



ISABELA CRISTINA MARTINS OLIVEIRA

**IRRIGAÇÃO SUBÓTIMA NA CULTURA DO MILHO: EFEITOS NA
PRODUÇÃO DE SILAGEM E GRÃOS NA SEGUNDA SAFRA**

**SETE LAGOAS
2020**

ISABELA CRISTINA MARTINS OLIVEIRA

**IRRIGAÇÃO SUBÓTIMA NA CULTURA DO MILHO: EFEITOS NA
PRODUÇÃO DE SILAGEM E GRÃOS NA SEGUNDA SAFRA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciências Agrárias da Universidade Federal de São João Del-Rei, *Campus* Sete Lagoas, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Ciências Agrárias, na área de concentração em Produção Vegetal.

Orientador: Prof. Dr. João Carlos Ferreira Borges Júnior

Coorientador: Dr. Camilo de Lelis Teixeira de Andrade

**SETE LAGOAS
2020**

Ficha catalográfica elaborada pela Divisão de Biblioteca (DIBIB) e
Núcleo de Tecnologia da Informação (NTINF) da UFSJ,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

O48i Oliveira, Isabela Cristina Martins.
IRRIGAÇÃO SUBÓTIMA NA CULTURA DO MILHO : EFEITOS
NA PRODUÇÃO DE SILAGEM E GRÃOS NA SEGUNDA SAFRA /
Isabela Cristina Martins Oliveira ; orientador João
Carlos Ferreira Borges Júnior; coorientador Camilo
de Lelis Teixeira de Andrade. -- Sete Lagoas, 2020.
92 p.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em
Ciências Agrárias) -- Universidade Federal de São
João del-Rei, 2020.

1. Milho. 2. Integração Lavoura-Pecuária. 3.
Escassez hídrica. 4. Manejo de irrigação. 5. Line
source. I. Borges Júnior, João Carlos Ferreira,
orient. II. Andrade, Camilo de Lelis Teixeira de,
co-orient. III. Título.

ISABELA CRISTINA MARTINS OLIVEIRA

**IRRIGAÇÃO SUBÓTIMA NA CULTURA DO MILHO: EFEITOS NA
PRODUÇÃO DE SILAGEM E GRÃOS NA SEGUNDA SAFRA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciências Agrárias da Universidade Federal de São João Del-Rei, *Campus Sete Lagoas*, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Ciências Agrárias, na área de concentração em Produção Vegetal.

Orientador: Prof. Dr. João Carlos Ferreira Borges Júnior

Coorientador: Dr. Camilo de Lelis Teixeira de Andrade

Sete Lagoas, 06 de março de 2020.

Banca examinadora:

Dra. Rosângela Maria Simeão - Embrapa Milho e Sorgo

Prof. Dr. Cláudio Manoel Teixeira Vitor - UFSJ/CSL

Prof. Dr. João Carlos Ferreira Borges Júnior - UFSJ/CSL
Orientador

Dedico,

A todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, por sempre estar comigo, me dando forças para correr atrás dos meus sonhos, com muita fé e gratidão.

À minha mãe, meu maior exemplo de garra e de determinação! À ela, que sempre me proporcionou liberdade para escolher o caminho a seguir, me apoiando e acreditando em mim.

À minha irmã Isadora, em quem me espelho e com quem aprendi a correr atrás dos meus objetivos e a me dedicar àquilo que almejo. À ela, minha companheira de vida e alma.

Ao meu irmão Paulo, por ser meu grande companheiro e conselheiro.

À minha família, meu maior tesouro, por quem luto hoje e sempre. Vocês fazem parte dessa vitória e de todas que ainda virão.

Aos “Primos do Boga”, meus eternos companheiros, que estão presentes em todos os momentos. Obrigada pela união e amor incondicional.

Aos amigos que, direta ou indiretamente, me apoiaram nessa jornada, sempre com conselhos e, principalmente, muito amor. Em especial à Alice, com quem compartilho anos de amizade e que no mestrado foi minha maior companheira. Obrigada por tudo!

Ao meu orientador, Prof. João, a quem sou eternamente grata por todo aprendizado, ensinamento, paciência e apoio na graduação e, principalmente, no mestrado.

Ao Dr. Camilo, pela confiança depositada na execução deste trabalho, pelos ensinamentos diários e principalmente, pelos conselhos que levarei para a vida.

À Dra. Rosângela, pela disponibilidade, pela paciência e pelos ensinamentos.

À Profa. Ana Paula, que não mediu esforços para me auxiliar, na parte estatística do experimento, sempre com muita paciência e com muito carinho.

À banca examinadora, pela disponibilidade, pelas considerações e contribuições valorosas dadas a este trabalho.

À UFSJ, aos professores e aos funcionários, pela grande oportunidade de crescimento. Vocês são fonte de inspiração.

À Embrapa Milho e Sorgo - Sete Lagoas/MG, por me conceder o suporte necessário para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos funcionários e amigos do NSAM, pelo apoio na condução do experimento, pela troca de experiência, pelos conselhos e pela grande amizade, construída ao longo desses dois anos. Vocês tornaram os momentos de minha estadia na Embrapa, mais leves e divertidos.

À FAPEMIG, pela concessão da bolsa de estudos.

Enfim, agradeço a todos(as) que estiveram presentes nessa etapa! Muito obrigada!

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ANA - Agência Nacional de Águas

C - Consórcio

CAF - Custo anual fixo

CC - Capacidade de Campo

CE - Custo do equipamento

CEMIG - Companhia Energética do Estado de Minas Gerais

CF - Custo Fixo

CM - Custo de manutenção

C-Org - Carbono Orgânico

CT - Custo Total

CV1 - Custo Variável 1

CV2 - Custo Variável 2

DAS - Dias após semeadura

DERAL - Departamento de Economia Rural

ET0 - Evapotranspiração de referência

ETc - Evapotranspiração da cultura

ETpc - Evapotranspiração potencial da cultura

ETrc - Evapotranspiração real da cultura

EUA - Eficiência do uso da água

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations

FRC - Fator de recuperação de capital

FS - Fitomassa seca

i - Taxa anual de juros

IFAG - Instituto para o Fortalecimento da Agropecuária de Goiás

ILP - Integração lavoura-pecuária

IMEA - Instituto Mato-grossense de Economia Agropecuária

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

Kc - Coeficiente de cultura

Ky - Fator de resposta da cultura

L - Lâmina Irrigação

M.O - Matéria Orgânica

n - Vida útil do equipamento, em anos.

PA - Produtividade da água

PA_{irri} - Produtividade da água da irrigação

PMF - Período para maturidade fisiológica

PMP - Ponto de Murcha Permanente

R - Valor residual do equipamento

RB - Receita bruta

RFA - Radiação fotossinteticamente ativa

RL - Receita líquida

SEAB - Secretaria da Agricultura e do Abastecimento

T_{irri} - Total de água aplicada via irrigação

V - Índice de Saturação de Bases

Y_a - Produção de silagem ou grãos

Y_p - Rendimento potencial da cultura

Y_r - Rendimento real da cultura

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características químicas do solo, em amostras da área experimental. Sete Lagoas, 2019.	21
Tabela 2 - Distribuição granulométrica e resultado das análises físico-hídricas do solo, em amostras da área experimental. Sete Lagoas, 2019.	21
Tabela 3 - Coeficiente de cultivo (Kc) do milho nos estádios de desenvolvimento da cultura.	25
Tabela 4 - Exemplo de listagem de valores de referência para o custo variável 1, aplicado a um projeto de irrigação por pivô central para milho consorciado e irrigado de segunda safra.	30
Tabela 5 - Dados de período para maturidade fisiológica (PMF), chuva total, chuva efetiva, ET ₀ e ET _c , para os diferentes níveis de irrigação, no ano de 2018.	32
Tabela 6 - Lâminas de irrigação e respectiva porcentagem em relação à evapotranspiração de referência (%ET ₀ , %), para os diferentes níveis de irrigação, desde o plantio até o ponto de colheita de silagem e grãos, para o ano de 2018.	33
Tabela 7 - Dados de período para maturidade fisiológica (PMF), chuva total, chuva efetiva, ET ₀ e ET _c , para os diferentes níveis de irrigação, no ano de 2019.	34
Tabela 8 - Lâminas de irrigação e respectiva porcentagem em relação à evapotranspiração de referência (%ET ₀ , %) para os diferentes níveis de irrigação, desde o plantio até o ponto de colheita de silagem e grãos, para o ano de 2019.	35
Tabela 9 - Resumo da análise de variância referente aos dados de produtividade de fitomassa fresca e seca (t ha ⁻¹) e produtividade da água (kg m ⁻³) para silagem, no ano de 2018.	35
Tabela 10 - Produtividade de fitomassa fresca e seca de silagem (t ha ⁻¹) em função da proporção da irrigação, em relação à ET ₀ (%), para o ano de 2018.	37
Tabela 11 - Resumo da análise de variância, referente aos dados de produtividade de fitomassa fresca e seca (t ha ⁻¹) e produtividade da água (kg m ⁻³) para silagem, no ano de 2019.	39
Tabela 12 - Produtividade de fitomassa fresca e seca de silagem (t ha ⁻¹) em função da proporção da irrigação em relação à ET ₀ (%), para o ano de 2019.	40
Tabela 13 - Resumo da análise de variância referente aos dados de produtividade (t ha ⁻¹) e produtividade da água (kg m ⁻³) para colheita de grãos (2018).	45
Tabela 14 - Produtividade de grãos (t ha ⁻¹) em função dos níveis de irrigação em proporção da ET ₀ (%) para o ano de 2018.	47
Tabela 15 - Resumo da análise de variância referente aos dados de produtividade (t ha ⁻¹) e	

produtividade da água (kg m^{-3}) para colheita de grãos (2019).....	48
Tabela 16 - Produtividade de grãos (t ha^{-1}) em função dos níveis de irrigação em proporção da ET0 (%) para o ano de 2019.....	49
Tabela 17 - Lâminas de irrigação e respectiva conversão, em tempo, para os diferentes níveis de irrigação, ao longo do ciclo da cultura do milho.	75
Tabela 18 - Receita bruta ($\text{R\$ ha}^{-1}$) para produção de silagem e grãos de milho, em cada nível de irrigação.	76
Tabela 19 - Requerimento de energia e respectivos gastos sazonais com energia, para cada nível de irrigação.	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Área do experimento de silageiras com indicação da estação do INMET.	20
Figura 2 - Croqui do experimento. Sete Lagoas, 2018.	23
Figura 3 - Croqui do experimento. Sete Lagoas, 2019.	24
Figura 4 - Médias diárias das temperaturas máxima, mínima e média, precipitação pluvial e evapotranspiração de referência (ET ₀) ao longo do ciclo da cultura, para o ano de 2018.	31
Figura 5 - Médias diárias das temperaturas máxima, mínima e média, precipitação pluvial e evapotranspiração de referência (ET ₀) ao longo do ciclo da cultura, para o ano de 2019.	33
Figura 6 - Regressão para produtividade de fitomassa fresca de silagem (t ha ⁻¹) em função da lâmina de irrigação, como porcentagem da ET ₀ , para o ano de 2018.	36
Figura 7 - Regressão para produtividade de fitomassa seca de silagem (t ha ⁻¹) em função da lâmina de irrigação, como porcentagem da ET ₀ , para o ano de 2018.	37
Figura 8 - Regressão para produtividade da água (kg m ⁻³) de material para massa seca de silagem em função da lâmina de irrigação, como porcentagem da ET ₀ , em 2018.	38
Figura 9 - Regressão para produtividade de fitomassa fresca de silagem (t ha ⁻¹) em função da lâmina de irrigação, como porcentagem da ET ₀ , para o ano de 2019.	40
Figura 10 - Regressão para produtividade da água (kg m ⁻³) de material para massa seca de silagem em função da lâmina de irrigação, como porcentagem da ET ₀ , em 2019.	41
Figura 11 - Regressão para produtividade de grãos (t ha ⁻¹) em função da lâmina de irrigação, como porcentagem da ET ₀ , para o ano de 2018.	46
Figura 12 - Regressão para produtividade da água (kg m ⁻³) para grãos em função da lâmina de irrigação, como porcentagem da ET ₀ , em 2018.	47
Figura 13 - Regressão para produtividade de grãos (t ha ⁻¹) em função da lâmina de irrigação, como porcentagem da ET ₀ , para o ano de 2019.	49
Figura 14 - Regressão para produtividade da água (kg m ⁻³) para grãos em função da lâmina de irrigação, como porcentagem da ET ₀ , em 2019.	50
Figura 15 - Redução relativa da produtividade [1- (Y _r /Y _m)] em função do déficit relativo de evapotranspiração [1-(ET _r c/ET _p c)] para produção de fitomassa de silagem de milho.	55
Figura 16 - Redução relativa da produtividade [1- (Y _r /Y _m)] em função do déficit relativo de evapotranspiração [1-(ET _r c/ET _p c)] para produção de grãos da cultura do milho.	55
Figura 17 - Regressão para receita líquida (R\$ ha ⁻¹) para produção de silagem de milho em função da lâmina de irrigação (mm).	58
Figura 18 - Regressão para receita líquida (R\$ ha ⁻¹) para produção de grãos de milho em função	

da lâmina de irrigação (mm).....59

SUMÁRIO

RESUMO	I
ABSTRACT	II
1 1 INTRODUÇÃO	3
2 2 REVISÃO DE LITERATURA	5
2.1 Aspectos relacionados à produção de milho	5
2.2 Integração lavoura-pecuária (ILP)	7
2.2.1 Uso de forrageiras do gênero <i>Brachiaria</i> na ILP	8
2.3 Influência das condições meteorológicas na cultura do milho	10
2.4 Irregularidade interanual das chuvas nos períodos de safra.....	11
2.5 Uso da irrigação	13
2.6 Manejo racional de água na irrigação	15
2.7 Aspectos econômico-financeiros da irrigação	16
2.8 Irrigação suplementar	17
2.9 Irrigação subótima.....	17
2.10 Sistema de irrigação <i>line-source</i>	18
2.11 Fator de resposta da cultura (Ky).....	19
3 MATERIAIS E MÉTODOS	20
3.1 Localização e caracterização da área experimental	20
3.2 Manejo de irrigação.....	24
3.3 Coleta dos dados e cálculos.....	26
3.4 Avaliação do fator de resposta (Ky) da cultura do milho	27
3.5 Análise estatística.....	28
3.6 Análise financeira.....	28
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4.1 Variáveis meteorológicas e balanço hídrico	31
4.1.1 Experimento 2018	31
4.1.2 Experimento 2019	33
4.2 Dados produção de silagem	35
4.2.1 Resultados safra 2018	35
4.2.2 Resultados safra 2019	38
4.2.3 Discussão sobre resultados de silagem	41
4.3 Dados produção de grãos	45
4.3.1 Resultados safra 2018	45
4.3.2 Resultados safra 2019	48
4.3.3 Discussão sobre resultados de grãos	50
4.4 Determinação do fator de resposta da cultura do milho (Ky).....	54

4.5	Avaliação da viabilidade financeira do experimento	57
5	CONCLUSÕES	60
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
	APÊNDICE I - Tabelas referentes a análise financeira	75

IRRIGAÇÃO SUBÓTIMA NA CULTURA DO MILHO: EFEITOS NA PRODUÇÃO DE SILAGEM E GRÃOS NA SEGUNDA SAFRA

RESUMO - O milho é uma das principais culturas cultivadas em todo o mundo, sendo amplamente empregado na alimentação humana, animal e matéria-prima para a indústria. Entretanto, a cultura é considerada bastante sensível às oscilações meteorológicas, responsáveis por grandes variações produtivas entre anos de safras. A irrigação subótima vem sendo empregada visando incrementar a eficiência de uso da água. O objetivo com o presente estudo foi avaliar o efeito de diferentes lâminas de irrigação e da integração de duas cultivares de braquiária com a cultura do milho em segunda safra na produtividade de fitomassa para silagem e de grãos e na produtividade da água. Além disso, foi aplicada uma análise financeira quanto ao uso da irrigação subótima. Os experimentos foram conduzidos na estação experimental da Embrapa Milho e Sorgo, durante os anos de 2018 e 2019, abordando a produção de silagem e grãos de milho, consorciado com duas gramíneas forrageiras. Em 2019, o cultivo de milho solteiro também foi considerado. Avaliou-se o efeito de seis níveis de lâmina d'água, a partir do sistema de irrigação por aspersão com distribuição dos aspersores em linha (*Line-Source Sprinkler System*), utilizando um delineamento experimental em blocos casualizados, no esquema em faixas. Foi aplicada uma análise financeira para compor o estudo de identificação da lâmina de água ótima, abrangendo custos de produção e valoração da produção. Não foram verificadas diferenças significativas para a interação entre consórcio e lâmina de irrigação e para o fator consórcio, em ambos os anos. A irrigação subótima não causou queda significativa na produtividade em níveis reduzidos a até 59% da evapotranspiração de referência (ET₀), em ambos os anos, para silagem, e até 48% e 51% da ET₀, nos anos de 2018 e 2019, respectivamente, para grãos, além de acarretar aumento na produtividade da água. Os resultados indicaram a potencialidade do uso da irrigação subótima como estratégia para redução da demanda por recursos hídricos. Além disso, nas condições experimentais do presente estudo, a cultura do milho apresentou baixa a média sensibilidade ao déficit hídrico imposto à planta, com valores gerais do fator de resposta da produção (Ky) de 0,97 e 0,79 para silagem e grãos, respectivamente. Para as produções de silagem e grãos, obteve-se máxima receita líquida de R\$ 4.938,92 ha⁻¹ e R\$ 654,20 ha⁻¹, respectivamente. A viabilidade financeira da irrigação subótima depende, principalmente, do preço de venda da produção e da produtividade da cultura.

Palavras-chave: *Zea mays*. Sustentabilidade. Escassez hídrica. Manejo de irrigação. *Line-source*.

SUBOPTIMAL IRRIGATION IN MAIZE CROP: EFFECTS ON SILAGE AND GRAIN PRODUCTION IN THE SECOND SEASON

ABSTRACT - Maize is one of the main crops grown worldwide, being widely used for food, animal feed and raw material for industry. However, the crop is considered to be very sensitive to weather fluctuations, which is responsible for large variations in production during the years. Suboptimal irrigation is being used to increase water use efficiency. The objective of this study was to evaluate the effect of different irrigation depths and the integration of two brachiaria cultivars with maize in second season crop on the yield of phytomass for silage and grains and on water productivity. In addition, a financial analysis was applied regarding the use of suboptimal irrigation. The experiments were conducted at the experimental station of Embrapa Milho e Sorgo, during the years 2018 and 2019, considering the production of silage and maize grains, intercropping with two forage grasses. In 2019, the cultivation of maize without an intercropping was also considered. The effect of six levels of water depth was evaluated from the *Line-Source Sprinkler System*, using randomized blocks in split-plot as experimental design. A financial analysis was applied to compose the optimal water depth identification study, covering production costs and production valuation. There were no significant differences for the interaction between the crop combination and the irrigation depth and for the crop combination factor in both years. Suboptimal irrigation did not cause a significant decrease in crop yield at levels reduced to up to 59% of reference evapotranspiration (ET₀) in both years for silage and up to 48% and 51% of ET₀ in the years 2018 and 2019, respectively, for grains, besides causing an increase in water productivity. The results indicated the potential use of suboptimal irrigation as a strategy to reduce the demand for water resources. In addition, under the experimental conditions of this study, the cultivation of maize showed low average sensitivity to the water deficit imposed on the plant, with overall values of the production response factor (K_y) of 0.97 and 0.79 for silage and grain, respectively. For silage and grain production it was obtained the maximum net revenues of R\$ 4,938.92 ha⁻¹ and R\$ 654.20 ha⁻¹, respectively. The financial viability of suboptimal irrigation depends mainly on the production selling price and the crop productivity.

Keywords: *Zea mays*. Sustainability. Water scarcity. Irrigation management. *Line-source*.

1 INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays* L.) representa um dos principais cereais cultivados em todo o mundo e é um produto amplamente empregado na alimentação humana, animal e na matéria-prima para a indústria, especialmente em função da quantidade e da natureza das reservas acumuladas nos grãos (FERREIRA, 2009). No Brasil, o milho constitui uma das principais culturas agrícolas, sendo a produção nacional na safra 2018/2019 de aproximadamente 100,046 milhões de toneladas, com estimativa de recuar 1,0% na safra de 2019/20 (CONAB, 2019).

Atualmente, o consumo animal representa cerca de 77% da demanda do milho no Brasil (ABIMILHO, 2019), o qual é utilizado na composição de silagem e de rações, servindo de principal fonte energética na dieta de rebanhos bovinos, caprinos, ovinos, suínos e também na avicultura. O cereal está presente em até 90% da composição de rações utilizadas na suinocultura e na avicultura industriais. Já para a produção de silagem, procedimento cada vez mais empregado na criação de ruminantes, o milho é considerado uma das culturas mais utilizadas, devido às suas características desejáveis, como adequados teores de matéria seca, de carboidratos solúveis e baixo poder tampão, os quais levam a uma adequada fermentação da massa ensilada (SANTOS et al., 2017).

Com a intensificação dos sistemas de produção e uma maior competição por áreas agricultáveis, a adoção de sistemas integrados, como a integração lavoura-pecuária (ILP), permite somar um pacote de tecnologias, as quais devem ser avaliadas e adaptadas a cada propriedade. A possibilidade de se ter em uma mesma área a produção de grãos ou volumosos e ainda a alocação de animais, permitindo altos desempenhos dentro da mesma safra, resulta na maximização do uso de recursos. O cultivo de milho de segunda safra consorciado com espécies de forrageiras tropicais, principalmente as do gênero *Brachiaria* (syn. *Urochloa*), tem-se mostrado muito eficiente para a formação de palha e, ou pasto, sendo promissor em ganhos na produção e produtividade animal (CECCON et al., 2015).

Apesar da cultura do milho se destacar na produção de silagem e de grãos, ela é considerada uma planta bastante sensível às oscilações meteorológicas (BERGAMASCHI e MATZENAUER, 2014). Nos últimos anos, análises da produção agrícola apontam uma grande correlação entre as variações nas safras de milho e as condições meteorológicas. A irregularidade nas condições hídricas, impondo estresse hídrico às plantas, é a que mais afeta a produção das lavouras de milho (BELONI et al., 2018). Segundo Bergamaschi (2006), a planta de milho em condições de déficit hídrico pode ter seu rendimento altamente comprometido,

sendo os estádios de florescimento e de enchimento de grãos considerados os mais críticos da cultura. A magnitude dos efeitos do estresse hídrico está relacionada ao período, à duração e à intensidade de ocorrência deste fator (FANCELLI e DOURADO NETO, 2004).

A utilização da irrigação torna-se uma opção estratégica de grande alcance na busca por melhorias nos níveis de produção, produtividade e qualidade do produto colhido, tendo grande importância socioeconômica, especialmente em regiões agrícolas áridas e semiáridas (ANDRADE, 2009). Entretanto, o uso dessa tecnologia para aumentar a produtividade forrageira e, conseqüentemente, a produção animal, condiciona-se à restrita disponibilidade hídrica e à crescente demanda pelo uso da água nas principais regiões pecuárias de Minas Gerais. Em períodos de escassez hídrica, em que a disponibilidade de água é uma limitação à produção, o manejo da irrigação deve ser baseado na viabilidade técnico-financeira do sistema e no aumento da eficiência no uso da água (KLOCKE et al., 2012). Nesse contexto, uma alternativa é o uso de irrigação subótima, a qual impõe à cultura um nível reduzido de estresse hídrico, que causa um mínimo ou nenhum impacto sobre a produtividade e mantém o retorno econômico da exploração agrícola (FRIZZONE, 2007).

