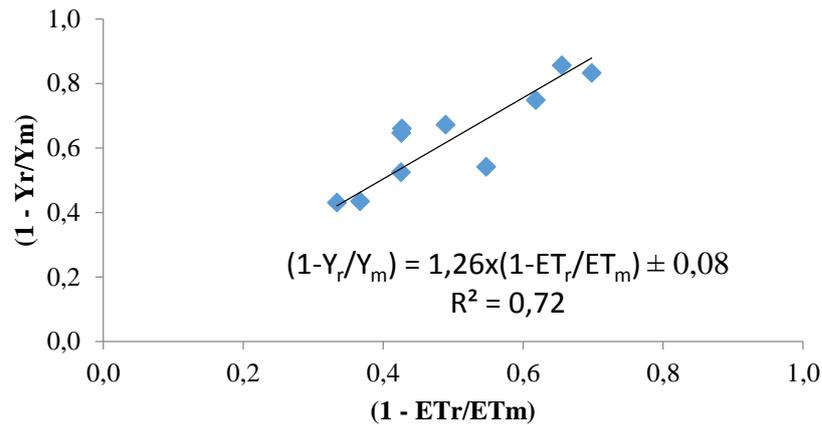


Figura 6. Ajuste do fator de resposta da produção (K_y) a partir da relação entre o déficit da evapotranspiração relativa ($1 - E_{Tr}/E_{Tm}$) e a queda do rendimento relativo ($1 - Y_r/Y_m$) para a semeadura em 01 de fevereiro do milho safrinha cultivado nas safras de 2001 a 2013 na região de Dourados, MS.

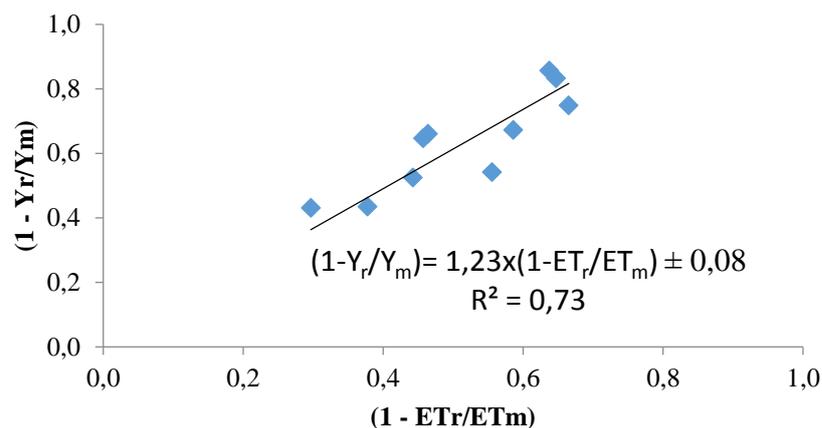


Figura 7. Ajuste do fator de resposta da produção (K_y) a partir da relação entre o déficit da evapotranspiração relativa ($1 - E_{Tr}/E_{Tm}$) e a queda do rendimento relativo ($1 - Y_r/Y_m$) para a semeadura em 15 de fevereiro do milho safrinha cultivado nas safras de 2001 a 2013 na região de Dourados, MS.

Para as semeaduras em 01 de março e 15 de março (Figuras 8 e 9), o coeficiente de determinação (R^2) apresentou-se moderado, sendo de 0,54 e 0,55, respectivamente. Os coeficientes de inclinação do modelo linear, os quais representam o próprio K_y , apresentaram valores de 1,19 e 1,17. Os menores valores de R^2 demonstram que a qualidade do ajuste nestas épocas foi menor se comparado àquelas de fevereiro. Isso reflete a realidade do campo, pois a maioria das áreas é semeada em fevereiro e menos em março.