Existem diversos indicadores que podem ser utilizados para se estimar a eficiência no uso da água em sistemas de produção que promovam o uso racional da água e a redução de impactos ambientais, dentre eles, pode-se citar a produtividade da água, que representa o rendimento real da cultura pelo volume de água utilizada na produção. O aumento desse índice pelas culturas agrícolas é a chave para mitigar os efeitos da escassez hídrica, mantendo a produção vegetal com menor emprego de água (MEDRANO et al., 2015). Uma metodologia experimental capaz de avaliar de forma prática a relação entre produtividade e o uso de água pelas plantas é a técnica de *line-source* (HANKS et al., 1980; TAGLIAFERRE et al., 2013; TAGLIAFERRE et al., 2014). O sistema constitui-se de uma linha de aspersores densa e regularmente espaçados entre si, aplicando água em doses decrescentes na direção perpendicular à tubulação e, assim, impondo à cultura diferentes níveis de irrigação.

Outra forma de quantificar o efeito do déficit hídrico sobre a produtividade potencial da cultura é a partir do cálculo do fator de resposta da produção (Ky), o qual é considerado uma medida da sensibilidade da cultura ao déficit hídrico (SILVA et al., 2014).

Assim, visando subsidiar o aprimoramento de sistemas de integração lavoura-pecuária em regiões centrais do Estado de Minas Gerais, o objetivo com o presente estudo foi avaliar o efeito de diferentes lâminas de irrigação e da integração de duas cultivares de braquiária com a cultura do milho, em segunda safra, na produtividade de fitomassa para silagem e de grãos e na

produtividade da água. Além disso, foi aplicada uma análise financeira quanto ao uso da irrigação subótima.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Aspectos relacionados à produção de milho

O milho (*Zea mays* L.) é uma gramínea pertencente à família Poaceae com características alógama, diploide e monocotiledônea, originária da América Central (México). Investimentos em pesquisas e em melhoramento resultaram na sua disseminação em praticamente todos os países do mundo, com condições de clima e manejo distintas (PATERNIANI et al., 2000; WERLE et al., 2011). Devido a sua grande adaptabilidade, representada por múltiplos genótipos, o seu cultivo é possível desde o Equador até o limite das terras temperadas e desde o nível do mar até altitudes superiores a 3.600 metros, sendo encontrado, portanto, em climas tropicais, subtropicais e temperados. Isso permite que o milho seja utilizado como alimento, forragem ou na indústria, principalmente em razão da quantidade e da qualidade das reservas acumuladas nos grãos (BARROS e CALADO, 2014; ALVES et al., 2015).

A produção mundial da cultura do milho atingiu 1,12 bilhão de toneladas na safra de 2018/19 e estima-se uma produção de 1,11 bilhão de toneladas na safra 2019/20. Além disso, o milho também se destaca como o grão mais consumido do mundo, com consumo alcançando de 1,13 bilhão de toneladas. O Brasil é o terceiro maior produtor deste cereal, com uma produção total de 101,0 milhões de toneladas, superado apenas pelos EUA (366,3 milhões de toneladas) e pela China (257,3 milhões de toneladas) (USDA, 2019). A área total de produção é de aproximadamente 17,50 milhões de hectares, considerando a soma da primeira e da segunda safras (CONAB, 2019).

No Brasil, o estado do Mato Grosso é o maior produtor de milho, com uma produção total de 31,24 milhões de toneladas, seguido pelos estados do Paraná (15,84 milhões de toneladas), de Goiás (10,88 milhões de toneladas) e do Mato Grosso do Sul (9,77 milhões de toneladas). O estado de Minas Gerais assume a quinta posição de maior produtor nacional, com uma produção total de 7,30 milhões de toneladas na safra 2018/19 (CONAB, 2019).

Nos últimos anos, a primeira safra de milho exhibe baixa representatividade na oferta total brasileira, o que pode ser explicado pela difícil tarefa de competir com a soja, que detém a preferência dos produtores no período de verão. O protagonismo do milho de segunda safra,

até então denominada de safrinha, foi marcado na safra 2011/12, onde passou a assumir a principal safra de milho do país. A expectativa de produção nacional para a segunda safra 2018/19 é de 73,18 milhões de toneladas, valor muito superior à produção estimada na primeira safra, 25,65 milhões de toneladas (CONAB, 2019).

A importância econômica do milho é caracterizada pelas distintas formas de seu emprego, que vai desde a alimentação animal até a indústria de alta tecnologia. Na realidade, a utilização do milho grão para alimentação animal representa a maior parte do consumo desse cereal, ou seja, aproximadamente 70% no mundo. No Brasil, cerca de 77% da produção é destinada à alimentação animal, sendo os principais setores a avicultura, a suinocultura e a bovinocultura (ABIMILHO, 2019). A produção mundial e nacional de milho tem acompanhado basicamente o crescimento da produção de suínos e aves, devido à demanda pelo cereal, considerado ingrediente importante na composição de rações para esses animais.

Para a pecuária, na criação de ruminantes, em sistemas de produção animal em confinamento, a silagem de milho é o principal alimento volumoso utilizado; nos demais sistemas, ela também pode ser usada durante o período de escassez ou de baixa qualidade de pastagens (PEREIRA et al., 2007). De fato, a silagem de milho é considerada padrão por preencher os requisitos para confecção de uma boa silagem, dentre eles: teor de matéria seca entre 30% a 35%, no mínimo 3% de carboidratos solúveis na matéria original, baixo poder tampão, além de proporcionar boa fermentação microbiana (CRUZ et al., 2001; VON PINHO et al., 2007). Além disso, o cereal confere tradição de cultivo, baixo custo operacional de produção, uma boa aceitabilidade por parte dos animais e ampla oferta de cultivares híbridas no mercado (PAZIANI et al., 2009).

O valor nutritivo da silagem de milho depende de um conjunto de fatores, como a escolha de cultivar híbrida para o plantio, densidade da cultura, condições de crescimento, grau de maturidade e umidade da cultura quando colhida, e as condições de ensilagem (SATTEER e REIS, 2012). Todo o sucesso do plantio reflete na qualidade final da silagem (MELLO e NORNBORG, 2004), sendo necessário considerar a influência dos fatores ambientais e das práticas de manejo, que, juntamente com o genótipo, definem o padrão de desenvolvimento da cultura (ALMEIDA FILHO et al., 1999).

Nos últimos anos, o setor agropecuário passa por muitas transformações, relacionadas especialmente ao aumento nos custos de produção e ao mercado cada vez mais competitivo. A produção intensiva e integrada de grãos, carnes, fibras e energia caracterizam-se como um grande desafio da agricultura atual, traçada a exigência da sociedade por uma produção mais

sustentável nas dimensões econômica, ambiental e social (BALBINO et al., 2011; CECCON et al., 2015). Neste cenário, uma forma de intensificar o sistema de produção, associando o baixo risco da atividade pecuária com a possibilidade de alta rentabilidade da produção agrícola, é a partir da implementação da integração lavoura-pecuária (ILP).

2.2 Integração lavoura-pecuária (ILP)

De acordo com Alvarenga e Noce (2005), o sistema ILP é definido como “a diversificação, a rotação, a consorciação ou a sucessão das atividades de agricultura e de pecuária, dentro da propriedade rural, de forma harmônica, em um mesmo sistema, para que haja benefícios para ambas”. Essa combinação busca efeitos sinérgicos entre os componentes do agroecossistema, agregando diversas tecnologias, como manejo cultural, práticas pecuárias e de conservação do solo e da água, a fim de se ter uma maior sustentabilidade e estabilidade da unidade de produção (BALBINO et al., 2011).

Estudos demonstram que a ILP é uma atividade economicamente lucrativa, tornando-se uma opção viável para investidores do agronegócio (MUNIZ et al., 2007; MACEDO, 2009). Esse sistema apresenta, em sua maioria, vantagens principalmente nas taxas de investimento e no valor presente líquido. É importante buscar uma alta produtividade de ambos componentes (animal ou vegetal) e reduzir os custos de produção, a fim de se tornar economicamente viável, oferecendo menor risco de insucesso econômico, ao longo dos anos (FONTANELI et al., 2000; AMBROSI et al., 2001).

A adoção desse sistema permite que a área seja explorada economicamente durante todo o ano, com a produção de forragem, forragem conservada e grãos destinados à alimentação animal, além da palhada para o plantio direto. Como resultado, pode-se esperar o aumento na produção de leite e de carne, aumentos na taxa de lotação e capacidade de suporte das pastagens, e uma melhor eficiência em todo o sistema produtivo, no que tange ao uso do solo, de máquinas e de mão de obra (CECCON et al., 2015). O sistema ILP apresenta aspectos ambientais superiores à de modernos sistemas de monocultura, os quais são dependentes do emprego externo de agroquímicos (ALLEN et al., 2007).

Entre as culturas empregadas no contexto da ILP, o milho apresenta grande destaque, uma vez que o cereal possui diversas aplicações dentro da propriedade, quer seja na alimentação animal, a partir da produção de grãos ou de forragem verde e, ou conservada, na alimentação humana ou na geração de receita pela comercialização da produção excedente (ALVARENGA

et al., 2006). Nos últimos anos, vem sendo comum o uso do sistema consorciado de milho com forrageiras tropicais, especialmente as do gênero *Brachiaria*.

2.2.1 Uso de forrageiras do gênero *Brachiaria* na ILP

O consórcio de culturas anuais com forrageiras do gênero *Brachiaria* (syn. *Urochloa*) foi desenvolvido na estação das águas, no estado de Goiás, sendo inicialmente definido como Sistema Barreirão e, posteriormente, de Sistema Santa Fé (OLIVEIRA et al., 1996; KLUTHCOUSKI et al., 2000). Ceccon et al. (2005) desenvolveram o consórcio milho-braquiária, em Mato Grosso do Sul, no período de outono-inverno, o qual passou a oferecer grande importância econômica, principalmente nas regiões de Cerrado.

As gramíneas cultivadas do gênero *Brachiaria* (syn. *Urochloa*) destacam-se por sua grande adaptação às distintas condições de solo e de clima, apresentando produção elevada de massa seca, bons valores nutritivos, boa aceitabilidade pelos animais, alta capacidade de suporte animal e boa cobertura do solo (TELES et al., 2011).

A inclusão de forrageiras, como as braquiárias, no consórcio com culturas anuais modifica as propriedades físicas e químicas do solo, promovendo mudanças na sua qualidade. Essas melhorias ocorrem devido às gramíneas forrageiras apresentarem uma maior cobertura do solo e produção de fitomassa de elevada relação C/N, o que permite a cobertura do solo por mais tempo, além do aumento da macroporosidade do solo e capacidade de infiltração (CRUZ et al., 2009; LOSS et al., 2011). Outros benefícios obtidos com o consórcio são a redução de plantas daninhas e um maior retorno econômico na produtividade de lavouras subsequentes, com exemplo da sucessão soja-milho safrinha (BORGHI et al., 2008; CECCON et al., 2015).

Segundo Ceccon et al. (2015), existe uma relação entre a finalidade do consórcio com a espécie forrageira a ser utilizada, o método de implantação e o manejo adotado. Por exemplo, a *Brachiaria ruziziensis* é recomendada quando o consórcio visa a produção de grãos e de palhada. A mesma, juntamente com cultivares de *B. brizantha*, são indicadas quando o objetivo do consórcio é a produção de palha e de pasto, os quais serão empregados na sucessão soja-milho safrinha. Já para a formação de pastagem permanente ou por períodos superiores a 2 anos, recomenda-se cultivares de *B. brizantha*, *B. decumbens* ou *Panicum maximum*.

O consórcio é estabelecido anualmente, em semeadura simultânea ou posterior ao plantio da cultura, cerca de 10 a 20 dias após a sua emergência (KLUTHCOUSKI et al., 2000). É essencial o conhecimento acerca do comportamento de ambas as espécies, introduzidas no

sistema ILP, no que se diz respeito à competição por fatores de produção, evitando, dessa forma, a inviabilidade do cultivo consorciado (KLUTHCOUSKI e AIDAR, 2003). De acordo com Silva et al. (2007), a magnitude dessa competição depende das condições de solo e de clima, das cultivares utilizadas e do manejo empregado. Em situações em que a competição afeta o potencial produtivo da cultura do milho, torna-se necessária a aplicação de subdoses de herbicidas, a fim de se regular o crescimento da forrageira, assegurando o bom rendimento da cultura do milho (JAKELAITIS et al., 2010; DAN et al., 2011). Estudos indicam que a viabilidade do consórcio milho-braquiária depende da variação na taxa de crescimento inicial e de diferentes picos de exigências nutricionais de ambas, possibilitando atender a demanda de cada uma das culturas, sem que haja uma competição desvantajosa (JAKELAITIS et al., 2005).

Sistemas consorciados de milho segunda safra com *Brachiaria* (syn. *Urochloa*) vêm assumindo um importante papel nesse cenário, uma vez que permite a maximização da aplicação de fatores de produção, possibilitando uma maior intensificação e uma maior diversificação de atividades, com ganhos ambientais e menor pressão sobre áreas de fronteira agrícola. Estudos que avaliaram o consórcio entre as duas culturas demonstraram uma boa eficiência na formação de palha e, ou pasto, além de incrementos na produção e produtividade animal. O milho solteiro apresenta uma boa produção de massa seca de resíduos, mas essa produção concentra-se em sua maioria nos colmos, não promovendo boa cobertura do solo (ANDRADE, 1995). Portanto, esse tipo de consórcio favorece a cobertura do solo, uma vez que a forrageira produz massa durante e após a colheita do milho (CECCON et al., 2011), protegendo o solo na entressafra.

Outro fator importante é que, na produção de silagem de milho, um dos principais problemas é a exportação de grande parte da fitomassa, resultando na baixa disponibilidade de palhada para o estabelecimento do plantio direto. Nesse caso, o consórcio com a forrageira torna-se uma alternativa para formação de palhada, após o corte do milho (MENDONÇA, 2012).

Em relação à viabilidade econômica, estudos relatam que sistemas de ILP têm se apresentado como alternativas econômicas/ambientais de produção agrícola bem promissoras, sendo o retorno econômico do milho safrinha consorciado com capins Tanzânia, Marandu e Ruziziensis, maior do que quando comparado ao milho safrinha sem consorciação. Segundo Trecenti et al. (2008), o consórcio de milho com *B. brizantha* cv. Marandu proporcionou um aumento de 27% na rentabilidade da atividade, em relação a lavoura de milho solteiro, demonstrando a viabilidade do sistema em uma propriedade.

Um ponto importante no sistema ILP é que, apesar da importância da gramínea forrageira, o milho deve ser cultivado como se fosse solteiro, principalmente o milho cultivado na segunda safra, buscando altas produtividades de silagem ou de grãos (CECCON et al., 2015). O milho safrinha tem seu potencial produtivo afetado por vários fatores, dentre eles, pode-se citar a instabilidade das condições meteorológicas.

2.3 Influência das condições meteorológicas na cultura do milho

Apesar dos benefícios oriundos do cultivo do milho, reduções drásticas no rendimento podem ocorrer devido a instabilidades climáticas. O entendimento e a quantificação desses riscos climáticos, acerca da produção de milho, deve ser, portanto, o primeiro passo para se estabelecer estratégias de manejo que possam minimizar esses riscos (SILVA et al., 2016).

O milho pertence ao grupo de plantas com metabolismo fotossintético do tipo C4, o qual caracteriza-se por um elevado potencial produtivo (BERGAMASCHI et al., 2004). Entretanto, a cultura é bastante sensível às oscilações meteorológicas, que podem afetar o seu desempenho ainda nas fases iniciais, acarretando diminuição no acúmulo de fitomassa, com reflexos negativos na produtividade de silagem e de grãos (BERGAMASCHI e MATZENAUER, 2014). Os principais fatores que afetam o crescimento e o desenvolvimento do milho são a temperatura, a radiação solar ou a luminosidade e a água (LANDAU et al., 2009). Estes fatores interferem diretamente nas atividades fisiológicas, sendo necessário que os mesmos alcancem níveis considerados ótimos para máxima expressão do seu potencial genético de produção (LANDAU et al., 2009).

Os níveis ótimos de temperatura para o desenvolvimento da cultura do milho variam conforme seu estágio fenológico, sendo a temperatura da planta próxima da temperatura do ambiente que a envolve. Dessa forma, alterações severas interferem diretamente nos processos metabólicos da planta (PEREIRA FILHO e CRUZ, 2003), sendo que temperaturas mais elevadas aceleram o processo metabólico e em períodos mais frios esse metabolismo tende a reduzir. Os limites extremos, tolerados pela planta de milho, situam-se entre 10 °C e 30 °C. Quando se tem longos períodos, com temperaturas abaixo de 10 °C, a planta pode apresentar um crescimento quase nulo. Já em temperaturas noturnas acima de 30 °C tem-se uma redução do rendimento de grãos, devido, principalmente, à senescência precoce das folhas. O cultivo de milho não é recomendável em regiões com temperatura média diária abaixo de 19 °C e noites com temperatura média inferior a 12,8 °C (MAGALHÃES e SOUZA, 2009).

A radiação solar incidente varia de acordo com a posição geográfica de cada local, isto é, com sua latitude e altitude (GARDNER et al., 1985). A eficiência de utilização da radiação solar pelas plantas depende de fatores climáticos, como a temperatura do ar e a disponibilidade hídrica (NASCIMENTO et al., 2011). A radiação incidente fotossinteticamente ativa (RFA) se estabelece na faixa de comprimento de onda de 400 a 700 nanômetros (KUNTZ, 2005). O milho, por ser uma planta C4, apresenta alta eficiência na utilização da radiação solar. Entretanto, a queda de 30% a 40% ou falta dessa radiação pode inibir o processo fotossintético, atrasando a maturação dos grãos e impedindo que a planta atinja o seu máximo potencial produtivo. A maior sensibilidade à variação de luz acontece no início da fase reprodutiva, ou seja, 15 dias após o pendoamento. Além disso, o aproveitamento efetivo de luz pelo milho é determinado pela estrutura da planta, em especial pela distribuição espacial das folhas (LANDAU et al., 2017).

O milho é considerado exigente em relação à necessidade hídrica, sendo que a quantidade de água consumida pela cultura varia de 500 a 800 mm, bem distribuída ao longo do seu ciclo, a fim de se ter um adequado desenvolvimento e produção de grãos (CRITCHLEY e SIEGERT, 1991). Esta exigência de água pela planta de milho varia de acordo com o genótipo utilizado, com o estágio de desenvolvimento e ciclo da planta, e com os fatores ambientais (FANCELLI e DOURADO NETO, 2004). De acordo com Bergamaschi (2004), a cultura do milho é mais sensível ao estresse hídrico nos períodos mais críticos do seu desenvolvimento, que vai do florescimento à maturação fisiológica, devido, principalmente, à expansão foliar, à redução do aproveitamento dos nutrientes do solo e à redução na área fotossintética das plantas (SANTOS e CARLESSO, 1998). Casos de déficit anterior ao embonecamento, fase em que os estilos-estigmas estão visíveis para fora da espiga, podem reduzir a produtividade em 20% a 30%; no embonecamento, em 40% a 50%, e após, em 10% a 20%. A extensão desse período de déficit no ciclo também é um fator importante (FANCELLI e DOURADO NETO, 2000).

Em termos globais, a irregularidade pluviométrica torna o cultivo agrícola de sequeiro uma atividade de alto risco, podendo explicar, em grande parte, as oscilações no desempenho da cultura do milho ao longo dos anos de cultivo.

2.4 Irregularidade interanual das chuvas nos períodos de safra

A combinação de fatores, como altitude, latitude, continentalidade e dinâmica de massas de ar, é essencial para a determinação de condições climáticas locais. Todavia, a combinação

desses elementos pode resultar em efeitos drásticos, já que os eventos meteorológicos extremos são capazes de interferir diretamente nas atividades agrícolas (SOUSA e NERY, 2002). As razões físicas dessa variabilidade são bem complexas e estão relacionadas à circulação atmosférica global. Episódios de fenômenos como El Niño/Oscilação do Sul (ENOS), também denominado por El Niño (fase positiva) e La Niña (fase negativa), os quais são definidos por irregularidade na pressão atmosférica e na temperatura da superfície do mar, na região do Oceano Pacífico Equatorial, estão entre os principais fatores de grande escala responsáveis pelas mudanças na circulação atmosférica, o que provoca a variabilidade interanual da precipitação pluviométrica (NERY, 1998). No caso do Brasil, a intensidade dos eventos pode resultar na escassez de chuvas no norte da Região Nordeste e no leste da Amazônia; por outro lado, causando a abundância de chuvas para as Regiões Sul e Sudeste, na fase positiva (El Niño) do evento. Já na fase negativa (La Niña), esse fenômeno é inverso em ambas as regiões.

As chuvas irregulares causam perdas na produção agrícola ao longo dos anos, tanto pelas chuvas mal distribuídas entre os anos ou meses, como a falta ou excesso de chuva. Entretanto, as principais culturas agrícolas requerem água regularmente, ao longo do ciclo. Por exemplo, embora se observe uma tendência de aumento na produção de milho nas últimas décadas, o rendimento das lavouras exibe significativas oscilações entre safras, sendo o elemento central desta instabilidade a oferta irregular de água, uma vez que a planta necessita de um ambiente regular de chuvas devido à sua fenologia (COUTINHO et al., 2013).

O milho é uma gramínea altamente suscetível ao estresse hídrico e pode ter seu rendimento altamente comprometido. Além da precipitação total sucedida ao longo do ciclo da cultura, estima-se que o aumento no número de dias consecutivos sem chuva apresenta uma alta correlação negativa com o rendimento do milho, principalmente se houver estiagem durante os períodos críticos de desenvolvimento, como o florescimento e a maturação fisiológica (BERGAMASHI et al., 2006). A demanda hídrica da cultura é variável de acordo com a cultivar e também com as condições climáticas do local de cultivo.

O efeito do estresse, determinado pela baixa disponibilidade de água, é bastante complexo, uma vez que as plantas, geralmente, não ficam sujeitas apenas ao déficit hídrico. Na maioria das regiões produtoras de milho, as plantas também estão expostas a altos níveis de irradiação e de temperatura do ar. Esses fatores aumentam a taxa de evapotranspiração, intensificando o efeito da falta de água na planta. Em relação aos períodos de cultivo do milho, o déficit hídrico tem menor impacto na produção do milho de primeira safra, já que, nessa época, o cultivo coincide com o período chuvoso e quente, o que estimula o desenvolvimento

das plantas. Nessas condições, a disponibilidade hídrica frequentemente é alta, com uma boa distribuição pluviométrica, há uma maior disponibilidade de energia pelo aumento da irradiação e as temperaturas médias do ar são mais elevadas. Já no milho de segunda safra, o impacto causado pelo déficit hídrico é maior, pois o cultivo coincide com o final do período chuvoso. Dessa forma, quanto mais tardia for a semeadura do milho, maior será o risco de se ter déficit hídrico durante o desenvolvimento da cultura. Além disso, na segunda safra, ocorre uma redução do fotoperíodo, da irradiação solar e da temperatura do ar, fatores climáticos que também provocam o estresse na planta (SOUZA e BARBOSA, 2015).

Em regiões com limitações hídricas, além da seleção de híbridos ou cultivares de milho mais produtivas e que apresentam boa qualidade de biomassa, é indispensável a identificação de materiais com alta eficiência no uso da água, o que pode aumentar o sucesso da atividade, determinado pela tolerância ao déficit hídrico (SIMÕES et al., 2017). Além disso, na produção de forrageiras, em situações onde a água é o fator limitante ao crescimento das plantas, é possível obter aumento do desempenho produtivo destas, com o uso da irrigação (MENDONÇA e RASSINI, 2009).

2.5 Uso da irrigação

Uma opção de manejo a ser adotada, em condições de limitação hídrica, é o uso da irrigação para auxiliar o equilíbrio de produção vegetal entre as estações seca e chuvosa. A irrigação é uma técnica que tem como objetivo principal reduzir ou anular um déficit total ou parcial de água no solo, que possa afetar o rendimento de uma cultura, resultante da má distribuição das chuvas (RICHTER, 2012).

Entre os mais diversos usos dos recursos hídricos, a irrigação tem grande destaque, especialmente por sua importância socioeconômica, em regiões agrícolas áridas e semiáridas, a exemplo do semiárido brasileiro, onde as altas taxas de evaporação representam uma perda significativa na disponibilidade hídrica, necessária ao crescimento e ao desenvolvimento das espécies (FARIAS et al., 2000). De acordo com dados da Agência Nacional de Águas - ANA (2017), o Brasil possui, aproximadamente, 6,95 milhões de hectares de área irrigada. Esse dado mostra uma evolução da agricultura irrigada, em relação ao Censo Agropecuário realizado em 2006 (IBGE, 2012), que estimou a área irrigada em 4,5 milhões de hectares.

A intensificação da prática da irrigação se torna uma opção estratégica, de grande alcance, na busca por melhorias nos níveis de produção, de produtividade e de qualidade do

produto colhido, além de proporcionar um aumento de renda e de emprego no meio rural e nos setores urbano-industriais, com vínculo, direto ou indireto, no complexo de atividades da agricultura irrigada (LIMA et al., 1999; SILVA et al., 2002). A irrigação pode ser vista como um componente ampliador da disponibilidade de produtos e facilitador de capitalização na agropecuária (TESTEZLAF et al., 2002).

Todavia, na tomada de decisão pelo uso de irrigação, deve-se levar em consideração alguns fatores importantes, principalmente voltados às condições da propriedade e da região, como: quantidade e distribuição da chuva, efeitos da irrigação na produção, necessidade de água pelas culturas e a qualidade e a disponibilidade de água da fonte. Dentre esses fatores, a quantidade e a distribuição das chuvas podem ser consideradas o mais primordial na determinação da necessidade de irrigação em uma região, em relação aos requerimentos hídricos da cultura (ANDRADE e BRITO, 2009).

A irrigação, para a cultura do milho, é considerada economicamente viável quando o fator limitante for a água e o seu preço de venda é favorável, o que permite a minimização de risco e a estabilidade no rendimento (FANCELLI e DOURADO NETO, 2000). No caso das gramíneas forrageiras, a produção está sujeita a grandes variações estacionais, especialmente em regime de sequeiro, quanto à quantidade e à qualidade, em decorrência da sazonalidade natural que impossibilita o crescimento das plantas, em taxa uniforme ao longo do ano (DAHER et al., 2017). A irrigação em forrageiras tem como objetivo, principalmente em períodos de estiagem, estabilizar e intensificar a produção no período das águas, desde que a temperatura e a luminosidade não sejam fatores limitantes. Caso o desenvolvimento da planta forrageira seja limitado pela temperatura ou radiação, a irrigação não surtirá efeito e, dessa forma, não sendo viável seu uso. Entretanto, se a limitação for a disponibilidade hídrica, a irrigação incrementará substancialmente a produtividade. Trabalhos avaliando o comportamento de gramíneas tropicais, sob condições irrigadas, obtiveram respostas controversas, variando conforme a região, a espécie forrageira, o sistema de irrigação e o nível de insumos empregados (SORIA, 2002).

Outro aspecto, que vem ganhando grande importância nos últimos anos, no que se diz respeito ao uso da água na agricultura, é a competição entre usos múltiplos dos recursos hídricos. Em todo o mundo, existe uma crescente competição pelo uso da água, entre diversos setores da sociedade, sendo que o consumo de água na agricultura irrigada é bastante elevado, em relação a outros tipos de uso. Cerca de 70% de toda água doce, disponível no planeta, é utilizada para irrigação e outros fins, no setor de agricultura, gerando um grande impacto na

disponibilidade desse recurso natural (ANA, 2017). A escassez hídrica impacta a oferta de alimentos, energia, saúde e mobilidade.

Por ser um recurso finito, preocupações relacionadas à competição pelo uso da água crescerão de forma proporcional ao aumento de sua demanda pela sociedade. A carência hídrica em algumas regiões e o incremento da área irrigada têm despertado a importância do uso racional da água, a fim de garantir a sustentabilidade hídrica (BENJAMIN et al., 2014).

2.6 Manejo racional de água na irrigação

A irrigação justifica-se como uma tecnologia indispensável ao incremento da produtividade das culturas em regiões inviabilizadas pela exploração agrícola, devido à escassez ou má distribuição das chuvas (MARQUES e FRIZZONE, 2005). Cada vez mais tem-se promovido o emprego de sistemas e de manejos de irrigação que aumentem a eficiência do uso da água, para obter maiores rendimentos, com menores volumes de água (CARLESSO, 2008). O milho é considerado uma planta que demanda muita água, todavia, é uma das culturas mais eficientes no seu uso, ou seja, é capaz de produzir uma grande quantidade de matéria seca por unidade de água absorvida.

Em períodos de escassez, quando a água é uma limitação na produção, o manejo da irrigação deve ser baseado na viabilidade do sistema e não na máxima produtividade (PAZ et al., 2000; BLANCO et al., 2011). O emprego da prática de irrigação, contudo, demanda uma análise criteriosa da viabilidade do projeto, sobretudo os de maior porte, em que devem-se considerar os aspectos agronômicos, ambientais e econômicos (BOGGIONE, 2014). A análise ambiental é realizada em uma escala mais extensa, sendo comumente gerida no âmbito governamental. Por outro lado, a análise econômica se aplica a uma escala menor, sendo necessária uma maior atenção pelo produtor (ANDRADE et al., 2006).

No sistema de produção, é fundamental criar uma relação entre a produtividade das culturas com o volume de água utilizada nesta atividade. Nesse contexto, é definido o conceito de produtividade da água que, no caso da irrigação, pode ser relacionado ao total de água utilizado pela cultura (precipitação + irrigação) ou apenas à água utilizada na irrigação. Esse conceito é empregado para facilitar a tomada de decisão sobre qual a melhor opção econômica, considerando a máxima eficiência técnica do uso da água (PEREIRA et al., 2002). Na cultura do milho, dependendo da produtividade alcançada pela cultura, a produtividade da água, isto é, a quantidade de água aplicada que é “transformada” em peso de grãos, pode atingir patamares

mínimos de até 250 litros de água por kg de grãos secos produzidos (FANCELLI e DOURADO NETO, 2000). Vale ressaltar que, na literatura, alguns autores empregam o termo eficiência do uso da água (EUA) como sinônimo de produtividade da água (PA). Entretanto, há ambiguidades relacionadas ao conceito de EUA, uma vez que o termo pode ser utilizado para a avaliação do desempenho da planta, quando considera-se a razão entre a assimilação e as taxas de transpiração, além de, em certos casos, ser utilizado como sinônimo de eficiência de aplicação de água ou eficiência dos sistemas de irrigação (PEREIRA et al., 2002).

2.7 Aspectos econômico-financeiros da irrigação

Na agricultura irrigada, o principal objetivo econômico deve ser uma produção eficiente e rentável. Assim, é necessário ter um maior conhecimento sobre o grau de risco envolvido na aquisição de novas tecnologias, uma vez que o uso da irrigação implica em custos adicionais ao sistema de produção e, nesses casos, sua viabilidade deve ser analisada, a fim de dimensionar seu risco de implantação (FRIZZONE et al., 1994). Estes riscos, basicamente, decorrem de incertezas econômicas, resultantes de fatores como: variação do preço de venda do produto, taxa de juros, custos da água, vida útil do sistema de irrigação, taxas de manutenção derivadas do manejo do sistema de irrigação e variação na produtividade ao longo dos anos. É fundamental conhecer os fatores de composição dos custos envolvidos, os quais variam especialmente com as condições edafoclimáticas e econômicas de cada região (SILVA et al., 2003).

Associando-se a variação da produtividade da cultura, custos e preços no mercado, é possível estimar o retorno financeiro líquido da atividade de irrigação. Contudo, a análise de sensibilidade deste benefício líquido, determinado pela variação dos fatores listados, direciona na tomada de decisão quanto à implantação do empreendimento agrícola. A agricultura irrigada determina um alto investimento, sobretudo em obras e aquisição de equipamentos, transporte, controle e distribuição de água; além de custos adicionais, como gastos com energia e com mão de obra para operação do sistema, os quais devem ser pagos pelo aumento de produtividade, resultante do fornecimento eficiente de água às plantas, ou seja, pelo uso de irrigação (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO, 2017). Portanto, pode-se afirmar que a irrigação é uma tecnologia que demanda investimentos expressivos, além de estar associada ao emprego intensivo de insumos. Torna-se necessária a análise econômica dos componentes envolvidos no sistema (SILVA et al., 2003). Na agricultura

irrigada, essa análise serve de indicador entre diferentes culturas, entre elas, a cultura do milho.

Com base nos custos e nos riscos envolvidos no sistema de irrigação e, atualmente, com a agravante situação de escassez de recursos hídricos, alguns produtores passam a investir em sistemas de irrigação que proporcionam maior uniformidade de aplicação de água e melhor manejo da lâmina aplicada (MELLO e SILVA, 2009). Comumente, tem-se utilizado a irrigação apenas nas fases fisiológicas mais sensíveis ao déficit hídrico ou em plantios realizados em épocas de menor índice de precipitação (CINTRA et al., 2008).

2.8 Irrigação suplementar

Quando se pensa em manejo utilizando a irrigação suplementar, é considerada a chuva durante o ciclo da cultura. Dessa forma, a irrigação suplementará a chuva efetiva no atendimento da demanda evapotranspirométrica da cultura (FRIZZONE, 2007). Nesse caso, os custos iniciais de implantação são considerados menores quando comparados ao uso de irrigação total, o que torna essa técnica ainda mais viável (CINTRA et al., 2008).

Na irrigação suplementar, o dimensionamento do sistema de irrigação é feito aplicando-se o conceito de precipitação provável, comumente com 75% ou 80% de probabilidade de ocorrência. Em relação ao manejo da irrigação, adota-se uma chuva efetiva (REZENDE e ANDRADE JUNIOR, 2007). Nessas condições, indica-se o uso de algum dispositivo para medir a precipitação ocorrida, em que os valores encontrados são aproveitados para recalcular a lâmina a ser aplicada e, ou estender a data da irrigação. Na área, a aplicação das lâminas após a chuva deverá ser recalculada, considerando o total de precipitação e a evapotranspiração da cultura aferida após a chuva. O manejo adequado, da irrigação suplementar, possibilita a obtenção de elevada economia na aplicação de água e no uso de energia.

2.9 Irrigação subótima

Tanto na irrigação suplementar quanto na irrigação total, pode-se praticar uma irrigação com déficit, também denominada como irrigação subótima, que ocorre quando se projeta atender uma fração da demanda hídrica da cultura (FRIZZONE, 2007), com possibilidade de impacto sobre a evapotranspiração e a produtividade da cultura irrigada. Assim, a redução na produtividade não deve afetar o retorno financeiro do cultivo irrigado (PEREIRA et al., 2012).

As investigações sobre esse tipo de irrigação têm possibilitado um incremento da eficiência do uso da água, já que, com a adoção de estratégias neste sentido, é possível reduzir

a quantidade de água aplicada e, conseqüentemente, gerar um impacto mínimo na produção. Os benefícios potenciais da irrigação subótima são resultantes de três fatores, sendo eles: o aumento da eficiência da irrigação, a redução dos custos de irrigação e o decréscimo dos riscos associados aos impactos ambientais (ENGLISH e NAVAJD, 1996).

A produtividade das culturas é determinada por fatores relacionados ao solo, à planta e à atmosfera, os quais interagem entre si. A relação entre um conjunto específico de fatores, relacionados ao processo produtivo e a sua produtividade final, é definido como fator de resposta da produção ou, simplesmente, função de produção (SILVA, 2009). Dentre os diversos empregos da função de produção, é possível determinar a relação entre as variáveis rendimento da cultura e o suprimento de água. Essas relações podem ser determinadas quantificando, de um lado, a necessidade hídrica da cultura e os efeitos provocados pelo déficit hídrico e, de outro, os rendimentos máximo e real da cultura (ALMEIDA et al., 2013).

Por meio de modelos de produção água-cultura, é possível estimar o rendimento da cultura em razão da água por ela utilizada. Isso tem despertado grande interesse de pesquisas, uma vez que esses modelos podem desempenhar um importante papel na gestão e na otimização de recursos hídricos, principalmente quando se deseja realizar a gestão da irrigação, em condições de déficit hídrico (MARTIN et al., 2012). Nesse caso, considerando o fator água, tem-se estabelecido algumas funções de produção através do uso de irrigação por aspersão em linha (*line-source sprinkler system*) (FARIAS, 2012).

2.10 Sistema de irrigação *line-source*

A técnica *line-source* é aplicável para a avaliação da resposta das culturas ao estresse hídrico, uma vez que é possível quantificar a relação entre a produtividade e o consumo hídrico das plantas (HANKS et al., 1980). Além disso, a metodologia possibilita estimar variáveis dependentes de produção através de variáveis independentes, como, por exemplo, a lâmina de água recebida pela cultura (HANKS et al., 1976).

O sistema *line-source* é composto por uma linha de aspersores, estreitamente espaçados entre si, aplicando-se a água em doses decrescentes na direção perpendicular à tubulação (HANKS et al., 1976; MENDONÇA et al., 1999). Desse modo, ocorre uma variação mínima na quantidade de água, aplicada ao longo da linha. Esse efeito, denominado “Distribuição Triangular da Precipitação” (SILVA, 1990), permite aplicar diferentes lâminas de água e, assim, simular diferentes níveis de irrigação, obtidos por um sistema convencional de aspersão

(ALENCAR, 2007).

A metodologia foi idealizada e posta em prática por Hanks et al. (1976) e sua análise estatística foi abordada pelo mesmo autor e colaboradores (HANKS et al., 1980). Eles definiram que, para uma análise estatística de um experimento no sistema *line-source*, é necessário tomar certos cuidados na interpretação dos resultados. Pelo fato de no experimento não ser possível a aleatorização na lâmina de irrigação, não é possível mensurar o erro experimental para a fonte de variação, relacionada ao tratamento lâmina. Todavia, pode-se aferir os efeitos de interações entre outros fatores e as lâminas de irrigação.

2.11 Fator de resposta da cultura (K_y)

Outra forma de aplicação da função de produção, considerando o efeito do déficit hídrico no solo sobre a produtividade da cultura, é através da quantificação do coeficiente de resposta da cultura ao estresse hídrico, mais conhecido por fator de resposta da produção (K_y), o qual é considerado uma medida da sensibilidade da cultura ao déficit hídrico (SILVA et al., 2014). Esse fator vem recebendo destaque e recomendação pela FAO (ARRUDA e GRANDE, 2003).

Doorenbos e Kassam (1979), seguindo o modelo proposto por Stewart e colaboradores, determinaram os valores de K_y para o ciclo total de várias culturas e para os diferentes estádios de desenvolvimento, através da avaliação de resultados encontrados na literatura. Esses valores baseiam-se em análises de dados experimentais, realizados em condições de campo, os quais abrangem uma ampla faixa de condições de crescimento, além de variedades altamente produtivas, adaptadas ao ambiente de crescimento e desenvolvidas sob nível de manejo adequado (FRIZZONE et al., 2005).

Os valores de K_y são específicos da cultura, podendo variar ao longo da estação de crescimento. Usualmente, a redução no rendimento da cultura devido ao déficit hídrico, ao longo do período vegetativo e da maturação fisiológica, é relativamente baixa, enquanto no decorrer dos períodos de floração e enchimento de grãos, é grande.

Segundo Doorenbos e Kassam (1979), pode-se classificar as culturas em categorias quanto a sua sensibilidade ao estresse hídrico, sendo: baixo ($K_y < 0,85$); baixo/médio ($0,85 < K_y < 1,00$); médio/alto ($1,00 < K_y < 1,15$) e alto ($K_y > 1,15$). Segundo o modelo de Stewart et al. (1977), conhecendo a sensibilidade da cultura ao déficit hídrico, é possível estimar a produtividade de uma cultura em resposta a diferentes quantidades de aplicação de água.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Localização e caracterização da área experimental

Os experimentos foram conduzidos na segunda safra dos anos 2018 e 2019, entre os períodos de 28 de fevereiro a 06 de agosto de 2018 e de 07 de março a 23 de agosto de 2019, em condições de campo, na estação experimental da Embrapa Milho e Sorgo (Figura 1), em Sete Lagoas - MG, Região Metropolitana de Belo Horizonte (19° 27' 20" S, 44° 10' 21" W, a 725 m de altitude). A região apresenta clima tropical, com verões quentes e chuvosos e invernos secos, classificado como Cwa, conforme Köppen (PANOSO et al., 2002). A temperatura média anual, nos últimos 60 anos, é de 22,1 °C. O período chuvoso concentra-se de outubro a março e a estiagem de abril a setembro, sendo a precipitação pluvial média anual de 1.367 mm (FERREIRA e SOUZA, 2011).



Figura 1 - Área do experimento de silageiras com indicação da estação do INMET.
Fonte: Borges Júnior, J.C.F. (2018).

O solo da área foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo, de textura média (PANOSO et al., 2002), cujas análises realizadas em diferentes amostras se encontram nas Tabela 1 e Tabela 2.

Tabela 1 - Características químicas do solo, em amostras da área experimental. Sete Lagoas, 2019.

Camada	pH	M.O*	P	K	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Al ⁺³	H + Al	V*
(cm)	H ₂ O	dag/kg	mg dm ⁻³		cmol _c dm ⁻³				%
0-20	6,0	4,68	49,8	280	7,5	0,8	0,0	6,27	59
20-40	6,1	4,26	11,9	130	6,8	0,7	0,0	6,11	56

* M.O = Matéria Orgânica; V = Índice de Saturação de Bases

Tabela 2 - Distribuição granulométrica e resultado das análises físico-hídricas do solo, em amostras da área experimental. Sete Lagoas, 2019.

Profundidade	Teor de água (g g ⁻¹)		Densidade	C-Org*	Granulometria (%)	
(cm)	PMP	CC	(g cm ⁻³)	(g kg ⁻¹)	Argila	Areia
0-5	0,284	0,378	1,05	2,18	63	19
5-10	0,270	0,366	1,02	2,10	63	22
10-30	0,278	0,374	1,07	1,90	68	20
30-50	0,268	0,362	0,96	1,68	71	13
50-70	0,262	0,352	0,93	1,62	72	13
70-90	0,253	0,340	0,89	1,45	72	14
90-110	0,250	0,329	0,87	1,41	72	14

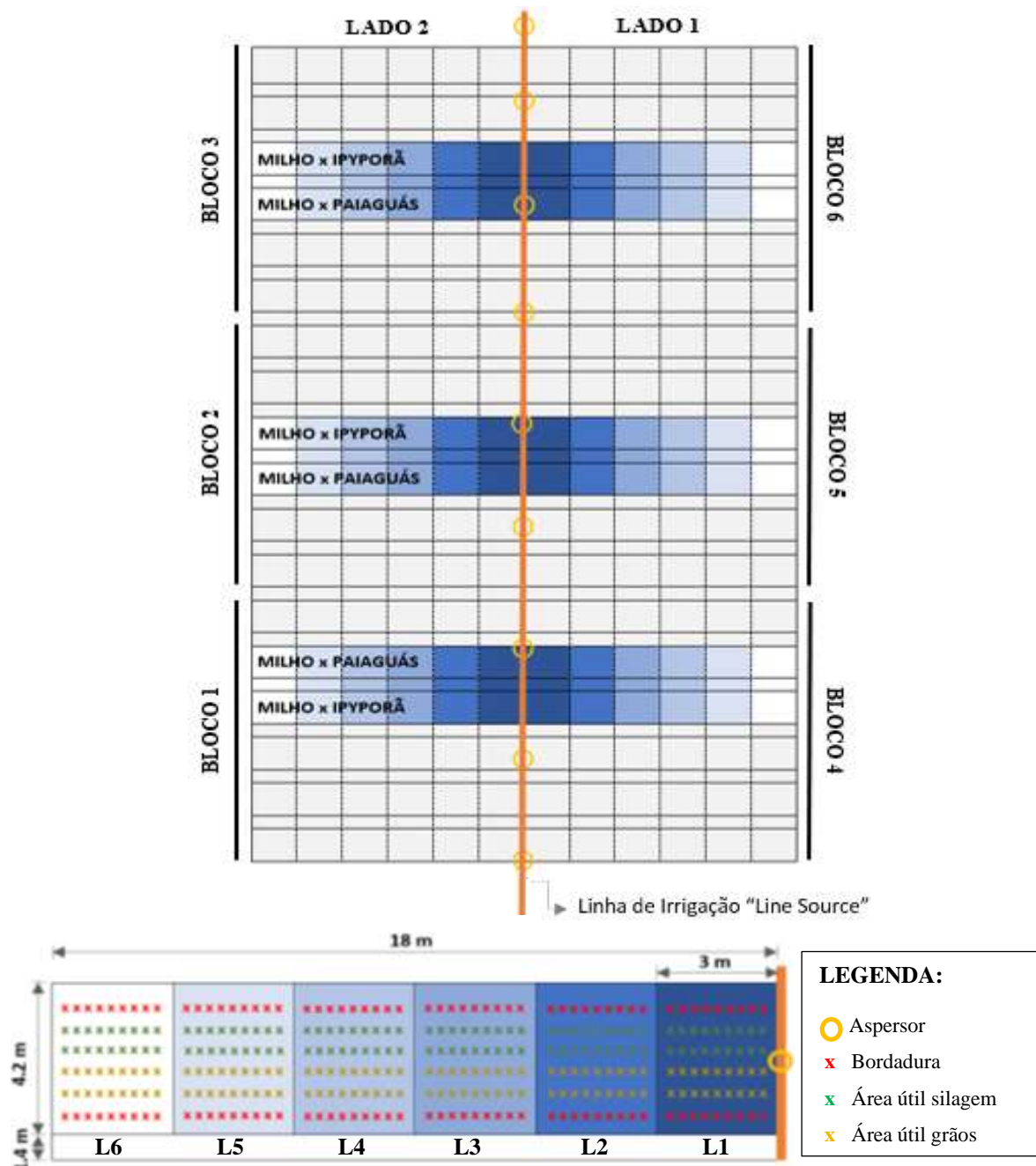
* C-Org = Carbono Orgânico; PMP = Ponto de Murcha Permanente; CC = Capacidade de Campo

A adubação foi realizada segundo a análise de solo e as exigências nutricionais da cultura, conforme a 5ª aproximação das Recomendações para o uso de Corretivos e Fertilizantes em Minas Gerais (RIBEIRO et al., 1999). A adubação de plantio consistiu na aplicação de 08-28-16 + B na dose de 200 kg ha⁻¹. A adubação de cobertura (300 kg ha⁻¹ de Ureia) foi realizada no estádio V4 da planta de milho. Os manejos de pragas, doenças, plantas daninhas e outras práticas agrícolas foram realizados segundo recomendado para o milho (GALVÃO et al., 2015).

Os experimentos foram conduzidos segundo delineamento em blocos casualizados, no esquema de faixas, sendo a parcela constituída pelas combinações de culturas e a subparcela por seis níveis de lâminas de irrigação, sendo arranjadas em faixas, seguindo a configuração experimental de irrigação por aspersão em linha ou *line-source* (HANKS et al., 1980). No experimento de 2018, o delineamento apresentou seis repetições e duas combinações (milho consorciado com duas gramíneas). Já no ano de 2019, utilizou-se oito repetições e três combinações (milho solteiro e milho consorciado com duas gramíneas).

Empregou-se o híbrido simples de milho AG8088Pro2 como cultura principal e duas gramíneas forrageiras em consórcio na linha: *Brachiaria brizantha* (syn. *Urochloa brizantha*), BRS Paiaguás e *Brachiaria* híbrida (syn. *Urochloa* híbrida), BRS Ipyporã. Por terem sido desenvolvidas recentemente pela Embrapa, em parceria com outras instituições, estudos são demandados especialmente quanto aos efeitos do estresse hídrico e à resposta ao uso da irrigação na produtividade. Apresentam grande acúmulo de forragem de melhor valor nutritivo, resultando em maiores ganhos de peso por animal e por área. Podem ser utilizadas para produção de forragem de outono-inverno e, ou de palhada para plantio direto (EMBRAPA, 2019).