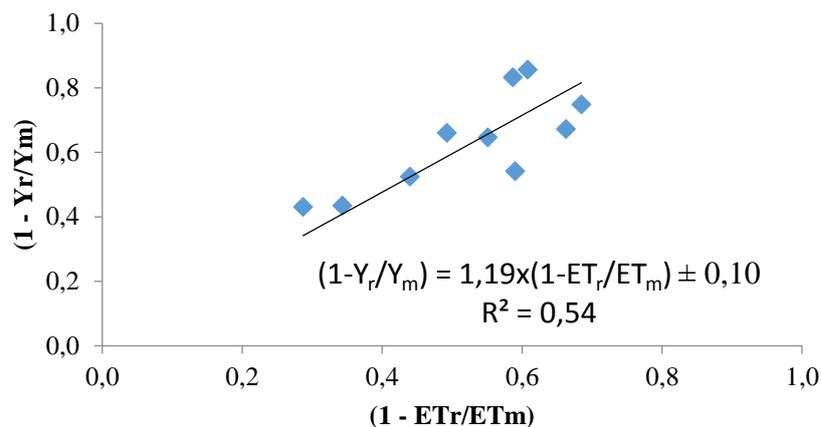


Figura 8. Ajuste do fator de resposta da produção (K_y) a partir da relação entre o déficit da evapotranspiração relativa ($1 - E_{Tr}/E_{Tm}$) e a queda do rendimento relativo ($1 - Y_r/Y_m$) para a semeadura em 01 de março do milho safrinha cultivado nas safras de 2001 a 2013 na região de Dourados, MS.

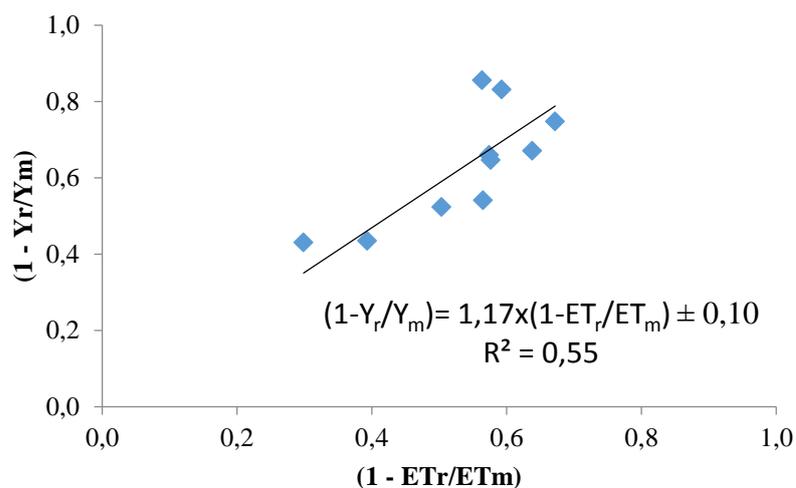


Figura 9. Ajuste do fator de resposta da produção (K_y) a partir da relação entre o déficit da evapotranspiração relativa ($1 - E_{Tr}/E_{Tm}$) e a queda do rendimento relativo ($1 - Y_r/Y_m$) para a semeadura em 15 de março do milho safrinha cultivado nas safras de 2001 a 2013 na região de Dourados, MS.

Observa-se maior dispersão dos valores de K_y nas Figuras 8 e 9 em relação as Figuras 6 e 7. Esta dispersão pode ser ocasionada pelas variações climáticas, devido a serem épocas de semeadura mais tardias, ciclo da cultivar selecionada, características edáficas da região e manejo da cultura adotado.

5. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos e considerando as condições do presente estudo, pode-se concluir que:

- O milho safrinha cultivado na região de Dourados, MS tem sua produtividade fortemente relacionada à disponibilidade de água;
- O mesmo demonstrou ser de alta sensibilidade ao déficit hídrico, haja vista seu alto valor de K_y (1,22);
- Devido às condições climáticas da região e a alta sensibilidade do milho safrinha à deficiência hídrica, a irrigação suplementar para a região de Dourados, MS é tecnicamente recomendada.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, P. E. P.; ANDRADE, C. L. T. Planilha eletrônica para a programação da irrigação de culturas anuais. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 14 p. **Circular Técnica**, 10, 2001.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: **FAO Irrigation and Drainage Paper**, v. 56, 300 p., 1998.

ALLEN, R. G. Assessing integrity of weather data for reference evapotranspiration estimation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 122, n. 2, p. 97 – 106, 1996.

_____. **REF-ET 2.0**: Reference Evapotranspiration Calculation Software. Kimberly, 2000. Disponível em: <http://www.kimberly.uidaho.edu/ref-et/>. Acesso em 19 fev. 2007.

ALMEIDA, B. M. **Déficit e excesso hídrico na cultura do milho em ambiente protegido**. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba, 2016.

ALMEIDA, R. L. S.; CHAVES, L. H. G.; SILVA, E. F.; BONOMO, P.; FILHO, R. L. S. A. Manejo da irrigação em um sistema de irrigação por aspersão do tipo canhão hidráulico. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**. Fortaleza: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2013.

ALVES, F. Q. G.; SILVA, F. C.; COSTA, I. J. S.; DAVID, A. M. S. S.; SIMÕES, D. A. Qualidade fisiológica de híbridos de milho submetidos a diferentes temperaturas. In: **Congresso Nacional de Milho e Sorgo**. Goiânia, Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2010.

AMARAL, J. A. M.; MOTCHI, E. P.; OLIVEIRA, H.; CARVALHO FILHO, A.; NAIME, U. J.; SANTOS, R. D. Levantamento semidetalhado dos solos do campo experimental de Dourados, da Embrapa Agropecuária Oeste, município de Dourados, MS. Dourados, **Embrapa Agropecuária Oeste, Documentos**, 22; Rio de Janeiro: **Embrapa Solos, Documentos**, 15, 68 p., 2000.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS – ENVIRONMENTAL AND WATER RESOURCES INSTITUTE. The ASCE standardized reference evapotranspiration equation. Reston: **ASCE**, 216 p., 2005.

JUNIOR, A. S. A. **Viabilidade da irrigação, sob risco climático e econômico, nas microrregiões de Teresina e litoral piauiense**. Piracicaba, Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, USP, 2000.

ARRUDA, F. B.; GRANDE, M. A. Fator de resposta da produção do cafeeiro ao déficit hídrico em Campinas. **Bragantia**, v.62. n.1, p.139-145, 2003.

ASSIS, J. P.; DOURADO NETO, D.; NASS, L. L.; MANFRON, P. A.; BONNECARRERE, R. A. G.; MARTIN, T. N. Simulação estocástica de atributos do clima e da produtividade potencial de milho utilizando-se distribuição triangular. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, p. 539-543, 2006.

BARROS, V. S.; COSTA, R. N.; AGUIAR, J. V. Função de produção da cultura do melão para níveis de água e adubação nitrogenada no vale do Curu – CE. **Irriga, Botucatu**, v. 7, n. 2, 2002.

BERGAMASCHI, H.; MATZENAUER, R. **O milho e o clima**. Porto Alegre: Emater/RS, Ascar, 84 p., 2014.

BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A.; BERGONCI, J. I. et al. Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 26, p.831- 839, 2004.

BERNARDO, S.; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. **Manual de Irrigação**. 7ª. Edição, Viçosa: Editora UFV, 611p., 2005.

BERNARDO, S. Irrigação e Produtividade. In: FARIA, M. A.; SILVA, E. L.; VILELA, L. A. A.; SILVA, A. M. **Manejo de Irrigação**. Lavras: UFLA/SBEA, p. 117- 132, 1998.

BORGES, C. K.; MEDEIROS, R. M.; PATRÍCIO, M. C. M.; FRANCISCO, P. R. M.; SILVA, V. M. A. Balanço hídrico como planejamento agropecuário para a cidade de Cabaceira, Paraíba. In: **8º Simpósio Brasileiro de Captação e Manejo de Água de Chuva**. Campina Grande, PB. 2012.

BOUAZZAMA, B.; XANTHOULIS, D.; BOUAZIZ, A.; RUELLE, P.; MAILHOL, J. C. Effect of water stress on growth, water consumption and yield of silage maize under flood irrigation in a semi-arid climate of Tadla. **Biotechnologie, Agronomie, Société, et Environnement**. Morocco, v. 16, p. 468-477, 2012.

ÇAKIR, R. Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. **Field Crops Research** v. 89, p. 1–16, 2004.

CARVALHO, I. R.; KORCELSKI, C.; PELISSARI, G.; HANUS, A. D.; ROSA, G. M. Demanda hídrica das culturas de interesse agrônomo. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer, Goiânia, v.9, n.17, p. 969, 2013.

CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento safra brasileira grãos**, v. 4 - Safra 2016/17, n. 8, Oitavo Levantamento, Brasília, p. 1-156, 2017.

CONCEIÇÃO, M. A. F. Balanço hídrico em fruteiras. Bento Gonçalves, Embrapa Uva e Vinho. **Circular Técnica**, 82, 2010.

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

CRUZ, J.C.; SILVA, G.H.; PEREIRA FILHO, I.A.; GONTIJO NETO, M.M.; MAGALHÃES, P.C. Caracterização do cultivo de milho safrinha de alta produtividade em 2008 e 2009. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v.9, n.2, p.177-188, 2010.

DANTAS, A. A. A.; CARVALHO, L. G.; FERREIRA, E. Climatic classification and tendencies in Lavras region, MG. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 31, p. 1862-1866, 2007.