Os ensaios foram instalados sob semeadura direta, em 28 de fevereiro de 2018 e em 07 de março de 2019, sendo a semeadura do milho realizada de forma mecanizada e a semeadura das gramíneas forrageiras realizada manualmente, nas mesmas linhas do milho, com sementes distribuídas na profundidade média de 2 cm. Os consórcios foram estabelecidos anualmente. Na safra de 2018, o espaçamento do milho foi de 0,70 m, entre fileiras, e a população final foi de 90 mil plantas por hectare; as subparcelas consistiram em seis fileiras de 3 m de comprimento, com área de 12,6 m² (Figura 2). As duas linhas externas foram deixadas como bordadura; duas fileiras centrais foram selecionadas para avaliação de silagem e as outras duas para determinação da produção de grãos.



Obs.: Áreas plantadas não consideradas no experimento foram destacadas em cinza

Figura 2 - Croqui do experimento. Sete Lagoas, 2018.

Na safra de 2019, o espaçamento do milho foi de 0,70 m, entre fileiras, e a população final foi de 90 mil plantas por hectare; as subparcelas consistiram em sete fileiras de 3 m de comprimento, com área de 14,7 m². As duas linhas externas e uma central foram deixadas como bordaduras, com o objetivo de evitar a influência de fatores externos na área útil; duas fileiras centrais foram selecionadas para avaliação de silagem e as outras duas fileiras centrais para determinação da produção de grãos (Figura 3).

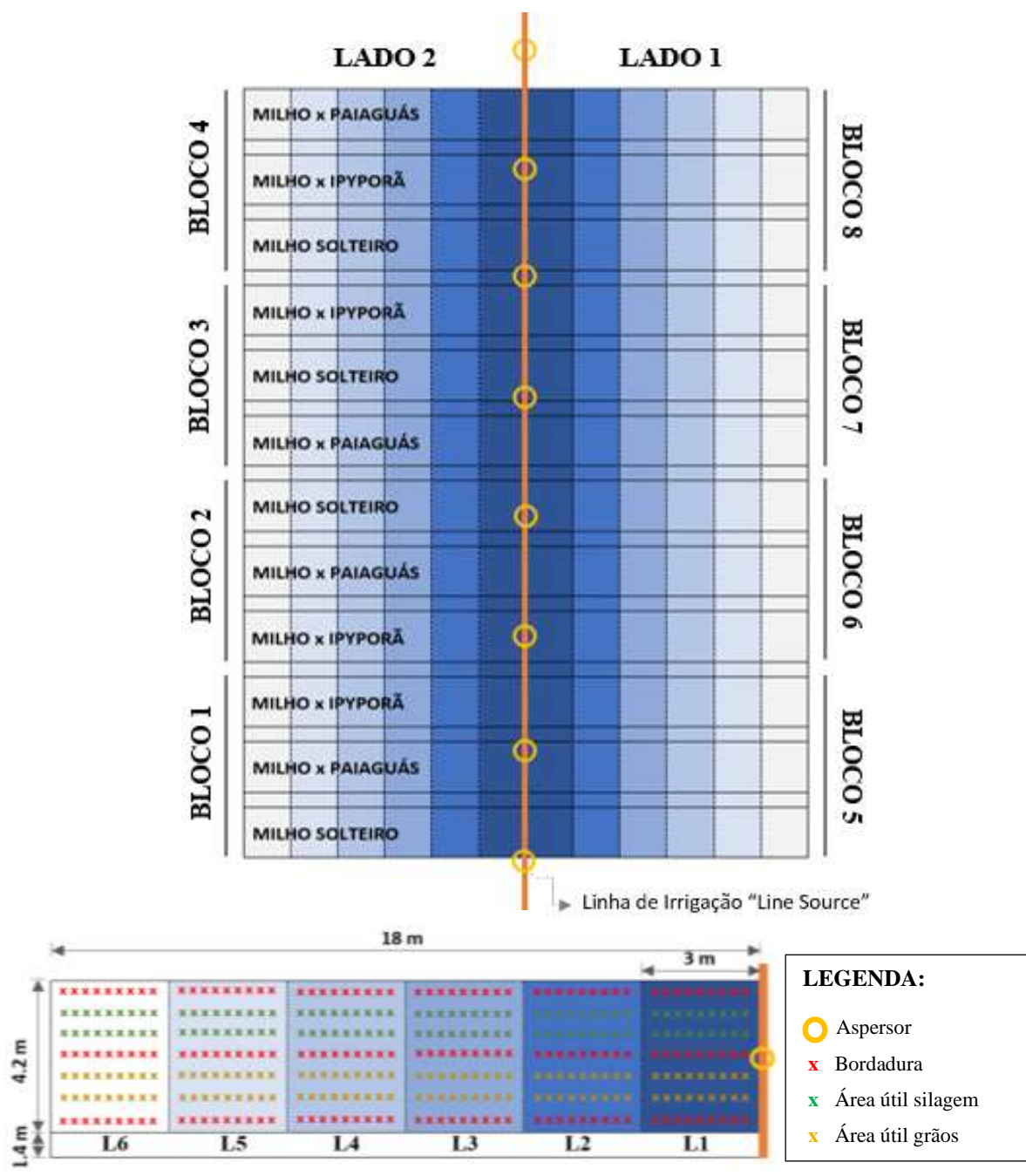


Figura 3 - Croqui do experimento. Sete Lagoas, 2019.

3.2 Manejo de irrigação

O sistema de irrigação por aspersão foi constituído por três linhas laterais, espaçadas de 18 metros, contendo aspersores Rain Bird modelo 14070 com alcance de 18 m, espaçados de 12 m. A área experimental foi irrigada com as três linhas laterais até o dia 02 de abril nos experimentos de 2018 e de 2019, para auxiliar no estabelecimento da cultura. Após esse período, a área passou a ser irrigada com apenas a linha lateral central, caracterizando um

sistema de irrigação tipo *line-source*. Este arranjo possibilita um gradiente decrescente de lâmina de irrigação, aplicada perpendicularmente à linha lateral central de irrigação.

Utilizaram-se dados de temperatura do ar, de umidade relativa, de radiação solar e de velocidade do vento, da estação meteorológica do INMET, adjacente à área do experimento, para cálculo da evapotranspiração de referência (ET₀), empregando-se o método FAO Penman-Monteith, conforme Allen et al. (1998). Valores de coeficiente de cultivo (K_c) da cultura do milho (Tabela 3) foram obtidos na mesma publicação. A evapotranspiração da cultura (ET_c) e a chuva subsidiaram o manejo da irrigação, com base no balanço hídrico diário. A chuva efetiva também foi registrada. A lâmina de irrigação total, para suprir plenamente o saldo do balanço hídrico, foi associada às parcelas experimentais localizadas adjacentes de cada lado da linha central de irrigação.

Tabela 3 - Coeficiente de cultivo (K_c) do milho nos estádios de desenvolvimento da cultura.

Cultura	Estádios de desenvolvimento da cultura		
	Inicial	Médio	Final
Milho (<i>Zea mays</i> L.)	0,91	1,23	0,35

Para designar regiões de aplicação de diferentes níveis de irrigação (faixas), consideraram-se as seguintes distâncias em relação à linha de irrigação, no centro da área: 0 a 3 m para L1, 3 a 6 m para L2, 6 a 9 m para L3, 9 a 12 m para L4, 12 a 15 m para L5 e 15 a 18 m para L6, em que L1 a L6 representam lâminas decrescentes. As lâminas foram quantificadas ao final de cada irrigação, por meio de coletores instalados no centro de cada bloco, sendo, posteriormente, acumuladas até as datas de colheita de material para silagem e de grãos. Foram calculadas as proporções entre valores acumulados de lâminas de irrigação em relação à ET₀ acumulada até a maturidade fisiológica, referente a lâmina L1. Estas proporções foram utilizadas como variáveis independentes na análise estatística, ou seja, como níveis do fator irrigação. Considerou-se a possibilidade de ocorrência de assimetria em relação aos lados da linha lateral, especialmente em decorrência das variações na velocidade e direção do vento durante as irrigações. Assim, três e quatro blocos, nos anos de 2018 e 2019, respectivamente, foram dispostos em cada lado da linha central de irrigação.

3.3 Coleta dos dados e cálculos

Nessa etapa, apenas a cultura do milho foi colhida, sendo que as gramíneas forrageiras foram destinadas à formação de palhada e, ou pastagem. Por ocasião do ponto de ensilagem, quando os grãos de milho apresentaram aspecto pastoso a farináceo ($\frac{3}{4}$ da linha de leite), em cada nível de irrigação, foram coletadas duas fileiras de cada unidade experimental. O corte das plantas foi realizado à altura 10 cm da superfície do solo. O material cortado foi pesado em campo para determinar o peso verde total. Posteriormente, foi picado utilizando um triturador forrageiro, formando partículas de tamanho médio teórico de dois a três centímetros. Uma amostra de 10 plantas, de cada parcela, foi coletada e enviada para análise em bancada. Para determinação da porcentagem de fitomassa seca (FS), após o material ter sido homogeneizado, foi retirada uma amostra de aproximadamente 1,0 kg, que foi submetida à secagem em estufa de ventilação forçada a 65 °C até sua estabilização ou peso constante.

Por ocasião da maturidade fisiológica do milho, quando, para cada nível de irrigação, o cultivo atingiu esse ponto, outras duas fileiras de cada unidade experimental foram colhidas, para determinação do rendimento de grãos. As plantas inteiras foram pesadas em campo, para estabelecer o peso verde total e, posteriormente, foi determinado o peso dos grãos em condições de colheita e a umidade de grãos. Para o cálculo do rendimento, o peso dos grãos foi corrigido para 13% de umidade.

O cálculo de produtividade da água (PA) seguiu a análise proposta por Pereira et al. (2009), a qual é definida como a razão entre a produção atingida pela cultura, expressa em massa seca, e a quantidade de água utilizada ao longo do ciclo. No presente estudo, foi considerado apenas o uso da água da irrigação, sendo a produtividade da água da irrigação (PA_{irri}) dada pela Equação 1:

$$PA_{\text{irri}} = \frac{Y_a}{T_{\text{irri}}} \quad (1)$$

em que:

Y_a = produção de silagem ou grãos, em kg; e

T_{irri} = total de água aplicada via irrigação, em m³.

3.4 Avaliação do fator de resposta (K_y) da cultura do milho

A fim de se investigar os efeitos do déficit hídrico sobre a produtividade do milho de segunda safra, determinou-se o fator de resposta da produção (K_y , adimensional) para a cultura, considerando-se a produção para silagem e de grãos. A partir do presente estudo, buscou-se contribuir para maiores informações acerca da cultura do milho, sabendo que há pouca disponibilidade de trabalhos sobre K_y , nas condições brasileiras. A análise foi realizada a partir dos dados obtidos no próprio experimento.

Para se estimar a quebra na produtividade (lado esquerdo da Equação 2), em resposta ao estresse por déficit hídrico ao longo do ciclo da cultura, foi utilizada a seguinte função de produção (ALLEN et al., 1998):

$$\left(1 - \frac{Y_r}{Y_p}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET_{rc}}{ET_{pc}}\right) \quad (2)$$

em que:

Y_r = rendimento real da cultura (fitomassa para silagem ou grãos), em $t\ ha^{-1}$;

Y_p = rendimento potencial da cultura (fitomassa para silagem ou grãos), em $t\ ha^{-1}$;

ET_{rc} = evapotranspiração real da cultura acumulada para o ciclo, em mm; e

ET_{pc} = evapotranspiração potencial da cultura acumulada para o ciclo, em mm.

Os valores de Y_r foram determinados para cada subparcela, ao final do ciclo da cultura. Considerou-se Y_p como o valor máximo de produtividade, em cada subparcela, obtida nos dois anos de experimento. A ET_{rc} foi estimada pelo somatório da chuva efetiva e pela lâmina média de irrigação, para cada tratamento. Calculou-se a ET_{pc} com base na soma de evapotranspiração potencial, para os respectivos tratamentos, obtida ao longo do ciclo da cultura, para cada safra.

Para a obtenção da função de produção, utilizou-se a análise de regressão, relacionando a variável dependente “quebra na produtividade” com a variável independente “déficit relativo de evapotranspiração” $\left(1 - \frac{ET_{rc}}{ET_{pc}}\right)$, para os dois anos de experimento (2018/2019). Obteve-se então, o valor de K_y , para todo o ciclo, como o coeficiente angular dessa reta (Equação 2). Segundo Stewart e Hagan (1973), os dados analisados precisam ser ajustados a uma equação de regressão linear, passando pela origem. Valores negativos e, portanto, inconsistentes, de déficit relativo de evapotranspiração foram convertidos para zero. Observa-se que esta correção foi necessária apenas para silagem em 5,6% dos casos.

3.5 Análise estatística

Os dados coletados foram submetidos à análise de variância para determinação dos fatores que atuam de maneira significativa sob as variáveis em estudo. As pressuposições de normalidade e homocedasticidade das variâncias residuais do modelo foram verificadas pelos testes de Lilleford e Levene, respectivamente. Para o fator qualitativo consórcio de culturas, as diferenças foram verificadas pelo teste F e para a lâmina de irrigação, utilizou-se a regressão. Em relação ao fator irrigação, a comparação de médias foi também realizada utilizando-se o teste de Tukey, tendo a finalidade de identificar diferenças não estatisticamente significativas. As análises estatísticas foram realizadas no software R 3.5.2 (2018), considerando-se o nível de 5% de significância.

3.6 Análise financeira

O estudo envolveu a análise financeira aplicada a um projeto hipotético de sistema irrigado, típico quanto a condições regionais, em que foram levados em conta os benefícios e os custos sucedidos, na área irrigada analisada, considerando-se a cultura milho. A análise, baseou-se em condições similares às verificadas no interior do estado de Minas Gerais, utilizando o sistema de pivô central em uma configuração padrão da região, com 400 m de comprimento, resultando em uma área de cerca de 50 ha por equipamento, para cultivo de milho de segunda safra ou plantado em fevereiro.

Foi feita a avaliação da receita líquida alcançável nas condições do precedente do experimento, ponderando a média dos dois anos de experimento. Assim, foi necessário o conhecimento das variáveis que a compõem (FRIZZONE e ANDRADE JUNIOR, 2005), relacionadas na Equação 3.

$$RL = RB - CT \tag{3}$$

em que:

RL = Receita Líquida, em R\$ ha⁻¹;

RB = Receita Bruta, em R\$ ha⁻¹; e

CT = Custo Total, em R\$ ha⁻¹.

A multiplicação da produtividade agrícola ($t\ ha^{-1}$) pelo preço unitário ($R\$\ t^{-1}$), gera a receita bruta anual. Dessa forma, essa receita foi calculada considerando a produtividade total de silagem e de grãos no experimento, e o preço desses produtos no mercado local. Para a produção de silagem, considerou-se 15% de perdas de silagem, comuns do processo.

O custo total é composto por custos fixos e variáveis (Equação 4). Os custos fixos referem-se aos investimentos em um sistema de irrigação, no caso pivô central, elementos referentes à infraestrutura e à rede elétrica (componentes do sistema elétrico). Já os custos variáveis foram agrupados em duas categorias: custo variável 1 (CV1), compreendendo os insumos (sementes, defensivos e adubos), as operações mecanizadas e a mão de obra; e custo variável 2 (CV2), relativo ao custo operacional da irrigação.

$$CT = CF + CV1 + CV2 \quad (4)$$

em que:

CT = Custo Total, em $R\$\ ha^{-1}$;

CF = Custo Fixo, em $R\$\ ha^{-1}$;

CV1 = Custo Variável 1, em $R\$\ ha^{-1}$; e

CV2 = Custo Variável 2, em $R\$\ ha^{-1}$.

O custo fixo (Equação 5) foi composto pelo custo de manutenção (CM), definido como 1% do custo do equipamento (CE), e custo anual fixo (CAF), calculado por meio da Equação 6. Estimou-se que, ao longo do ano, seria possível se implantar pelo menos duas lavouras sob o pivô central, sendo o CF dividido por dois. Para o ano de 2019, apurou-se o custo médio de implantação de um pivô central, em revendas no interior do estado de Minas Gerais, igual a $R\$ 10.800,00\ ha^{-1}$, incluindo conjunto motobomba, tubulações e acessórios. Todavia, por possíveis incertezas em relação ao preço estimado, considerou-se um valor de C, igual a $R\$ 12.000,00\ ha^{-1}$, e, para cálculo do CAF, um valor residual do equipamento (R), equivalente a 10% de C.

$$CF = \frac{CM + CAF}{2} \quad (5)$$

$$CAF = (C - R) FRC \quad (6)$$

em que:

CF = Custo Fixo, em R\$ ha⁻¹;

CM = Custo de Manutenção, em R\$ ha⁻¹;

CAF = Custo Anual Fixo, em R\$ ha⁻¹;

C = Valor do Investimento, em R\$ ha⁻¹;

R = Valor Residual do Equipamento, em R\$ ha⁻¹, ao final do período de vida útil; e

FRC = Fator de Recuperação de Capital, adimensional, calculado por meio da seguinte equação:

$$FRC = \frac{(1+i)^n \cdot i}{(1+i)^n - 1} \quad (7)$$

em que:

i = Taxa Anual de Juros, em decimal; e

n = Vida Útil do Equipamento, em anos.

Considerando uma taxa de juros (i) igual a 10% ao ano e uma vida útil de 10 anos, obtém-se um FRC igual a 0,1627. É importante ressaltar que a taxa de juros, simulada pelo financiamento do PRONAMP (BNDES, 2019), foi prefixada em 7% ao ano. Porém, decidiu-se utilizar uma taxa mais elevada (10% ao ano), caracterizando uma abordagem mais conservadora, na análise do investimento.

Em relação custo variável 1 (CV1), os valores de referência (Tabela 4) foram coletados em revendas de Sete Lagoas e região e em planilhas de custos de produção, do IMEA, da SEAB/DERAL e do IFAG, referentes ao ano de 2019.

Tabela 4 - Exemplo de listagem de valores de referência para o custo variável 1, aplicado a um projeto de irrigação por pivô central para milho consorciado e irrigado de segunda safra.

Colheita	Mês	Mão-de-obra e Máquinas	Sementes	Defensivos	Fertilizantes	Total
Silagem	7	630,85	1044,00	284,62	628,81	2588,28
Grãos	9	780,46	1044,00	297,64	628,81	2750,91

Já o custo variável 2 (CV2), representa os custos operacionais de irrigação, os quais envolvem a energia demandada pelo bombeamento, que varia de acordo com o produto da potência do conjunto motobomba pelo tempo de funcionamento. Dados padrões, utilizados na região, serviram de referência para a conversão, em tempo, da lâmina aplicada, referente à

encontrada no presente estudo, detalhada no Apêndice I (Tabela 17). Utilizou-se a área referente ao pivô central, de 50 ha, sendo necessárias 9 horas para uma volta completa, com aplicação de 4 mm de lâmina d'água.

Considerou-se a potência operacional de 100 cv para o conjunto motobomba. Multiplicando-se o tempo total de funcionamento (no ciclo) pela potência da bomba, foi obtido o requerimento de energia durante o ciclo numa área de 50 ha, para posterior cálculo do gasto sazonal com energia por hectare. A energia na propriedade é fornecida pela Companhia Energética do Estado de Minas Gerais (CEMIG), a qual se enquadra no perfil de tarifa horosazonal verde. O valor deste enquadramento fora de ponta, tanto para estações seca quanto para chuvosa, é de R\$/kWh 0,47753 (CEMIG, 2019).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Variáveis meteorológicas e balanço hídrico

4.1.1 Experimento 2018

Os resultados das médias diárias das variáveis meteorológicas temperatura máxima, mínima e média do ar, precipitação e evapotranspiração de referência estão apresentados na Figura 4.

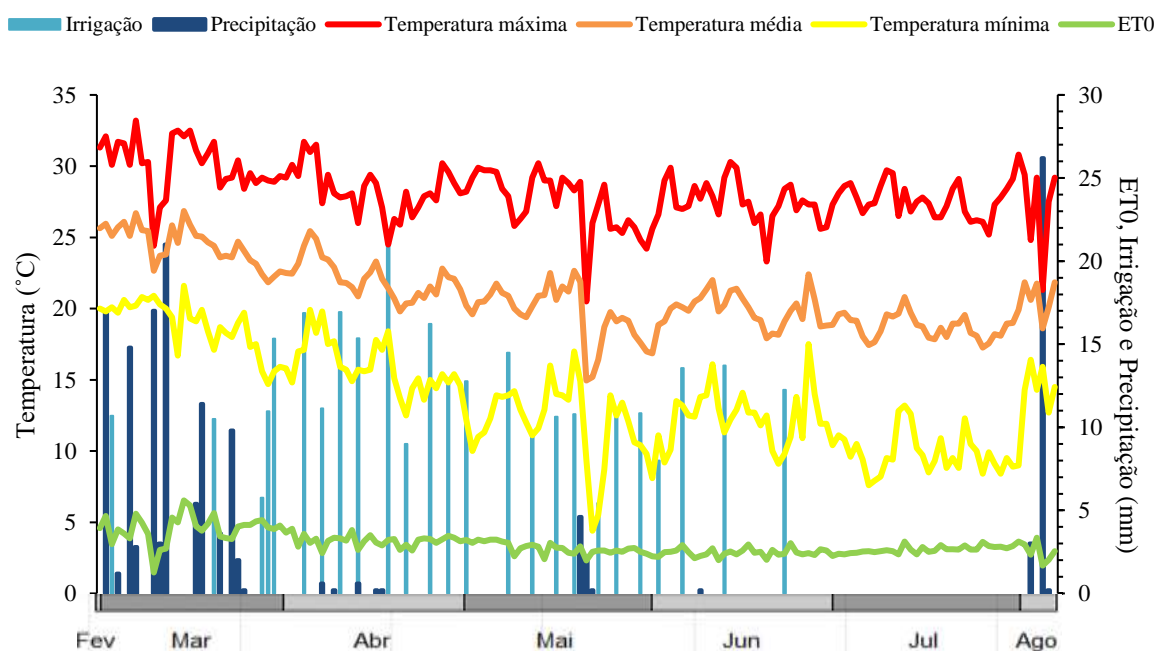


Figura 4 - Médias diárias das temperaturas máxima, mínima e média, precipitação pluvial e evapotranspiração de referência (ET0) ao longo do ciclo da cultura, para o ano de 2018.

A temperatura média do ar, durante o ciclo da cultura, foi de 21,0 °C, sendo a média máxima de 28,2 °C e a média mínima de 13,8 °C (Figura 4). A ET0 atingiu um máximo de 6,5 mm e um mínimo de 1,5 mm, ambos no mês de março de 2018. A ET0 totalizou 400 mm do plantio à colheita de silagem (108 DAS) e 554 mm até a maturação dos grãos. Já a ETc acumulada, considerando as parcelas com irrigação plena, foi de 426 mm no ponto de ensilamento e de 565 mm na maturidade fisiológica dos grãos.

A precipitação observada até o dia do ponto de ensilagem foi de 118 mm, sendo de 148 mm até a maturidade fisiológica dos grãos. Já a chuva efetiva, calculada com base na chuva total, menos as perdas por escoamento superficial e a percolação profunda e a variação de umidade no solo (ALBUQUERQUE e ANDRADE, 2001), totalizou 83 mm até o ponto de ensilagem e 112 mm até a maturação dos grãos. A quantidade de chuva, ocorrida ao longo do ciclo da cultura, foi inferior à precipitação média histórica, para o período de condução do experimento (fevereiro a agosto). Além disso, a chuva foi mal distribuída, ocorrendo eventos de precipitação superior a 20 mm diário, nos dias 11 de março e 04 de agosto, e longos intervalos entre precipitações. Essa quantidade de chuva não foi suficiente para suprir a demanda hídrica da cultura do milho, que varia de 500 a 800 mm, quando bem distribuída ao longo do ciclo (CRITCHLEY e SIEGERT, 1991).

Na Tabela 5 apresenta-se a duração dos períodos da semeadura até a maturidade fisiológica e os valores de chuva total, de chuva efetiva, de ET0 e de ETc, para os diferentes níveis de irrigação.

Tabela 5 - Dados de período para maturidade fisiológica (PMF), chuva total, chuva efetiva, ET0 e ETc, para os diferentes níveis de irrigação, no ano de 2018.

Nível de irrigação	PMF (DAS*)	Chuva (mm)	Chuva efetiva (mm)	ET0 (mm)	ETc (mm)
L1	159	148	112	554	565
L2	159	148	112	554	565
L3	155	121	86	542	561
L4	148	118	83	520	549
L5	139	118	83	490	528
L6	139	118	83	490	528

*Dias após semeadura

As lâminas de irrigação, coletadas de acordo com os tratamentos avaliados, acumuladas até o corte para produção de silagem e produção de grãos, foram expressas em termos de porcentagens em relação à ET0, conforme a Tabela 6.

Tabela 6 - Lâminas de irrigação e respectiva porcentagem em relação à evapotranspiração de referência (%ET₀, %), para os diferentes níveis de irrigação, desde o plantio até o ponto de colheita de silagem e grãos, para o ano de 2018.

Nível de irrigação	Silagem		Grãos	
	Lâmina de irrigação (mm)	%ET ₀	Lâmina de irrigação (mm)	%ET ₀
L1	377,0	94	421,6	76
L2	309,1	77	348,0	63
L3	235,8	59	264,6	48
L4	172,9	43	193,0	35
L5	104,7	26	113,0	20
L6	42,7	11	43,8	8

4.1.2 Experimento 2019

Os resultados das médias diárias das variáveis meteorológicas temperatura máxima, mínima e média do ar, precipitação e evapotranspiração de referência estão apresentados na Figura 5.

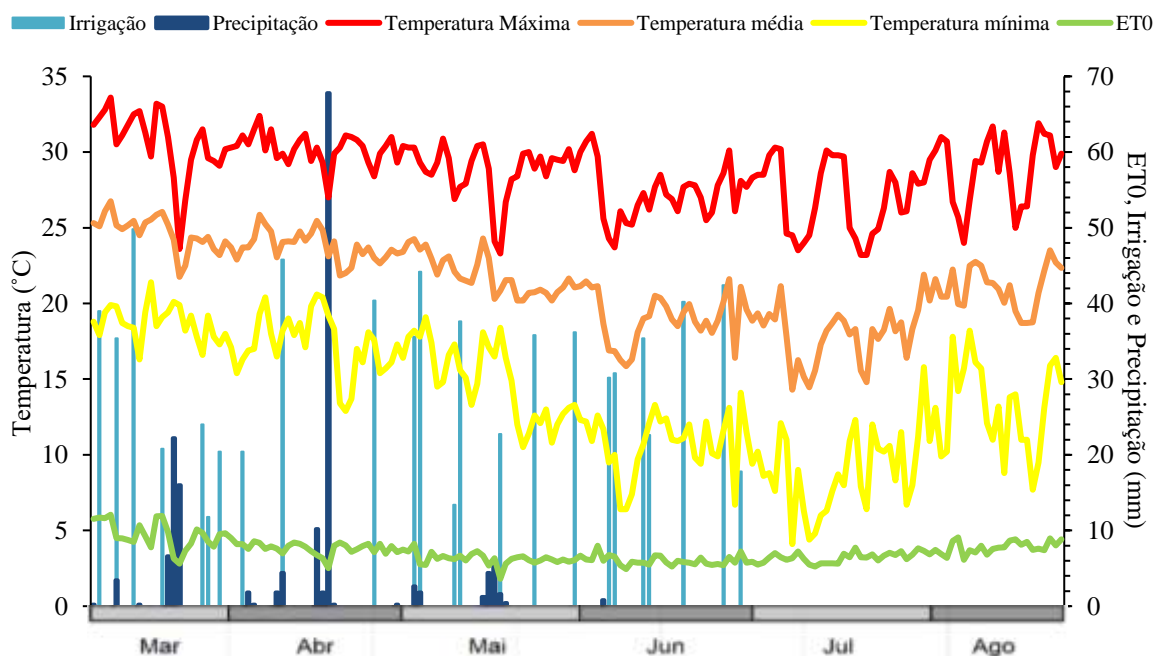


Figura 5 - Médias diárias das temperaturas máxima, mínima e média, precipitação pluvial e evapotranspiração de referência (ET₀) ao longo do ciclo da cultura, para o ano de 2019.

No ano de 2019, a temperatura média do ar, ao longo do período experimental, foi de 21,3 °C, sendo a média máxima de 28,7 °C e a média mínima de 13,8 °C (Figura 5). A ET₀

totalizou 410 mm até o ponto de ensilagem (112 DAS) e 609 mm até a maturação dos grãos. Já a ETc acumulada foi de 434 mm do plantio à colheita de silagem e 614 mm na maturidade fisiológica dos grãos. Em relação ao ano de 2018, verificou-se um aumento nos níveis de temperatura, de ET0 e de ETc. O aumento na evapotranspiração ocorreu, principalmente, em virtude de a cultura ter apresentado um ciclo maior, em relação ao ano anterior.

A precipitação total, verificada do plantio à maturidade fisiológica dos grãos, foi de 155 mm, valor superior ao observado no ano de 2018 (118 mm). A chuva efetiva totalizou 69 mm do ponto de ensilagem até a maturação dos grãos, valor inferior ao do ano anterior. Em 2019, a chuva também foi mal distribuída, havendo um evento de precipitação superior a 60 mm diário, no dia 17 de abril, e acúmulo da precipitação no início do ciclo da cultura. Esse evento de chuva pode esclarecer o valor reduzido da chuva efetiva, uma vez que a mesma contribuiu diretamente para o aumento da chuva total, no ciclo da cultura, porém um percentual dela foi convertido em perdas por escoamento superficial e por percolação profunda da água no solo. Além disso, por ocorrer no início do ciclo, em que se tem uma menor zona radicular, houve uma maior potencialização das perdas por percolação profunda.

Na Tabela 7 é apresentada a duração dos períodos da semeadura até a maturidade fisiológica e os valores de chuva total, chuva efetiva, ET0 e ETc, para os níveis de irrigação.

Tabela 7 - Dados de período para maturidade fisiológica (PMF), chuva total, chuva efetiva, ET0 e ETc, para os diferentes níveis de irrigação, no ano de 2019.

Nível de irrigação	PMF (DAS*)	Chuva (mm)	Chuva efetiva (mm)	ET0 (mm)	ETc (mm)
L1	169	155	69	609	614
L2	160	155	69	572	597
L3	154	155	69	549	583
L4	147	155	69	523	563
L5	143	155	69	508	550
L6	131	155	69	468	506

*Dias após plantio

As lâminas de irrigação, totalizadas até o corte para produção de silagem e produção de grãos, foram expressas em termos de porcentagens, em relação à ET0 (Tabela 8).

Tabela 8 - Lâminas de irrigação e respectiva porcentagem em relação à evapotranspiração de referência (%ET₀, %) para os diferentes níveis de irrigação, desde o plantio até o ponto de colheita de silagem e grãos, para o ano de 2019.

Nível de irrigação	Silagem		Grãos	
	Lâmina de irrigação (mm)	%ET ₀	Lâmina de irrigação (mm)	%ET ₀
L1	315,0	77	322,0	53
L2	301,0	74	308,0	51
L3	272,0	66	277,0	46
L4	243,0	59	247,0	41
L5	183,0	45	185,0	30
L6	121,0	30	121,0	20

4.2 Dados produção de silagem

4.2.1 Resultados safra 2018

Na Tabela 9 é apresentado o resumo da análise de variância para produtividade e produtividade da água para o corte de silagem.

Tabela 9 - Resumo da análise de variância referente aos dados de produtividade de fitomassa fresca e seca (t ha⁻¹) e produtividade da água (kg m⁻³) para silagem, no ano de 2018.

F.V.	G.L.	QUADRADO MÉDIO – SILAGEM		
		Produtividade de Fitomassa Fresca	Produtividade de Fitomassa Seca	Produtividade da Água
Bloco	5	157,23	12,04	19,14
Consórcio (C)	1	12,71 ^{n.s}	1,53 ^{n.s}	1,41 ^{n.s}
Resíduo (a)	5	12,67	0,46	0,61
Lâmina Irrigação (L)	5	2507,32*	78,04*	689,06*
Resíduo (b)	25	30,41	4,32	8,24
C x L	5	1,12 ^{n.s}	1,19 ^{n.s}	0,29 ^{n.s}
Resíduo (c)	25	11,16	1,11	2,51
Média		45,77	14,13	10,25
CVe (%)		7,78	4,80	7,67

* Significativo a 0,05 de probabilidade; ^{ns} Não significativo

Não foram observados efeitos significativos ($p > 0,05$) na produtividade de fitomassa fresca e seca para silagem e na produtividade da água para a interação entre consórcio e lâmina de irrigação, assim como para o fator consórcio (C).

Por outro lado, observa-se efeito significativo ($p < 0,05$) das lâminas aplicadas (L) na produtividade de fitomassa fresca e seca para silagem. O efeito da irrigação sobre a produtividade de milho já foi verificado por vários autores, tendo sido observado relações lineares e quadráticas (BERGAMASHI et al., 2006; PARIZI et al., 2009; SILVA et al., 2015; ALMEIDA, 2016; SIMÕES et al., 2017).

O modelo linear foi ajustado para a variável produtividade de fitomassa fresca de silagem (Figura 6), com um coeficiente de determinação de 0,94. A máxima produtividade obtida, $60,4 \text{ t ha}^{-1}$ ($64,8 \text{ t ha}^{-1}$ no modelo ajustado), ocorreu quando aplicou-se $377,0 \text{ mm}$ de água, ou seja, em 94% da ET_0 .

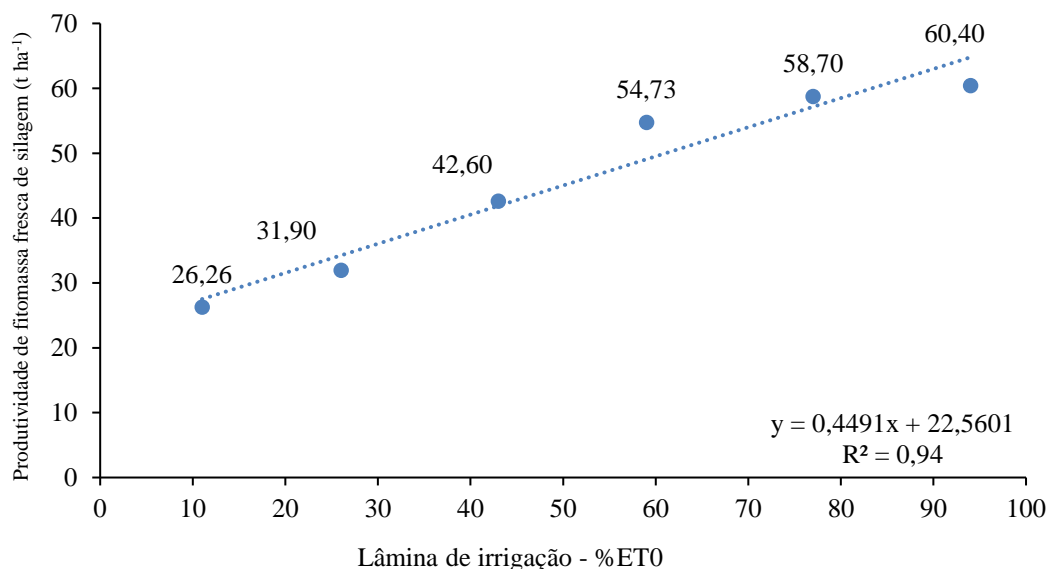


Figura 6 - Regressão para produtividade de fitomassa fresca de silagem (t ha^{-1}) em função da lâmina de irrigação, como porcentagem da ET_0 , para o ano de 2018.

A lâmina de irrigação proporcionou efeito quadrático sob a variável produtividade de fitomassa seca para silagem (Figura 7), com um coeficiente de determinação de 0,97. A máxima produtividade, $16,55 \text{ t ha}^{-1}$, ocorreu em 85% da ET_0 , com posterior decréscimo da produtividade, após atingir a lâmina ótima.

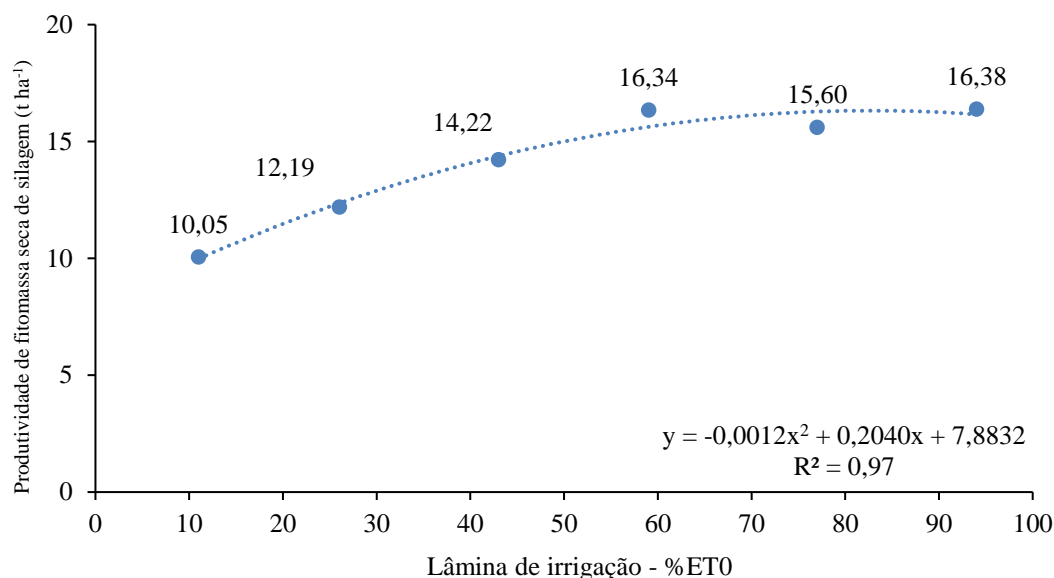


Figura 7 - Regressão para produtividade de fitomassa seca de silagem (t ha⁻¹) em função da lâmina de irrigação, como porcentagem da ET0, para o ano de 2018.

O uso da irrigação subótima em até 59% (236 mm) da ET0 não acarretou diferença significativa na produtividade de fitomassa fresca ou seca, em relação à alcançada com a máxima irrigação, com base no teste de Tukey (Tabela 10). Verificou-se uma quebra de 9,4% e 0,2% na produtividade de fitomassa fresca e seca, respectivamente, ao utilizar essa estratégia.

Tabela 10 - Produtividade de fitomassa fresca e seca de silagem (t ha⁻¹) em função da proporção da irrigação, em relação à ET0 (%), para o ano de 2018.

Níveis de irrigação (%ET0)	Produtividade de silagem (t ha ⁻¹)	
	Fitomassa Fresca	Fitomassa Seca
94	60,40 a	16,38 a
77	58,70 a	15,60 ab
59	54,73 a	16,34 ab
43	42,60 b	14,22 bc
26	31,90 c	12,19 c
11	26,26 c	10,05 d

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% ($p > 0,05$).

Verificou-se também efeito significativo a nível de 5% de probabilidade das lâminas de irrigação (L) para produtividade da água para massa seca de silagem. Observou-se que a lâmina de irrigação proporcionou efeito quadrático sob essa variável (Figura 8), apresentando tendência decrescente com o incremento das lâminas, até o nível 76% da ET0, onde o valor mínimo de 3,58 kg m⁻³ de produtividade da água foi obtido.

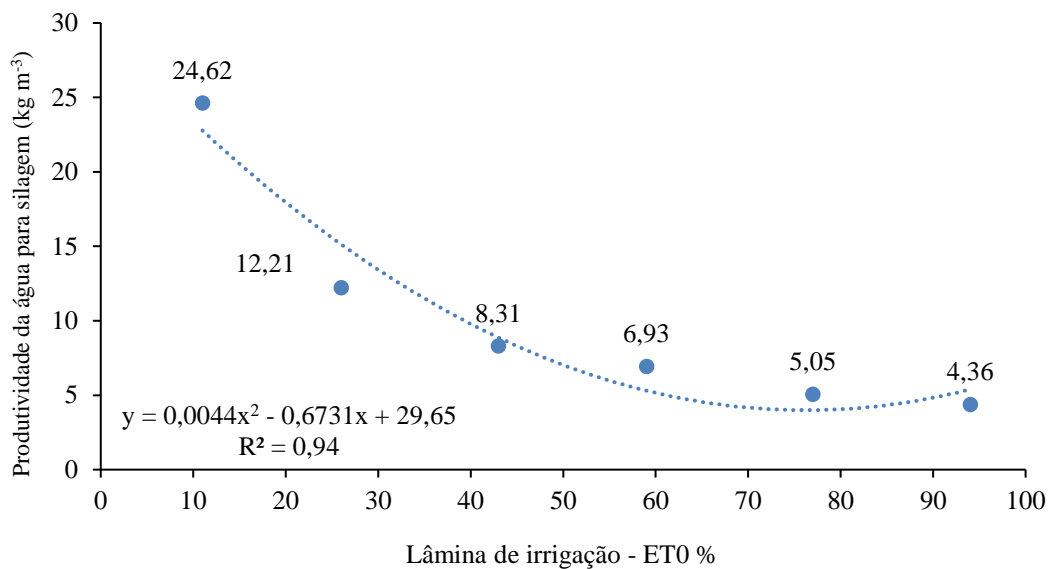


Figura 8 - Regressão para produtividade da água (kg m⁻³) de material para massa seca de silagem em função da lâmina de irrigação, como porcentagem da ET0, em 2018.

Utilizando-se a estratégia de redução em até 59% da ET0, em que não há diferença estatística quanto ao rendimento de milho para silagem, a produtividade da água obtida, com o modelo ajustado, foi de 5,25 kg m⁻³.

4.2.2 Resultados safra 2019

Na Tabela 11 é apresentado o resumo da análise de variância para produtividade e produtividade da água para o corte de silagem.

Tabela 11 - Resumo da análise de variância, referente aos dados de produtividade de fitomassa fresca e seca ($t\ ha^{-1}$) e produtividade da água ($kg\ m^{-3}$) para silagem, no ano de 2019.

F.V.	G.L.	QUADRADO MÉDIO – SILAGEM		
		Produtividade de Fitomassa Fresca	Produtividade de Fitomassa Seca	Produtividade da Água
Bloco	7	146,84	9,41	6,09
Consórcio (C)	2	46,09 ^{n.s}	6,16 ^{n.s}	0,51 ^{n.s}
Resíduo (a)	14	21,47	2,48	0,91
Lâmina Irrigação (L)	5	1037,52*	5,03 ^{n.s}	161,22*
Resíduo (b)	35	21,76	2,46	2,04
C x L	10	16,51 ^{n.s}	2,90 ^{n.s}	0,88 ^{n.s}
Resíduo (c)	70	11,82	3,99	1,30
Média		47,53	14,34	6,71
CVe (%)		9,75	10,97	14,23

* Significativo a 0,05 de probabilidade; ^{ns} Não significativo

Não foram observados efeitos significativos ($p > 0,05$) na produtividade de fitomassa fresca e seca para silagem para a interação entre consórcio e lâmina de irrigação, assim como para o fator consórcio (C). Além disso, não houve significância do fator lâmina de irrigação apenas para produtividade de fitomassa seca.

Por outro lado, observou-se efeito significativo ($p < 0,05$) das lâminas de irrigação (L) na produtividade de fitomassa para silagem. O modelo quadrático foi ajustado para essa variável (Figura 9), com um coeficiente de determinação de 0,98. A máxima produtividade, $51,71\ t\ ha^{-1}$, ocorreu em 74% da ET0, com posterior redução da produtividade após atingir a lâmina ótima.

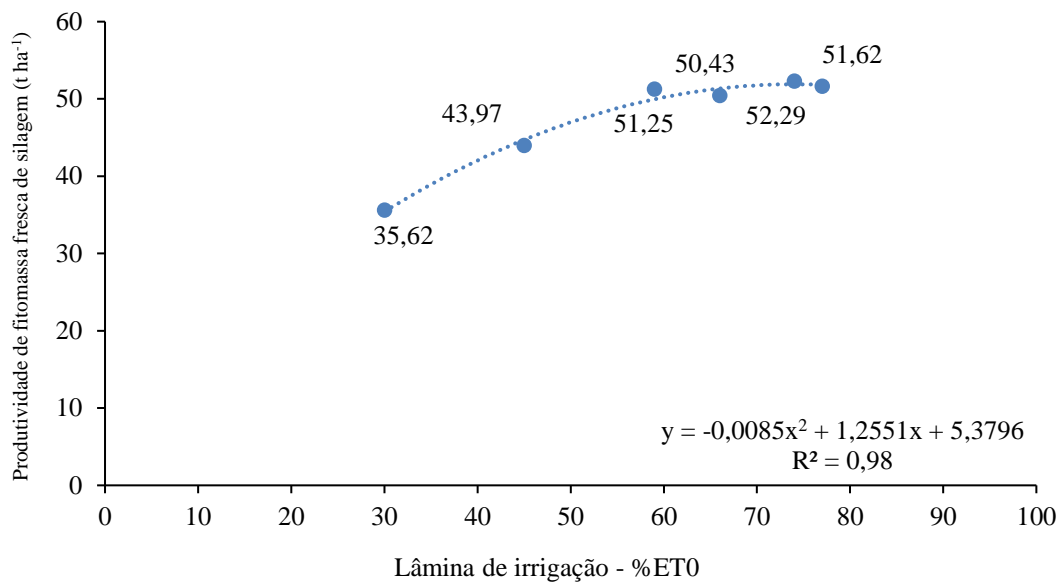


Figura 9 - Regressão para produtividade de fitomassa fresca de silagem (t ha⁻¹) em função da lâmina de irrigação, como porcentagem da ET0, para o ano de 2019.

Quando se reduziu a lâmina de irrigação média de 315 mm (L1) para 121 mm (L6), ocorreu uma redução de 31% no rendimento do milho para silagem. A redução em até 59% da ET0 (243 mm), ao invés do uso da irrigação plena, não acarretou diferença estatística quanto ao rendimento de milho para silagem de fitomassa fresca de planta inteira (Tabela 12).

Tabela 12 - Produtividade de fitomassa fresca e seca de silagem (t ha⁻¹) em função da proporção da irrigação em relação à ET0 (%), para o ano de 2019.

Níveis de irrigação (%ET0)	Produtividade de silagem (t ha ⁻¹)	
	Fitomassa Fresca	Fitomassa Seca
77	51,62 a	14,33 a
74	52,29 a	14,21 a
66	50,43 a	14,65 a
59	51,25 a	14,95 a
45	43,97 b	14,28 a
30	35,62 c	13,59 a

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% ($p > 0,05$).

Também foi verificado efeito significativo a nível de 5% de probabilidade das lâminas de irrigação (L) para produtividade da água para massa seca de silagem. Observou-se um efeito linear sob essa variável (Figura 10), tendo uma tendência decrescente com o incremento das lâminas de água, em que foi obtido um valor mínimo de 4,56 kg m⁻³ (4,11 kg m⁻³ no modelo ajustado) de produtividade da água.