DETOMINI, E. R.; MASSIGNAN, L. F. D.; LIBARDI, P. L.; NETO, D. D. Consumo hídrico e coeficiente de cultura para o híbrido DKB 390. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 31, n. 3, p. 445-452, 2009.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Efeito da água no rendimento das culturas. FAO, Irrigação e Drenagem 33, Tradução por: GHEYI, H. R.; SOUZA, A. A.; DAMASCENO, F. A.; MEDEIROS, E. J. F. **Yield response to water**. Campina Grande, UFPB, 306 p., 1994.

DOORENBOS, J., KASSAM, A. H. **Yield response to water**. FAO: Irrigation and Drainage Paper, 33, Rome, 172p., FAO, 1979.

DUARTE, A. P. Manejo da cultura: milho safrinha se consagra e caracteriza um sistema peculiar de produção. In: **Visão Agrícola**. n. 13. p. 78 – 82, 2015.

FABRIS, D. N. **Produtividade de híbridos de milho em diferentes épocas de semeadura, sob irrigação, na safrinha**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2016.

FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. **Produção de Milho**. Guaíba; Porto Alegre: Agropecuária, 360p., 2004.

FIETZ, C. R.; CECCON, G.; COMUNELLO, E.; FLUMIGNAN, D. L.; Época de semeadura do milho safrinha, com base na deficiência hídrica e no risco de geadas, na

região sul de Mato Grosso do Sul. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, **Circular Técnica**, 24, 2013.

FIETZ, C. R.; FISCH, G. F. O clima na região de Dourados, MS. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, **Documentos**, 92, 2008.

FIETZ, C. R.; URCHEI, M. A.; FRIZZONE, J. A. Probabilidade de ocorrência de déficit hídrico na região de Dourados (MS). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30. 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2001.

FLUMIGNAN, D. L.; FIGUEIREDO, L. H. S.; SILVA, J. A.; FIETZ, C. R.; COMUNELLO, E. Evapotranspiração de Referência (ET_0) na Região de Dourados, Mato Grosso do Sul. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, **Comunicado Técnico**, 215, 2016.

FLUMIGNAN, D. L.; ALMEIDA, A. C. dos S.; GARCIA, R. A. Necessidade de Irrigação Complementar da Soja na Região de Mato Grosso do Sul. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, **Circular Técnica**, 34, 2015.

FREITAS, A. A.; BEZERRA, F. M. L.; FONTENELE, F. C. B. Determinação da evapotranspiração máxima e real e do fator sensibilidade ao déficit hídrico da melancia em Canindé, CE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 3, n. 3, p. 298 – 303, 1999.

FRIZZONE, J. A.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; SOUZA, J. L. M. et al. Funções de produção água-cultura. In: _____. **Planejamento de irrigação: análise e decisão de investimento**. Brasília: Embrapa, p. 283-314, 2005.

GARDNER, F. P.; PEARCE, R. B.; MITCHELL, R. L. **Physiology of crop plants**. Ames, Iowa State University Press. 327p, 1985.

GUIA CLIMA. **Estação da Embrapa Agropecuária Oeste - Dourados/MS** Disponível em: http://www.cpa0.embrapa.br/clima/?lc=site/banco-dados/base_dados . Acesso em maio de 2017.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Disponível em: ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Fasciculo_Indicadores_IBGE/estProdAgr_2_01606.pdf Acesso em novembro de 2016.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Sistema IBGE de recuperação automática (SIDRA): banco de dados agregados. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/listabl.asp?c=839&z=p&o=18>. Acesso em setembro de 2016.

JALEEL, C. A.; MANIVANNAN, P.; WAHID, A.; FAROOQ, M.; AL-JUBURI, H. J.; SOMASUNDARAM, R.; PANNEERSELVAM, R. Drought stress in plants: a

review on morphological characteristics and pigments composition. **International Journal of Agricultural Biology**, Faisalabad, v. 11, p. 100-105, 2009.

JENSEN, M. E.; BURMAN, R. D.; ALLEN, R. G. **Evapotranspiration and irrigation water requirements**. New York: ASCE, 360 p., 1990.

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 15, n. 3, p. 259-263, 2006.

LANDAU, E. C.; MAGALHÃES, P. C.; GUIMARÃES, D. P. **Milho: relações com o clima**. Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/milho/arvore/CONTAG01_17_168200_511157.html . Acesso em maio de 2017.

LIMA, M. E.; CARVALHO, D. F.; SOUZA, A. P.; ROCHA, H. S.; GUERRA, J. G. M. Desempenho do cultivo da berinjela em plantio direto submetido a diferentes lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 6, p. 604-610, 2012.

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M. Fisiologia da Produção de Milho. Sete Lagoas. Embrapa, **Circular Técnica** 76. p. 1 – 10, 2006.