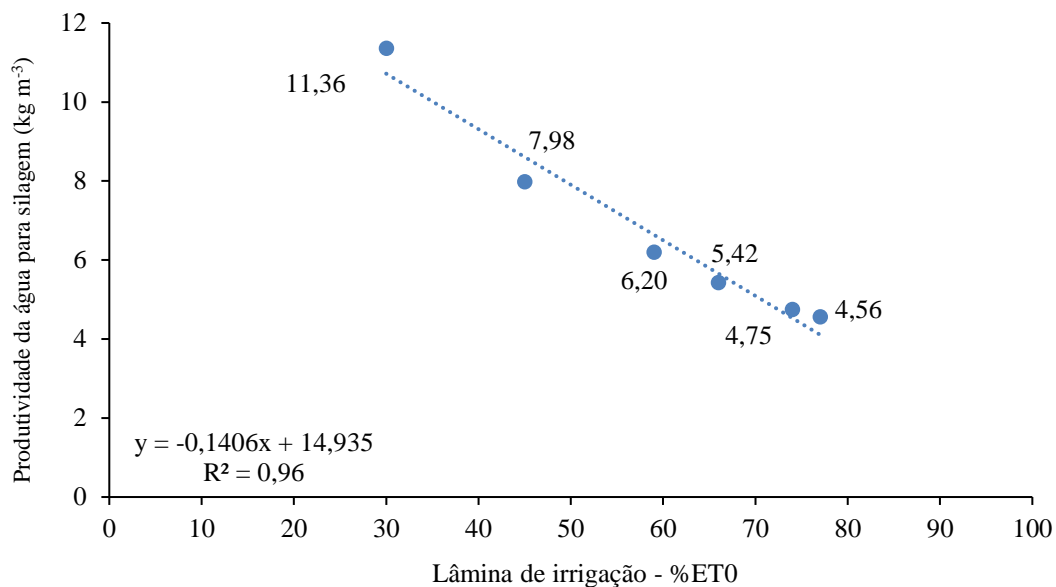


Figura 10 - Regressão para produtividade da água (kg m^{-3}) de material para massa seca de silagem em função da lâmina de irrigação, como porcentagem da ET0, em 2019.

Nota-se que, ao reduzir de 77% (L1) para 30% (L6), na proporção da irrigação em relação à ET0, houve um aumento de aproximadamente 149% da PA_{irri} . Entretanto, ao utilizar a estratégia de redução em até 59% da ET0, onde não há diferença estatística quanto ao rendimento de silagem de milho, a produtividade da água obtida foi $6,20 \text{ kg m}^{-3}$ ($6,64 \text{ kg m}^{-3}$ no modelo ajustado).

4.2.3 Discussão sobre resultados de silagem

Observou-se que, nas duas safras, não houve efeitos significativos ($p > 0,05$) na produtividade de fitomassa fresca e seca para silagem para a interação entre consórcio e lâmina de irrigação, assim como para o fator consórcio.

O manejo de um sistema de consórcio milho-braquiária é bastante complexo, sendo que sua otimização depende de fatores como a fertilidade do solo, a densidade de plantas de braquiária e o arranjo de plantas do milho (RESENDE et al., 2008). Além disso, em cultivos consorciados, a competição entre as espécies pelos recursos do meio pode inviabilizar o sistema. Dessa forma, é necessário realizar um planejamento, de modo a minimizar os efeitos de competição interespecífica por água, luz e nutrientes, a qual pode resultar em perdas significativas de produtividade de ambas espécies.

Segundo Mechi et al. (2016), os benefícios oriundos do consórcio são obtidos quando existe um efeito residual e acumulativo, em cerca de quatro ou mais anos consecutivos, o que

pode explicar o efeito não significativo do consórcio, no presente experimento.

Além disso, nesse estudo, a planta de milho possivelmente se sobressaiu na competição interespecífica por nutriente e água ou até mesmo o sombreamento gerado pela cultura pode ter prejudicado o desenvolvimento do capim. Estudos comprovam que espécies de braquiária apresentam taxa de crescimento inicial lenta e, com isso, sofrem competição pela cultura do milho, a qual exibe elevado potencial competitivo com plantas de menor porte, em virtude de uma maior produção de matéria seca nas primeiras quinzenas do seu desenvolvimento e à alta capacidade de interceptação da radiação fotossinteticamente ativa ao longo do dossel, resultando na redução da quantidade desse recurso para outras espécies (PANTANO, 2003; SILVA et al., 2004).

Alvarenga et al. (2016), avaliando o desempenho do consórcio de cultivares de milho com espécies de braquiárias num sistema lavoura-pecuária, no décimo primeiro ano de condução, observaram que a cultura do milho se desenvolveu normalmente, apresentando boas produtividades e ausência de concorrência dos capins. Já os capins tiveram um adequado estabelecimento para formação de pastagem, porém, apresentaram entrenós um pouco alongados devido à competição exercida pelo milho.

No caso do emprego do milho para produção de silagem, a gramínea forrageira pode se beneficiar das chuvas e temperaturas elevadas, após a colheita da cultura (FREITAS et al., 2005), de modo que, cerca de 70 dias após o corte, já é possível utilizá-la como pastagem para os animais (PORTES et al., 2000).

Doorenbos e Kassam (1979) afirmam que a produtividade de uma cultura é influenciada por processos biológicos, fisiológicos, físicos e químicos, os quais são estabelecidos por condições ambientais locais (clima, solo e água), além dos fatores genéticos. No presente estudo, a água foi o fator determinante ao desenvolvimento da cultura do milho, já que as demais variáveis meteorológicas foram constantes para todos os tratamentos.

No ano de 2019, não se observou significância do fator lâmina de irrigação para produtividade de fitomassa seca. Esse resultado corrobora os de Martin et al. (2012), os quais observaram que, de modo geral, a produção de massa seca (real produtividade) não foi afetada pelas estratégias de irrigação deficitária e que as mesmas não influenciaram as variáveis relativas à qualidade da silagem.

De acordo com os resultados observados nos dois anos, a produtividade de fitomassa fresca para silagem de milho de planta inteira, diferente do que se observou para fitomassa seca, foi expressivamente dependente da lâmina aplicada, uma vez que a cultura é considerada

exigente em água, apresentando uma relação diretamente proporcional ao uso acumulado de água no ciclo (PEGORARE et al., 2009). Resultados semelhantes foram encontrados por Silva et al. (2015), analisando o efeito de períodos de veranico sobre a produtividade de milho para ensilagem, com sistema de irrigação por gotejamento. Esses autores observaram que, à medida em que se aumentou os períodos de déficit hídrico, houve redução gradativa na produtividade de matéria fresca de milho para silagem.

As máximas produtividades de fitomassa fresca de silagem ($60,40 \text{ t ha}^{-1}$ e $52,29 \text{ t ha}^{-1}$) foram obtidas em 94% e 74% da ET_0 , em 2018 e 2019, respectivamente. Já para fitomassa seca de silagem, em 2018, a máxima produtividade, $16,55 \text{ t ha}^{-1}$, foi obtida em 85% da ET_0 . As máximas produtividades de fitomassa fresca de silagem, obtidas no presente estudo, são próximas ao potencial produtivo regional, evidenciado por produtividades de até 60 t ha^{-1} de silagem, alcançadas por agricultores que adotam tecnologias avançadas.

É válido ressaltar que, apesar do déficit imposto pela irrigação subótima ter provocado uma queda na produtividade de silagem, o uso de estratégias de irrigação adequadas possibilita a economia de água e energia. Em ambos os anos, o emprego da estratégia de redução em até 59% da ET_0 , representando uma aplicação de água de 236 mm e 243 mm para o ano de 2018 e 2019, respectivamente, não provocaram uma queda significativa no rendimento de material para silagem de milho de planta inteira. Destaca-se a importância de se fornecer água às culturas, de modo a maximizar seu rendimento, sendo indispensável o planejamento e manejo da água nas lavouras, visando o melhor aproveitamento dos recursos hídricos disponíveis (BERGAMASCHI e MATZENAUER, 2014).

A produção de silagem de milho, com altos rendimentos e de boa qualidade, é dependente de uma série de condições, principalmente fatores climáticos. Melo et al. (2019), avaliando a produtividade de massa seca e a qualidade da silagem de milho em cultivos de sequeiro e irrigado em Minas Gerais, afirmam que, ainda que outros fatores climáticos, como temperatura e radiação solar, influenciem significativamente a produção de milho, a disponibilidade hídrica pode ser considerada o fator mais limitante ao cultivo de milho para silagem. Os autores verificaram que a produtividade simulada média de massa seca de silagem de milho apresenta maior variação no cultivo de sequeiro, com maior variabilidade interanual e menor qualidade da silagem, em comparação ao cultivo irrigado. No presente estudo, o experimento foi conduzido na segunda safra, em um ano onde foi verificado baixa precipitação e distribuição irregular da chuva ao longo do ciclo da cultura. Nessas condições, o cultivo em sequeiro na região não seria recomendado, uma vez que possivelmente haveria uma queda de

produtividade ainda mais expressiva, se comparado com os resultados obtidos com o uso da irrigação subótima. Isso ressalta o quanto o manejo adequado da irrigação é essencial para potencializar o uso desta técnica.

Vale ressaltar que a qualidade da silagem está diretamente ligada às características agronômicas da planta forrageira utilizada para sua produção, sendo necessário o conhecimento da composição de cada forrageira, antes de estabelecer sua viabilidade para tal emprego (PEREIRA et al., 2011).

Situações de déficit hídrico durante o período vegetativo resultam em um menor crescimento da planta de milho, com decréscimo da área foliar e da fitomassa (BERGAMASCHI et al., 2006), o que pode influenciar diretamente no rendimento de milho para ensilagem, uma vez que a mesma constitui-se da parte aérea da planta. Quando ocorre um déficit no período anterior ao embonecamento, pode haver redução de 20% a 30% na produtividade (ALBUQUERQUE e RESENDE, 2009). Se o estresse hídrico se prolongar e atingir a fase reprodutiva, os impactos sobre a capacidade produtiva da cultura serão ainda mais expressivos, em especial na produção de grãos, que é um dos principais componentes responsáveis pela qualidade da massa ensilada (BERGAMASCHI et al., 2006).

O uso da irrigação com déficit hídrico, nessa pesquisa, resultou em um aumento da produtividade da água, em ambos os anos avaliados. As máximas produtividades da água foram obtidas em condições de maior aplicação de estresse, ou seja, em 40% (161,0 mm) e 30% (121,0 mm) da ET₀, nos anos de 2018 e 2019, respectivamente. Por outro lado, as mínimas produtividades de água foram obtidas em 76% (309,0 mm) e 77% (315,0 mm) da ET₀, nos anos de 2018 e 2019, respectivamente, que representam uma aplicação de elevada lâmina de irrigação.

Os resultados aqui verificados corroboram os de Martin et al. (2012), que avaliaram a produtividade de água da cultura do milho para fitomassa de silagem, utilizando diferentes estratégias de manejo de irrigação plena e deficitária (A1, Irrigação plena; A2, déficit hídrico leve e A3; déficit hídrico moderado). Os autores verificaram que a maior produtividade da água da irrigação foi obtida com a adoção de técnicas com restrição hídrica, ou seja, tratamento A3, para o qual obtiveram 24,1 kg m⁻³ de matéria seca.

Com a adoção da irrigação subótima, é possível reduzir a quantidade de água aplicada, entretanto, causando um mínimo impacto na produção (QUEIROZ et al., 2005). Em 2018, utilizando-se a estratégia de redução em até 59% da ET₀, onde não verificou-se diferença estatística quanto ao rendimento de milho para silagem, a produtividade da água obtida foi de

6,93 kg m⁻³. Já em 2019, com a mesma estratégia de redução em até 59% da ET₀, a produtividade da água obtida foi de 6,20 kg m⁻³. Apesar de representar uma queda expressiva, se comparado com o maior déficit aplicado, esses valores encontram-se próximos aos encontrados na literatura, em que foram reportados níveis de produtividade da água, com base na irrigação, entre 7,6 e 8,6 kg m⁻³ (PAYERO et al., 2009).

Segundo Lima et al. (1999), com a melhoria de 1% da produtividade da água em cultivos irrigados no geral, considerando países em desenvolvimento, de clima semiárido ou árido, estima-se uma economia de aproximadamente 200 mil litros de água por hectare irrigado por ano. A partir da PA_{irri} pode-se determinar uma quantidade suplementar de irrigação, buscando assegurar um rendimento elevado numa determinada área (ARAYA et al., 2011). Ressalta-se, com isso, a importância do manejo adequado da irrigação, buscando a eficiência no uso da água pelas culturas e a viabilidade econômica da atividade.

4.3 Dados produção de grãos

4.3.1 Resultados safra 2018

Na Tabela 13 são apresentados os resultados do resumo da análise de variância para produtividade de fitomassa seca, corrigida à 13%, e produtividade da água em função do corte para produção de grãos.

Tabela 13 - Resumo da análise de variância referente aos dados de produtividade (t ha⁻¹) e produtividade da água (kg m⁻³) para colheita de grãos (2018).

F.V.	G.L.	QUADRADO MÉDIO – GRÃOS	
		Produtividade Grãos	Produtividade da Água
Bloco	5	3,89	0,28
Consórcio (C)	1	0,10 ^{n.s}	0,01 ^{n.s}
Resíduo (a)	5	0,41	0,02
Lâmina Irrigação (L)	5	74,22*	0,76*
Resíduo (b)	25	0,95	0,09
C x L	5	0,37 ^{n.s}	0,02 ^{n.s}
Resíduo (c)	25	0,34	0,03
Média		5,78	2,96
CVe (%)		11,11	7,78

* Significativo a 0,05 de probabilidade; ^{ns} Não significativo

Não foram observados efeitos significativos para a interação consórcio e lâmina de irrigação e nem para o fator consórcio (C). Houve efeito significativo a 5% de probabilidade para o fator lâmina de irrigação (L), para ambas as variáveis de resposta.

Ajustou-se o modelo quadrático aos dados de produtividade de grãos (Figura 11) com um coeficiente de determinação de 0,99. O valor máximo da produtividade, 8,04 t ha⁻¹, ocorreu na lâmina 73% da ET0, com posterior redução do rendimento de grãos após alcançada uma lâmina ótima de irrigação.

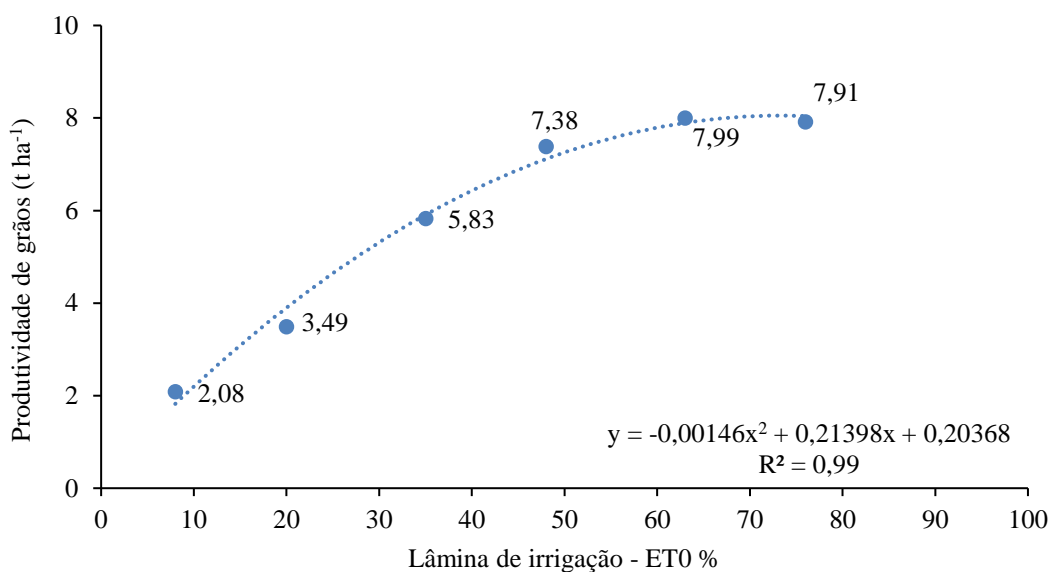


Figura 11 - Regressão para produtividade de grãos (t ha⁻¹) em função da lâmina de irrigação, como porcentagem da ET0, para o ano de 2018.

A redução da lâmina de irrigação média de 422 mm (L1) para 44 mm (L6) provocou uma queda de 74% na produção de grãos de milho. Todavia, utilizando-se a estratégia de redução em até 48% da ET0 (265 mm), não há diferença estatística quanto ao rendimento de grãos de milho (Tabela 14). Observou-se uma quebra de produtividade de grãos de 6,7%. Isso implica que o uso da irrigação subótima, apesar de provocar queda na produtividade, é uma estratégia para se obter bons rendimentos e ao mesmo tempo economizar água e energia.

Tabela 14 - Produtividade de grãos ($t\ ha^{-1}$) em função dos níveis de irrigação em proporção da ET0 (%) para o ano de 2018.

Níveis de irrigação (%ET0)	Produtividade de Grãos ($t\ ha^{-1}$)
76	7,91 a
63	7,99 a
48	7,38 ab
35	5,83 b
20	3,49 c
8	2,08 d

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% ($p > 0,05$).

Para a variável produtividade da água (Figura 12), a lâmina de irrigação proporcionou efeito linear sob essa variável, com um coeficiente de determinação de 0,86, e produtividade mínima de $1,88\ kg\ m^{-3}$ ($1,79\ kg\ m^{-3}$), obtida em 76% da ET0.

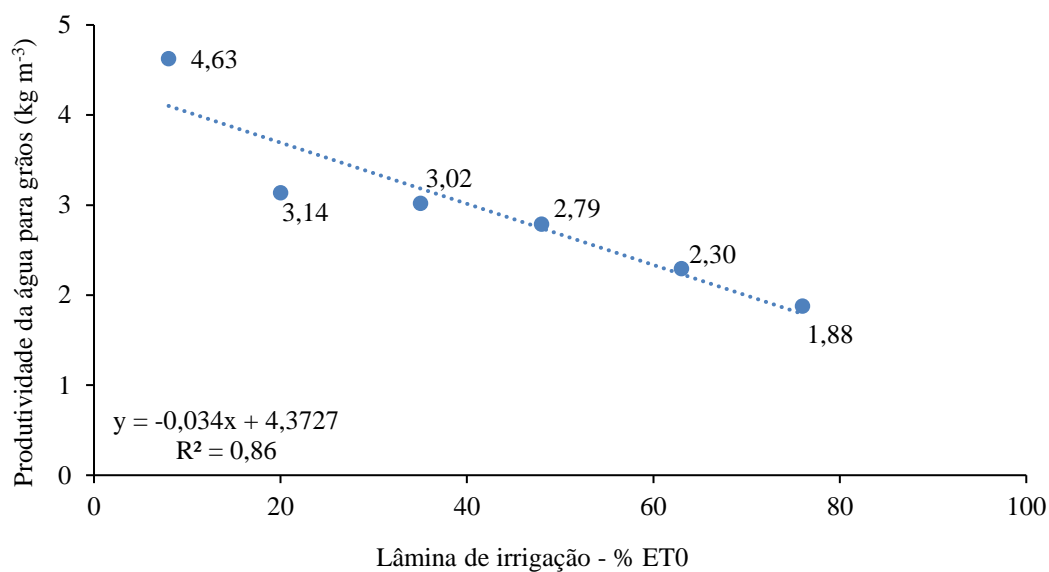


Figura 12 - Regressão para produtividade da água ($kg\ m^{-3}$) para grãos em função da lâmina de irrigação, como porcentagem da ET0, em 2018.

Nota-se que a produtividade da água para a cultura do milho apresentou uma resposta linear negativa em função do incremento da lâmina aplicada. Observa-se que, ao reduzir de 76% (L1) para 8% (L6) da proporção de ET0, houve um aumento de aproximadamente 146% da PA_{irri} .

Utilizando-se a estratégia de redução em até 48% da ET0, onde não há diferença estatística quanto ao rendimento de grãos de milho, a produtividade da água obtida foi de $2,74\ kg\ m^{-3}$.

4.3.2 Resultados safra 2019

Na Tabela 15 são apresentados os resultados do resumo da análise de variância para produtividade de fitomassa seca, corrigida à 13%, e produtividade da água em função do corte para produção de grãos.

Tabela 15 - Resumo da análise de variância referente aos dados de produtividade ($t\ ha^{-1}$) e produtividade da água ($kg\ m^{-3}$) para colheita de grãos (2019).

F.V.	G.L.	QUADRADO MÉDIO – GRÃOS	
		Produtividade Grãos	Produtividade da Água
Bloco	7	1,98	1,91
Consórcio (C)	2	1,78 ^{n.s}	0,45 ^{n.s}
Resíduo (a)	14	1,06	0,22
Lâmina irrigação (L)	5	16,83*	17,49*
Resíduo (b)	35	0,56	0,35
C x L	10	0,51 ^{n.s}	0,15 ^{n.s}
Resíduo (c)	70	0,43	0,11
Média		6,64	2,97
CVe (%)		15,53	15,79

* Significativo a 0,05 de probabilidade; ^{ns} Não significativo

Não foram observados efeitos significativos ($p > 0,05$) para a interação consórcio e lâmina de irrigação e nem para o fator consórcio (C). Houve efeito significativo a 5% de probabilidade apenas para o fator irrigação (L), para ambas as variáveis.

Verificou-se que a lâmina de irrigação proporcionou efeito linear e positivo ($p < 0,05$), ou seja, o aumento da aplicação de água proporcionou aumento na produtividade de grãos (Figura 13), estando esse rendimento relacionado principalmente à quantidade de irrigação aplicada no sistema.

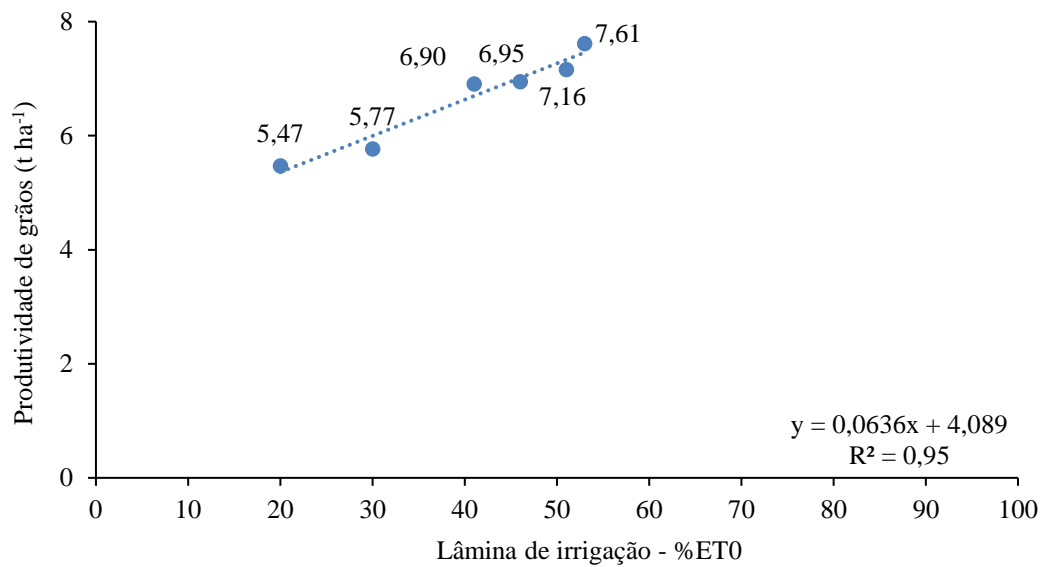


Figura 13 - Regressão para produtividade de grãos (t ha⁻¹) em função da lâmina de irrigação, como porcentagem da ET0, para o ano de 2019.

A redução da lâmina de irrigação média de 322 mm (L1) para 121 mm (L6) provocou uma queda de 28% na produção de massa seca de grãos de milho. Apesar dessa quebra com o aumento do déficit, o uso dessa estratégia em até 51% (308 mm) da ET0, ao invés do uso da irrigação plena, não acarretou diferença estatística quanto ao rendimento de grãos de milho (Tabela 16).

Tabela 16 - Produtividade de grãos (t ha⁻¹) em função dos níveis de irrigação em proporção da ET0 (%) para o ano de 2019.

Níveis de irrigação (%ET0)	Produtividade de Grãos (t ha ⁻¹)
53	7,61 a
51	7,16 ab
46	6,95 b
41	6,90 b
30	5,77 c
20	5,47 c

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% ($p > 0,05$).

Para a variável produtividade da água (Figura 14), a lâmina de irrigação proporcionou efeito quadrático sob essa variável, com um coeficiente de determinação de 0,97, sendo que, independentemente do consórcio utilizado, a produtividade mínima, 2,45 kg m⁻³, foi obtida em 51% da ET0.

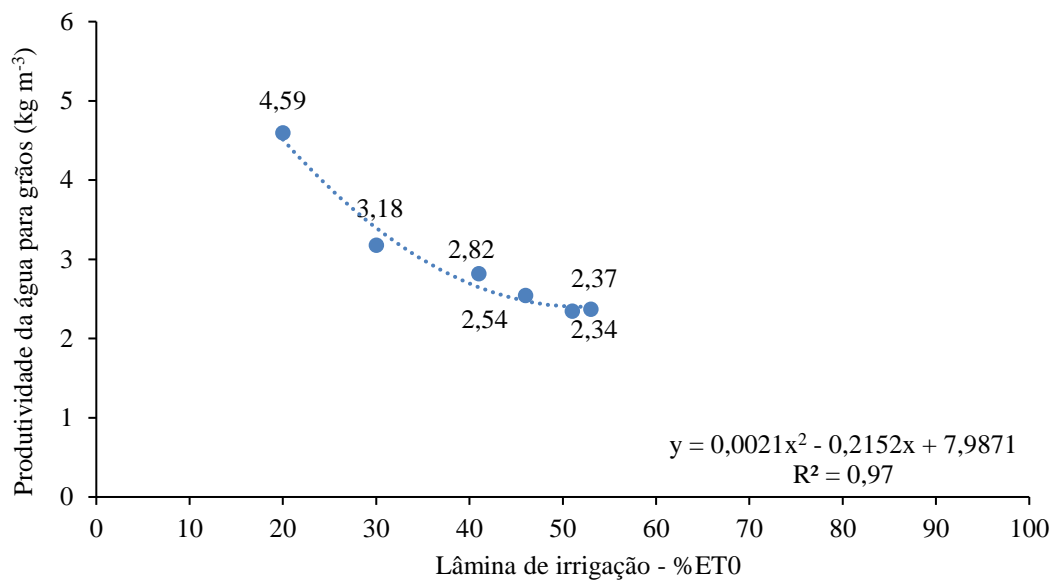


Figura 14 - Regressão para produtividade da água (kg m⁻³) para grãos em função da lâmina de irrigação, como porcentagem da ET₀, em 2019.

Nota-se que a produtividade da água apresentou uma tendência decrescente com o incremento do déficit pela irrigação, sendo que, ao reduzir de 53% (L1) para 20% (L6) da ET₀, houve um aumento de aproximadamente 94% da PA_{irri}. Utilizando-se a estratégia de redução em até 51% da ET₀, onde não há diferença estatística quanto ao rendimento de grãos de milho, a produtividade da água obtida foi de 2,45 kg m⁻³.

4.3.3 Discussão sobre resultados de grãos

Observou-se que, nas duas safras, não houve efeitos significativos ($p > 0,05$) na produtividade de grãos para a interação entre consórcio e lâmina de irrigação, assim como para o fator consórcio.

Em algumas situações específicas, o milho em consórcio pode ter sua produção de grãos afetada em relação ao seu cultivo solteiro, devido à competição com planta forrageira por água, luz e nutrientes. Os efeitos proporcionados pela ILP variam conforme o objetivo do consórcio, a modalidade de consorciação, o método de implantação e a população de plantas de braquiária a ser estabelecida (CECCON et al., 2013).

Jakelaitis et al. (2005), avaliando o cultivo consorciado de milho e *B. brizantha*, verificaram que a presença da forrageira aparentemente não afetou a produtividade de grãos de milho, desde que manejada corretamente, com aplicação de subdoses de herbicidas, redução de espaçamento do milho ou semeadura da braquiária após plantio do milho. Nesse sistema, houve

uma viabilidade na produção de milho e renovação de pastagens. Garcia et al. (2013) afirmam que o consórcio de forrageiras dos gêneros *Panicum* e *Brachiaria* com o milho, em diferentes épocas de semeadura, não compromete os componentes de produção e a produtividade de grãos, quando comparado ao cultivo de milho solteiro.

Por outro lado, Borghi e Crusciol (2007) observaram uma queda no rendimento de grãos de milho, resultante da presença da forrageira no sistema, o que pode ser explicado pela modalidade de implantação ou pelas condições climáticas do ano. Kurihara et al. (2009) observaram que o consórcio de *B. ruziziensis* com o milho reduziu a produtividade de grãos, em relação ao cultivo solteiro, sendo a forrageira semeada na entrelinha. Segundo os autores, este efeito é ainda mais expressivo com a semeadura da forrageira nas linhas e entrelinhas.

De acordo com os resultados observados nos dois anos, pode-se afirmar que a cultura do milho apresentou uma resposta positiva quanto ao rendimento de grãos em função do incremento da aplicação de água. Tal comportamento pode ser explicado pelo fato de a planta de milho ser considerada exigente na demanda por água, porém eficiente no seu uso. Além disso, o uso da irrigação deve considerar, principalmente, o momento em que a planta mais necessita de água, sendo na cultura do milho o período da pré-floração ao início do enchimento dos grãos (BERGAMASCHI, 2004).

O valor máximo da produtividade de grãos ocorreu na lâmina 73% ($8,04 \text{ t ha}^{-1}$) e 53% ($7,61 \text{ t ha}^{-1}$) da ET_0 , no ano de 2018 e 2019, respectivamente. As máximas produtividades de grãos obtidas são inferiores ao potencial produtivo regional, evidenciado por produtividades de até 14 t ha^{-1} de grãos. Esse fato pode ser explicado pelo uso de um nível tecnológico médio, resultando em uma baixa produtividade em relação à potencial.

A redução da lâmina de irrigação média de L1 para L6 provocou uma queda de 74% e 28% na produção de grãos de milho, nos anos de 2018 e 2019, respectivamente. De acordo com Pegorare et al. (2009), o déficit hídrico pode provocar a redução da massa seca de grãos nas culturas, devido a alguns fatores, como: insuficiência de fotoassimilados, que mantêm o crescimento dos zigotos formados; redução no tempo da polinização, causada pela inibição do alongamento do estilete e retardamento na emergência dos estigmas; redução da fotossíntese, que afeta o desenvolvimento e o peso dos grãos, uma vez que a produção de carboidratos implica em menor quantidade de matéria seca nos grãos. Vale ressaltar que a queda de matéria seca nos grãos afeta diretamente a qualidade da silagem. Um dos principais fatores que interferem na qualidade de uma silagem é a porcentagem de grãos na matéria seca, uma vez que a maior participação desse componente na estrutura física da planta favorece as condições de

fermentação da massa, o aumento de teores de matéria seca, digestibilidade “in vitro” da matéria seca e a quantidade de energia disponível (NEUMANN et al., 2004).

Apesar da queda observada no rendimento de grãos, a estratégia de déficit pôde ser adotada, sem causar quebra significativa na produtividade, em até 48% da ET₀ (265 mm) e 51% da ET₀ (308 mm), nos anos de 2018 e 2019, respectivamente. Esses resultados corroboram os de Amaral et al. (2016) que, em estudo avaliando o desempenho de quatro genótipos de milho cultivados sob diferentes níveis de estresse hídrico cumulativo, obtidos com a utilização de um sistema *line-source*, verificaram reduções significativas na produtividade de massa seca de grãos em todos os genótipos analisados, em decréscimos maiores que 52% na lâmina de água (de L1 para L5/L6). Isso implica que é possível obter rendimentos elevados mesmo utilizando-se de uma irrigação deficitária, mitigando os problemas causados pela escassez hídrica e, ao mesmo tempo, economizar água e energia.

A resposta do rendimento de grãos à irrigação usualmente é quadrática, com posterior redução do rendimento, após alcançada uma lâmina ótima de irrigação (KLOCKE et al., 2012). Como a água é um fator limitante à produção, conforme há um aumento da sua disponibilidade, a cultura consegue expressar melhor o seu potencial produtivo até determinado ponto, após o qual tem-se uma queda da produtividade, resultante, sobretudo, do excesso de água no solo, da baixa aeração na zona radicular e da lixiviação de nutrientes do solo (BERNARDO, 2006). Este último fator se enquadra mais logicamente ao que se observou no ano de 2018, considerando que a máxima lâmina foi calculada para atender à demanda evapotranspirométrica.

No ano de 2018, o modelo quadrático foi o que melhor se ajustou aos dados de produtividade de grãos, com posterior redução do rendimento de grãos, após alcançada uma lâmina ótima de irrigação. O ajustamento corrobora a hipótese de que a irrigação influenciou a produtividade média do milho, nas condições do experimento. Já no ano de 2019, verificou-se que a lâmina de irrigação proporcionou efeito linear positivo na produtividade de grãos. Segundo Klocke et al. (2012), a resposta ao rendimento à irrigação pode variar ao longo dos anos, devido a diferenças na quantidade e tempo de precipitação, na água armazenada no solo e na demanda evaporativa da cultura. No último ano, houve menor lâmina de chuva efetiva, apesar da precipitação total ter sido maior, em relação à 2018, e a demanda evaporativa foi alta. Nessas condições, a lâmina de água armazenada no solo, utilizada como suprimento para a cultura, possivelmente não atendeu demanda total, o que pode explicar o motivo da cultura não ter alcançado o potencial produtivo no intervalo estudado para as condições do experimento.

Kirchner et al. (2019), ao avaliar a produtividade do sorgo forrageiro em diferentes lâminas de irrigação (0%, 25%, 50%, 75%, 100% e 125% da ETc), a partir de um sistema de aspersão convencional, em dois anos agrícolas (2015/2016 e 2016/2017), verificaram que, para ambos os experimentos, a lâmina que proporcionou maior produtividade observada foi a de 100% da ETc, ocorrendo uma redução da produtividade com a lâmina de 125%. Tagliaferre et al. (2013), estudando o efeito de diferentes lâminas de irrigação e doses de nitrogênio sobre as características agrônômicas do feijão caupí, observaram um comportamento quadrático da produtividade com aumento da lâmina de irrigação e que, a partir de um ponto ótimo, houve um decréscimo da produtividade, sendo que a máxima produção foi obtida com aplicação da lâmina de 462 mm. Os autores concluíram que o excesso hídrico foi prejudicial às culturas estudadas e que a calibração da lâmina de irrigação é imprescindível para a obtenção de produtividades próximas do teto produtivo.

Por outro lado, Souza et al. (2011), analisando o rendimento do milho sob sistemas de plantio exclusivo e consorciado no semiárido brasileiro, observaram que a maior lâmina de irrigação (125% da ET0) promoveu incrementos significativos na produção, para as lâminas totais de 499 mm e 558 mm nos sistemas de plantios exclusivo e consorciado, respectivamente. Nas condições avaliadas, os autores observaram uma relação linear entre a produção de grãos da cultura do milho em função da lâmina de irrigação, podendo se afirmar que a cultura ainda poderia proporcionar maiores valores de produção com o aumento da lâmina aplicada.

Resultados semelhantes foram encontrados por Zwirtes et al. (2015), em estudo que avaliou os efeitos de diferentes manejos de irrigação deficitária (100%, 75%, 50% e 25% de reposição da ETc) na cultura do sorgo, a fim de identificar o nível crítico de irrigação deficitária que proporciona maior produtividade da água irrigada e retorno econômico. Os autores também observaram uma resposta linear, sendo que o uso da irrigação deficitária, reduzindo de 100% para 25% a reposição ETc, incrementou em 14% a PA_{irri} na produção de grãos de sorgo.

O uso da irrigação com déficit hídrico também resultou em um aumento da produtividade da água para grãos, em ambos os anos avaliados. As máximas produtividades da água foram obtidas com a estratégia de maior déficit hídrico, ou seja, em L6. Estes resultados diferem daqueles observados por Almeida et al. (2017), que avaliaram diferentes estratégias de manejo da irrigação sobre a produtividade de grãos e eficiência de uso da água na cultura do milho. Os autores observaram que os maiores valores de eficiência do uso da água foram verificados nos tratamentos irrigados, diferindo do tratamento de sequeiro. Além disso, as condições hídricas para a cultura no tratamento sob condições de sequeiro foram muito

limitantes, principalmente na fase reprodutiva, acarretando baixa produtividade. Nesse caso, aumentar a produtividade da água pode ser a melhor maneira de atingir o uso eficiente da água. Uma forma viável de se elevar os valores desse fator é a partir do manejo adequado de irrigação. É necessário oferecer à cultura boas condições hídricas e adequada distribuição da água ao longo do ciclo, especialmente nas fases consideradas mais críticas. Dessa forma, a produtividade da água pode ser empregada como ferramenta para ajustar o planejamento e a tomada de decisão da irrigação, aumentando a produtividade de grãos e, conseqüentemente, a lucratividade do sistema de produção (MASCHIO, 2011).

No ano de 2018, utilizando-se a estratégia de redução em até 48% da ET₀, quando não há diferença estatística quanto ao rendimento de grãos de milho, a produtividade da água obtida foi de 2,74 kg m⁻³. Já em 2019, utilizando-se a estratégia de redução em até 51% da ET₀, a produtividade da água obtida foi de 2,45 kg m⁻³. Almeida et al. (2017), estudando estratégias de manejo de irrigação sobre a produtividade e eficiência de uso da água na cultura do milho, no ano agrícola 2013/2014, em Dourados-MS, encontraram, sob condições de irrigação, valores entre 1,13 e 1,29 kg m⁻³, inferiores aos obtidos no presente estudo. A magnitude das variações da produtividade da água pode ser resultante de diferenças entre a cultivar utilizada, o ciclo da cultura, as condições ambientais e as práticas de manejo adotadas (SMIT e SINGELS, 2006).

A irrigação subótima pode ser eficaz no aumento da produtividade da água para muitas culturas, sem que haja reduções significativas de produtividade. Todavia, esta técnica determina um conhecimento aprofundado das respostas das diferentes culturas ao estresse hídrico, uma vez que a tolerância varia de acordo com as suas características. O avanço da performance dos sistemas de irrigação e o aperfeiçoamento do manejo da irrigação são essenciais para aumentar a produtividade da água e tornar a agricultura irrigada sustentável, já que a disponibilidade de água para a irrigação se restringe cada vez mais (VAZIFEDOUST et al., 2008).

4.4 Determinação do fator de resposta da cultura do milho (Ky)

Nas Figura 15 e Figura 16 são apresentadas as relações entre quebra da produtividade relativa e o déficit de evapotranspiração durante todo o ciclo da cultura do milho ao longo das duas safras, para produtividade de fitomassa para silagem e grãos, respectivamente.

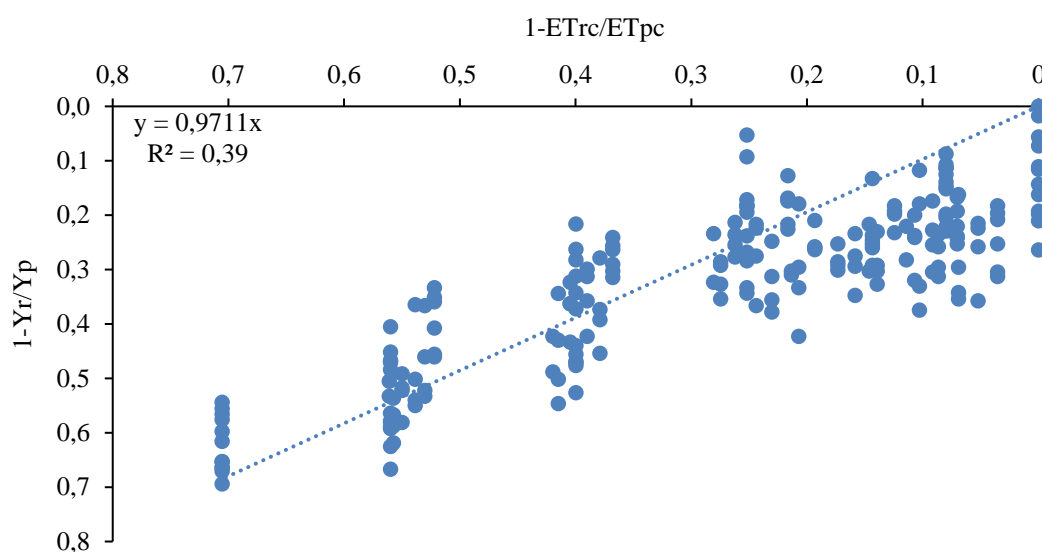


Figura 15 - Redução relativa da produtividade [$1 - (Y_r/Y_m)$] em função do déficit relativo de evapotranspiração [$1 - (ET_{rc}/ET_{pc})$] para produção de fitomassa de silagem de milho.

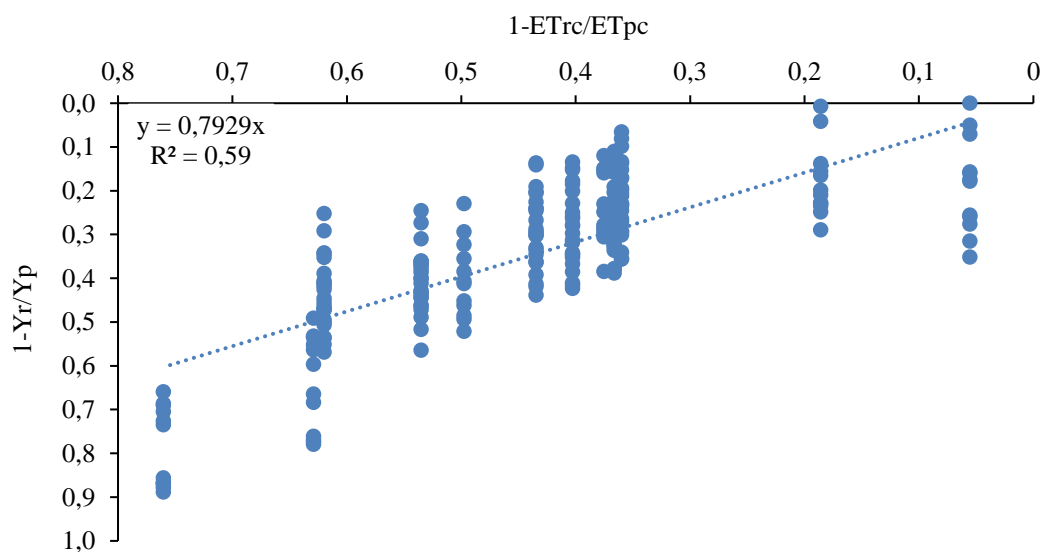


Figura 16 - Redução relativa da produtividade [$1 - (Y_r/Y_m)$] em função do déficit relativo de evapotranspiração [$1 - (ET_{rc}/ET_{pc})$] para produção de grãos da cultura do milho.

Ajustando-se o modelo linear, os valores de K_y geral, para silagem e grãos, respectivamente, foram de 0,97 e 0,79. O maior valor de K_y na produção de silagem, possivelmente, se deve à planta de milho se encontrar em fases fenológicas consideradas críticas, ou seja, durante o período de floração à maturidade fisiológica. Segundo Frey (1982), o período mais crítico para a formação do rendimento ao longo do ciclo do milho inicia-se em, aproximadamente, duas semanas antes do período ideal para silagem e continua até duas a três semanas após esse período. Com isso, a cultura torna-se mais sensível ao estresse hídrico, sendo

essa sensibilidade classificada de baixa a média, de acordo com Doorenbos e Kassam (1979). Os autores ainda afirmam que, quando o déficit é imposto nas fases de crescimento vegetativo e maturação dos grãos, espera-se uma menor redução no rendimento relativo das culturas.

Resultados semelhantes foram obtidos em outros estudos avaliando a resposta da cultura do milho a diferentes níveis de déficit hídrico. Istanbuluoglu et al. (2002) obtiveram um Ky médio de 0,76; Karam et al. (2003) relataram um valor de Ky igual a 0,81; Dagdelen et al. (2006) obtiveram um Ky médio de 1,04; Mengü e Özgürel (2008) encontraram um valor de Ky médio igual a 0,99; e Dagdelen et al. (2008) obtiveram um valor de Ky médio de 1,02.

É importante destacar que o valor de Ky pode variar de acordo com o estágio de desenvolvimento em que se encontra a cultura. Almeida (2016), em estudo avaliando diferentes lâminas de irrigação (déficit e excesso) na cultura do milho, encontrou um valor de Ky geral de 0,80, indicando tolerância ao déficit hídrico. Todavia, quando a deficiência hídrica foi imposta em fases fenológicas específicas, os maiores valores de Ky foram encontrados no período de pendoamento (1,88) e floração (1,26), demonstrando uma sensibilidade ao déficit hídrico; e o menor valor (0,40) foi observado no período de florescimento, apresentando tolerância ao déficit. De acordo com Claasen e Shaw (1970), existe uma alta significância entre o déficit hídrico e o rendimento de grãos, sobretudo quando o estresse ocorre na fase do florescimento.

Por outro lado, observa-se que os valores de Ky encontrados no presente estudo diferem substancialmente do valor definido pelo FAO (1,25), indicando que, nas condições experimentais, a cultura do milho foi relativamente tolerante ao déficit hídrico. O valor reduzido de Ky, nas condições do presente estudo, pode ser relacionado à técnica utilizada de *line-source*. Nesse sistema, o perfil de distribuição da água promove uma variação da lâmina de irrigação a nível de dossel (lâminas registradas em coletores), sendo maior quanto mais próximo ao aspersor. Todavia, a variação do teor de água no solo tende a ser menor, uma vez que se tem um processo de redistribuição, o que tenderia a acarretar menor variação na ETrc em relação à considerada na metodologia empregada. Sendo assim, espera-se uma subestimativa do valor da ETrc, uma vez que a mesma foi definida pelo somatório da chuva efetiva e lâmina média de irrigação.

Alguns autores relataram valores de Ky próximos ao estimado pela FAO, não corroborando os resultados do presente estudo. Irmak et al. (2016) relataram um valor de Ky médio de 1,14. Gencoglan (1996) obteve um valor de Ky médio igual a 1,23. Já Çakir (2004) encontrou um valor de ky médio igual a 1,29. Entretanto, no último caso, ao se considerar o valor de Ky geral por ano, o autor observou um valor mais alto de Ky (1,36) durante a estação

de seca severa (1996), em que a precipitação foi de apenas 49 mm, e um valor de K_y inferior (0,81) em 1997, em que a taxa total de precipitação excedeu 200 mm.

Segundo Vaux e Pruitt (1983), é necessário conhecer não apenas os valores de K_y estimado para a cultura, mas, também, aqueles específicos para determinadas condições edafoclimáticas. Isso ocorre pelo fato do valor de K_y ser afetado por outros fatores além da deficiência de água no solo, como por exemplo, propriedades do solo, clima, duração do estágio fenológico e uso de manejo inadequado. Além disso, a avaliação dos dados a nível de campo causa certa dispersão dos valores de K_y , principalmente devido ao erro experimental.

Deve-se ressaltar que ainda não há valores padrão de coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico. Dessa forma, novos experimentos devem ser realizados, buscando aprofundar a investigação acerca do fator de resposta da cultura do milho.

4.5 Avaliação da viabilidade financeira do experimento

Calculou-se a receita líquida (RL) alcançável nas condições do experimento, a qual representa o valor obtido com a venda da produção, ou seja, a receita bruta menos os custos totais levantados na condução do experimento, ao longo do ciclo da cultura do milho.

Para o cálculo da receita bruta em cada nível de irrigação, demonstrado no Apêndice I (Tabela 18), considerou-se o preço da tonelada por hectare da silagem de R\$ 180,00 e o preço da saca (60 kg) do grão de R\$ 37,64, ambos considerando a cotação na região referente ao mês de setembro de 2019. Vale destacar que, no ano de 2019, houve uma valorização acentuada da produção de silagem.