MARTIN, F.; VALERO, A. **Agronomia del Riego**. Madri, Mundi – Presa, 732 p., 1993.

MORANDO, R.; SILVA, A. O.; CARVALHO, L. C.; PINHEIRO, M. P. M. A.: Déficit hídrico: efeito sobre a cultura da soja. **Journal of Agronomic Scienses**, Umuarama, v. 3, p. 114 – 129, 2014.

MUNDSTOCK, C. M.; SILVA, P. R. F. da. **Manejo da cultura do milho para altos rendimentos de grãos**. Porto Alegre, Evangraf, 51p., 2005.

NASCIMENTO, F. M.; BICUDO, S. J.; RODRIGUES, J. G. L.; FURTADO, M. B. CAMPOS, S. Productivity of maize genotypes in response to sowing time. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 58, p. 193-201, 2011.

PEGORARE, A. B.; FEDATTO, E.; PEREIRA, S. B.; SOUZA, L. C. F.; FIETZ, C. R.; Irrigação suplementar no ciclo do milho "safrinha" sob plantio direto. Dourados,

MS. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, n.3, p.262–271, 2009.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. Balanço hídrico climatológico. In: **Meteorologia agrícola**. Piracicaba: Lce, cap. 22. p. 92-101, 2007.

FILHO, I. A. P.; CRUZ, J. C. Produção de milho em sistemas irrigados. In: RESENDE, M.; ALBUQUERQUE, P. E. D.; COUTO, L. **A cultura do milho irrigado**. Brasília. p. 205-238, 2003.

PEREIRA, A. R.; MANIERO, M. A.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapotranspiração**. Piracicaba: FEALQ, p. 17-47, 1997.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 188p., 1990.

RENATO, N. S.; SILVA, J. B. L.; SEDIYAMA, G. C.; PEREIRA, E. G. Influência dos métodos para cálculo de graus-dia em condições de aumento de temperatura para as culturas de milho e feijão. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 4, 382-388, 2013.

REZENDE, M. K. A. **Evapotranspiração, seus componentes e coeficientes de cultivo simples (K_C) e dual (K_E e K_{CB}) do milho safrinha para a região de Dourados-MS**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2016.

JÚNIOR, J. L. C. S. **Otimização do uso da água no Perímetro Irrigado Formoso, utilizando a técnica da programação linear**. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

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

SANS, L. M. A.; MORAIS, A. V. C.; GUIMARÃES, D. P. **Embrapa milho e sorgo sistema de produção, zoneamento agrícola**. 2006.

SILVA, A. R. A.; BEZERRA, F. M. L.; FARIAS, C. A. S.; AMORIM, A. V.; CARVALHO, L. C. C.; FILHO, J. V. P. Coeficientes de sensibilidade ao déficit hídrico para a cultura do girassol nas condições do semiárido cearense. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 8, n. 1, p. 38-51, 2014.

SILVA, M. A. V.; FERREIRA, W. P. M.; ANDRADE, V. M. S.; ARAUJO, G. A. Época de semeadura do milho para a região de Sete Lagoas, MG, baseada na probabilidade de ocorrência de períodos secos e chuvosos. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 57, n. 4, p. 454 – 458, 2010.

SILVA, L. L.; COSTA, R. F.; CAMPOS, J. H. B. C.; DANTAS, R. T. Influência das precipitações na produtividade agrícola no Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.13, n.4, p.454-461, 2009.

SILVA, A. C. **Consumo e viabilidade técnica e econômica da cafeicultura irrigada por pivô central**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2009.

SISDAGRO. **Sistema de Suporte à Decisão na Agropecuária**. Disponível em: <http://sisdagro.inmet.gov.br/sisdagro/app/index>. Acesso em junho de 2017.

SOLER, C. M. T.; SENTELHAS, P. C.; HOOGENBOOM, G. Application of the CSMCERES- Maize model for planting date evaluation and yield forecasting for maize grown offseason in a subtropical environment. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 27, p. 165-177, 2007.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Porto Alegre, Artmed, 719 p., 2004.

WAGNER, M. V.; JADOSKI, S.; MAGGI, M. F.; SAITO, L. R.; LIMA, A. S. Corn productivity estimate in function on water availability in Guarapuava, PR, Brazil. **Brazilian Magazine of Agricultural Engineering and Ambient**. 170-179, 2013.

WEISMANN, M. **Fases de desenvolvimento da cultura do milho**. Tecnologia e Produção: milho safrinha e culturas de inverno. 2008.