O custo total, que representa a soma dos custos fixos e variáveis, oscilou conforme a lâmina de irrigação aplicada, devido à variação do custo operacional da irrigação. O custo fixo total foi de R\$ 938,83 ha^{-1} . Já o CV1 (Tabela 4) totalizou R\$ 2588,28 ha^{-1} e R\$ 2750,91 ha^{-1} para produção de silagem e grãos de milho, respectivamente.

Nos valores relativos ao CV2, apresentados no Apêndice I (Tabela 19), foram determinados o requerimento de energia e gasto sazonal com energia para cada lâmina de irrigação, por unidade de área, durante o ciclo da cultura do milho.

Para a variável receita líquida da produção de silagem, a lâmina de irrigação proporcionou efeito quadrático (Figura 17), com um coeficiente de determinação de 0,92. A maior receita líquida, R\$ 4.938,92 ha^{-1} , foi obtida com a aplicação de 377,0 mm, correspondente à lâmina máxima de irrigação e ao maior rendimento de silagem obtido.

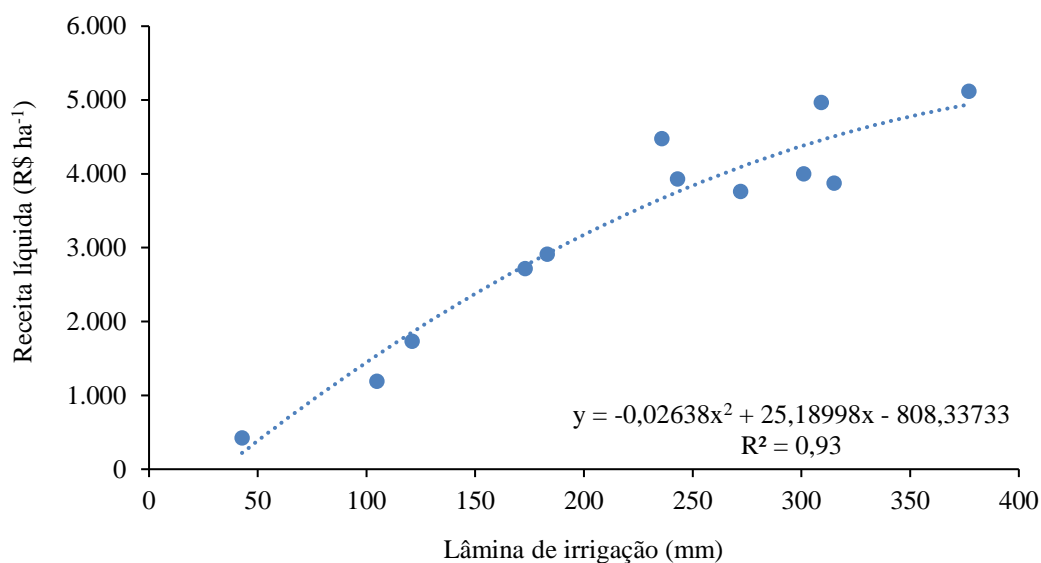


Figura 17 - Regressão para receita líquida (R\$ ha⁻¹) para produção de silagem de milho em função da lâmina de irrigação (mm).

Esses resultados não corroboram os de Martin et al. (2012) em que, avaliando a produção de silagem de milho submetida à diferentes estratégias de manejo de irrigação plena e deficitária (A1, Irrigação plena; A2, déficit hídrico leve e A3; déficit hídrico moderado), verificaram um maior retorno econômico com as estratégias de irrigação deficitária em relação a irrigação plena. Isso pode ser explicado pelo fato de que quanto maior for a lâmina aplicada, maior será a participação percentual da irrigação na receita líquida.

Nota-se que a produção de silagem gerou uma receita líquida positiva nas condições em que se realizou o estudo, demonstrando a viabilidade financeira dessa atividade.

Para a produção de grãos, observou-se que a lâmina de irrigação proporcionou efeito quadrático sob a receita líquida (Figura 18), apresentando tendência crescente com o incremento das lâminas até 371,9 mm, associado ao valor máximo de retorno, R\$ 654,20 ha⁻¹.

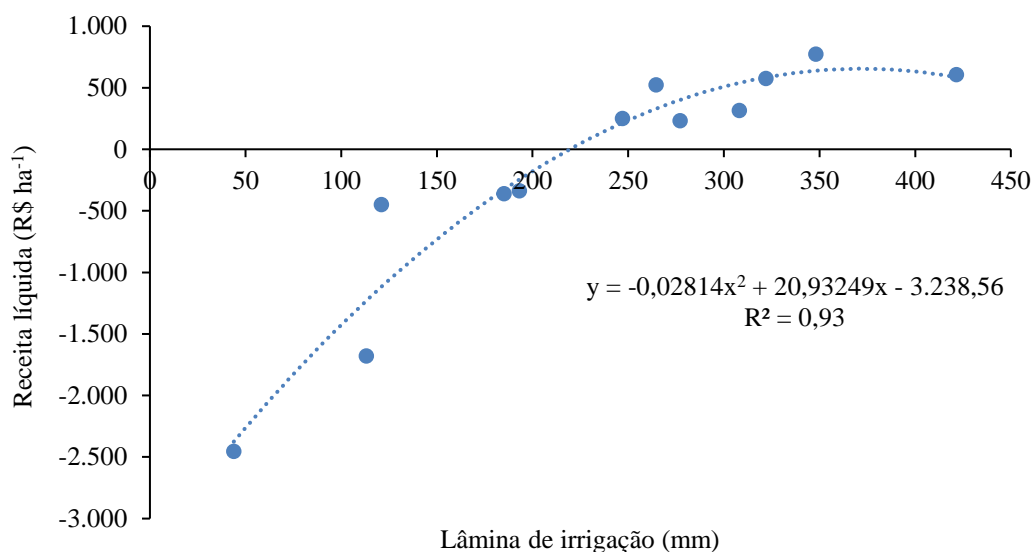


Figura 18 - Regressão para receita líquida (R\$ ha⁻¹) para produção de grãos de milho em função da lâmina de irrigação (mm).

Nota-se que a máxima receita líquida não corresponde à lâmina máxima de irrigação, como foi observado na silagem. Todavia, esse valor representa a maior produtividade de grãos atingida. Segundo Lima Júnior et al. (2011), geralmente o rendimento máximo da cultura não corresponde à maior receita líquida obtida, principalmente em função do sistema de irrigação exibir elevados custos de operação e implantação. Os resultados obtidos no presente estudo corroboram os de Heinemann et al. (2001) em que, avaliando a lâmina ótima de água para cultura do milho doce na região de Sete Lagoas, observaram que a lâmina correspondente ao máximo rendimento físico apresentou a maior receita líquida, com um total de R\$ 948,62 ha⁻¹.

Nesse cenário, também verificou-se em ambos os anos que, em níveis de irrigação inferiores, ou seja, L5 e L6, a receita líquida foi negativa, indicando que os tratamentos não apresentaram viabilidade financeira no presente estudo. Isso pode ser explicado pelo fato da planta de milho apresentar baixa produtividade devido ao déficit hídrico mais elevado. No momento em que se aplicou uma lâmina média de 219,5 mm, a receita passou a ser positiva e a produção de grãos viável.

Os resultados demonstram que a viabilidade financeira da irrigação subótima na cultura do milho é dependente dos preços da commodity e do rendimento da cultura, os quais são considerados fatores determinantes para obtenção de retornos econômicos satisfatórios (KLOCKE et al., 2012). Rodrigues et al. (2013), em estudo comparando o retorno econômico da irrigação plena e irrigação deficitária na cultura do milho, empregando sistemas de irrigação por gotejamento e aspersão (pivô central e aspersion setorial), verificaram, para todos os cenários

avaliados, que a viabilidade das estratégias de irrigação deficitária é extremamente dependente dos preços de comercialização da produção.

É importante ressaltar que os custos de produção de milho dependem essencialmente do nível tecnológico empregado pelo produtor e da variação anual da cotação dos insumos de produção. Além disso, essa variação pode se dar em função do sistema de cultivo, práticas de manejo, a cultivar e épocas de semeadura (SANGOI et al., 2006; FORSTHOFER et al., 2006).

De acordo com Fancelli e Dourado (2000), o uso de irrigação na cultura do milho pode ser economicamente viável quando o fator limitante é a água e, ou o preço de venda do produto é favorável. Isso permite a minimização de risco e estabilidade no rendimento da cultura.

5 CONCLUSÕES

Nos anos de 2018 e 2019 não verificou-se diferenças significativas para a interação consórcio e lâmina de irrigação, nem para o fator isolado consórcio, em relação à produtividade de silagem e de grãos de milho e à produtividade da água.

O fator lâmina de irrigação é significativo sobre a produtividade de silagem e de grãos de milho e a produtividade da água. Apenas no ano de 2019 não verificou-se significância desse fator para produtividade de fitomassa seca de material para silagem.

Apesar da redução de produtividade da cultura, utilizando-se determinados níveis de irrigação em relação à ET_0 (%) não se verificou diferença estatística, em relação aos valores de produtividade obtidos com a irrigação plena. Para produção de silagem, a redução da irrigação pode chegar a 59% da ET_0 , em ambos os anos. Já para produção de grãos, os níveis de redução da irrigação puderam alcançar 48% e 51% da ET_0 nos anos de 2018 e 2019, respectivamente.

O uso de irrigação subótima, a partir da aplicação de lâminas menores que a requerida pela cultura do milho, resulta em maior produtividade da água para a produção de fitomassa seca de silagem e de grãos.

Os valores de K_y estimados para produção de silagem e grãos de milho indicam baixa a média sensibilidade ao déficit hídrico imposto à planta.

A produção de silagem proporciona uma receita líquida positiva em todos os níveis de irrigação, obtendo uma receita líquida máxima de R\$ 4.938,92 ha^{-1} , com aplicação da lâmina máxima de irrigação (377 mm). Para a produção de grãos, a aplicação de uma lâmina de irrigação inferior à 219,5 mm resulta em uma receita líquida negativa e a máxima receita líquida, R\$ 654,20 ha^{-1} , foi obtida com a aplicação de 371,9 mm.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada / Agência Nacional de Águas**. Brasília: ANA, 2017. 86 p.

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

ALBUQUERQUE, P.E.P. de; RESENDE, M. **Manejo de Irrigação**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2009. (Embrapa Milho e Sorgo. Sistema de produção, 2).

ALENCAR, C.A.B. **Produção de seis gramíneas forrageiras tropicais submetidas a diferentes lâminas de água e doses de nitrogênio, na região Leste de Minas Gerais**. 2007. 137f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D., SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300p. (FAO. Irrigation and drainage paper, 56).

ALLEN, V.G.; BAKER, M.T.; SEGARRA, E.; BROWN, C.P. Integrated irrigated crop-livestock systems in dry climates. **Agronomy Journal**, v.99, p.346-360, 2007.

ALMEIDA, A.C.S.; BONIFÁCIO, J.; PUSCH, M.; OLIVEIRA, F.C.; GESEINHOFF, L.O.; BISCARO, G.A. Produtividade e eficiência de uso da água em milho cultivado com diferentes estratégias de manejo hídrico. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.11, n.3, p.1448-1457, 2017.

ALMEIDA, B.M. de. **Déficit e excesso hídrico na cultura do milho (*Zea mays* L.) em ambiente protegido**. 2016. 124f. Tese (Doutorado em Ciências), 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: XLII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola – CONBEA, 2013. **Anais**. Fortaleza: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2013.

ALMEIDA FILHO, S.L.; FONSECA, D.M.; GARCIA, R.; OBEID, J.A.; OLIVEIRA, J.S. Características agronômicas de cultivares de milho (*Zea mays* L.) e qualidade dos componentes da silagem. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.28, p.7-13, 1999.

ALVARENGA, R.C.; COBUCCI, T.; KLUTHCOUSKI, J.; WRUCK, F.J.; CRUZ, J.C.; GONTIJO NETO, M.M. **A cultura do milho na integração lavoura-pecuária**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2006. 12 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular técnica, 80).

ALVARENGA, R.C.; GONTIJO NETO, M.M.; BORGHI, E.; BASTOS, L.M. Consórcio milho-braquiária num sistema de integração lavoura-pecuária: rendimentos do décimo primeiro ano. In: XXXI CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO. Inovações, mercados e segurança alimentar. **Anais...** Bento Gonçalves, Rio Grande do Sul, 2016.

ALVARENGA, R.C.; NOCE, M.A. **Integração lavoura-pecuária**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2005. 16 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Documentos, 47).

ALVES, B.M.; CARGNELUTTI FILHO, A.; BURIN, C.; TOEBE, M.; SILVA, L.P. da. Divergência genética de milho transgênico em relação à produtividade de grãos e da qualidade nutricional. **Ciência Rural**, v.45, n.5, p.884-891, 2015.

AMARAL, T.A.; ANDRADE, C. de L.T. de; SOUZA, V.F. de; PAIXÃO, J. de S. **Resposta de Cultivares de Milho ao Estresse Hídrico**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2016. 25 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Documentos, 207).

AMBROSI, I.; SANTOS, H.P.; FONTANELI, R.S.; ZOLDAN, S.M. Lucratividade e risco de sistemas de produção de grãos combinados com pastagens de inverno. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, p.1213-1219, 2001.

ANDRADE, C. de L.T. de; ALBUQUERQUE, P.E.P.; BRITO, R.A.L.; RESENDE, M. **Viabilidade e Manejo da Irrigação da Cultura do Milho**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2006, 12 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 85)

ANDRADE, C. de L.T. de; BRITO, R.A.L. Irrigação: viabilidade de irrigação de milho. In: CRUZ, J.C. (Ed.). **Cultivo do milho**. 5. ed. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2009. (Embrapa Milho e Sorgo. Sistemas de Produção, 1).

ANDRADE, E.M. de. A irrigação e suas implicações sobre o capital natural em regiões áridas e semi-áridas: uma revisão. **Revista Ceres**, v.56, p.390-398, 2009.

ANDRADE, F.H. Analysis of growth and yield of maize, sunflower and soybean grown at Balcarce, Argentina. **Field Crops Research**, v.41, n.1, p.1-12, 1995.

ARAYA, A.; STROOSNIJDER, L.; GIRMAY, G.; KEESSTRA, S.D. Crop coefficient, yield response to water stress and water productivity of teff (*Eragrostis tef* (Zucc.)). **Agricultural Water Management**, n.98, p.775-783, 2011.

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DO MILHO - ABIMILHO. Oferta e Demanda do Milho – Brasil. Disponível em: <http://www.abimilho.com.br/estatisticas>. Acesso em: 17 set. 2019.

BALBINO, L.C.; CORDEIRO, L.A.M.; PORFÍRIDA-SILVA, V.; MORAES, A.D.; MARTÍNEZ, G.B.; ALVARENGA, R.C.; KICHEL, A.N.; FONTANELI, R.S.; SANTOS, H.P.; FRANCHINI, J.C.; GALERANI, P.R. Evolução tecnológica e arranjos produtivos de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, n.10, p.1-12, 2011.

BARROS, J.F.C.; CALADO, J.G. **A Cultura do Milho**. Évora, 2014. 52p.

BELONI, T.; SANTOS, P.M.; ROVADOSCKI, G.A.; BALACHOWSKI, J.; VOLAIRE, F. Large variability in drought survival among *Urocloa* spp. cultivars. **Grass and Forage Science**, v.73, n.4, p.1-11, 2018.

BENJAMIN, J.G.; NIELSEN, D.C.; VIGIL, M.F.; MIKHA, M.M.; CALDERON, F. Water deficit stress on corn (*Zea mays* L.) root: shoot ratio. **Journal of Soil Science**, v.4, p.151-160, 2014.

BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G.A.; BERGONCI, J.I.; BIANCHI, C.A.M.; MÜLLER, A.G.; COMIRAN, F.; HECKLER, B.M.M. Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 9, p. 831-839, 2004.

BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G.A.; COMIRAN, F.; BERGONCI J.I.; MÜLLER, A.G.; FRANÇA, S.; SANTOS, A.O.; RADIN, B.; BIANCHI, C.A.M.; PEREIRA, P.G. Deficit hídrico e produtividade na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, n.2, p.243-249, 2006.

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

BERNARDO, S.; SOARES, A.A; MANTOVANI, E.C. **Manual de irrigação**. 8.ed. Viçosa: UFV, p.361-570, 2006.

BLANCO, F.F.; CARDOSO, M.J.; FREIRE FILHO, F.R.; VELOSO, M.E.C.; NOGUEIRA, C.C.P.; DIAS, N.S. Milho verde e feijão caupí cultivados em consórcio sob diferentes lâminas de irrigação e doses de fósforo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, n.5, p.524-530, 2011.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO – BNDES. Pronamp. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/pronamp-investimento>. Acesso em: 20 nov. 2019.

BOGGIONE, I.M. **Avaliação da viabilidade técnica e financeira do cultivo de milho irrigado em diferentes regiões de minas gerais utilizando modelagem computacional**. 2014. 105f. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias), Universidade Federal de São João Del-Rei, Sete Lagoas, 2014.

BORGHI, E.; COSTA, N. V.; CRUSCIOL, C. A. C.; MATEUS, G. P. Influência da distribuição espacial do milho e da *Brachiaria brizantha* consorciados sobre a população de plantas daninhas em sistema de plantio direto na palha. **Planta Daninha**, v.26, n.3, p.559-568, 2008.

BORGHI, E.; CRUSCIOL, C.A.C. Produtividade de milho, espaçamento e modalidade de consorciação com Brachiária brizantha em sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, n.2, p.163-171, 2007.

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.

CARLESSO, R. **La agricultura de precisión y los sistemas de riego**. Perú: Cyted, 2008. Disponível em: <https://www.ceer.isa.utl.pt/cyted/peru2008/>. Acesso em: 20 mai. 2018.

CECCON, G.; BORGHI, E.; CRUSCIOL, C.A.C. Modalidades e Métodos de Implantação do Consórcio Milho-Braquiária. In: CECCON, G. (Ed.). **Consórcio milho-braquiária**. Brasília, DF: EMBRAPA, p.27-46, 2013.

CECCON, G.; CONCENÇO, G.; BORGHI, E.; DUARTE, A.P.; SILVA, A.F.; KAPPES, C.; ALMEIDA, R.E.M. **Implantação e manejo de forrageiras em consórcio com milho safrinha**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2015. (Embrapa Agropecuária Oeste. Documentos, 131).

CECCON, G.; RICHETTI, A.; SEREIA, R. C.; LUIZ NETO NETO, A.; FONSECA, I. C.; LEITE, L. F. Safrinha em SPD nas condições do Mato Grosso do Sul. **Granja**, n.753, p.63-65, 2011.

CECCON, G.; SAGRILO, E.; FERNANDES, F.M.; MACHADO, L.A.Z.; STAUT, L.A.; PEREIRA, M.G.; BACKES, C.F.; ASSIS, P.G.G. de; SOUZA, G.A. de. Milho safrinha em consórcio com alternativas de outono-inverno para produção de palha e grãos, em Mato Grosso do Sul, em 2005. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE MILHO SAFRINHA, 8., 2005, Assis. **Anais...** Campinas: Instituto Agrônomo, p.361-366, 2005.

CINTRA, J.E.; FERREIRA, G.H.; BRASIL, R.P.C. do. Viabilidade da irrigação suplementar na fase inicial de desenvolvimento da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) em regiões com déficit hídrico. **Nucleus**, Edição Especial, 2008.

CLAASEN, M.M.; SHAW, R.H. Water deficit effects on grain. II. Grain components. **Agronomy Journal**, v.62, p.652-655, 1970.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS - CEMIG. Valores de tarifa e serviços. Disponível em: https://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/Paginas/valores_de_tarifa_e_servicos.aspx. Acesso em: 11 nov. 2019.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos: Safra 2019/20 - Segundo levantamento**. Brasília: v.7, p.1-110, 2019.

COUTINHO, M.J.F.; CARNEIRO, M.S.S.; EDVAN, R.L.; PINTO, A.P. **A pecuária como atividade estabilizadora no semiárido brasileiro**. Fortaleza: FUNDAJ, 2013. Disponível em: <https://www.fundaj.gov.br/images/stories/observafundaj/a-pecuaria-como-atividade-estabilizadora-no-semiarido-brasileiro.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2020.

CRUZ, J.C.; PEREIRA FILHO, I.A. Cultivares de milho para silagem. In: CRUZ, J.C.; PEREIRA FILHO, I.A.; RODRIGUEZ, J.A.S.; FERREIRA, J.J. (Ed.). **Produção e utilização de silagem de milho e sorgo**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, p.11-38, 2001.

CRUZ, S.C.S; PEREIRA, F.R.S.; BICUDO, S.J.; SANTOS, J.R.; ALBUQUERQUE, A.W.; MACHADO, C.G. Consórcio de milho e *Brachiaria decumbens* em diferentes preparos de solo. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.31, n.4, p.633-639, 2009.

DAGDELEN, N.; YILMAZ, E.; SEZGIN, F.; GÜRBÜZ, T. Water-yield relation and water use efficiency of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) and second crop corn (*Zea mays* L.) in western Turkey. **Agricultural Water Management**, v.82, p.63-85, 2006.

DAGDELEN, N.; GÜRBÜZ, T.; SEZGIN, F.; YILMAZ, E.; YESILIRMAKA, E.; AKÇAYA, S. Effect of different water stress on the yield and yield components of second crop corn in semiarid climate. **International Meeting on Soil Fertility Land Management and Agroclimatology**, p.815-826, 2008.

DAHER, R.F.; RODRIGUES, E.V.; ARAÚJO, M.S.B. de.; PINHEIRO, L.S.; GRAVINA, G.A.; LÉDO, F.J.S.; PEREIRA, A.V. Variação sazonal na produção de forragem de clones intra e interespecíficos de capim-elefante. **Revista Agrarian**, v.10, n.38, p. 294-303, 2017.

DAN, H.A.; OLIVEIRA JR, R.S.; CONSTANTIN, J.; DAN, L.G.M.; OLIVEIRA NETO, A.M.; GUERRA, N.; BR, G.B.P.; JUMES, T. Supressão imposta pelo mesotriene a *Brachiaria brizantha* em sistema de integração lavoura-pecuária. **Planta Daninha**, v.29, n.4, p.861-867, 2011.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 193 p. (FAO. Irrigation and Drainage, Paper 33).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Soluções tecnológicas. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-solucoes-tecnologicas/-/produto-servico>. Acesso em: 20 mai. 2019.

ENGLISH, M.; NAVAID, S. Perspectives on deficit irrigation. **Agricultural Water Management**, v.32, p.1-14. 1996.

FANCELLI, A.L.; DOURADO NETO, D. **Produção de Milho**. Guaíba: Agropecuária, 2000. 360p.

FANCELLI, A.L.; DOURADO NETO, D. **Produção de Milho**. 2 ed. Guaíba: Agropecuária, 2004. 360p.

FARIAS, R.A. de.; SOARES, A.A.; SEDIYAMA, G.C.; RIBEIRO, C.A.A.S. Demanda de irrigação suplementar para a cultura do milho no Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.4, n.1, p.46-50, 2000.

FARIAS, T.R.R. **Manejo de solo e água no desempenho agrônomico de genótipos de trigo no Brasil Central**. 2012. 69 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Universidade de Brasília, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Brasília, 2012.

FERREIRA, VF. Fisiologia da planta de milho. 2009. Disponível em: <http://www.consciencia.net/2003/10/19/glifosato.html>. Acesso em: 20 out. 2019.

FERREIRA, W.P.M.; SOUZA, C.F. **Caracterização climática das séries temporais de temperatura e precipitação pluvial em Sete Lagoas, MG**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2011. 33 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 35).

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. **Agricultura Irrigada Sustentável no Brasil: Identificação de Áreas Prioritárias**. Brasília: FAO, 2017. 243p.

FONTANELI, R.S.; AMBROSI, I.; SANTOS, H.P.; IGNACZAK, J.C.; ZOLDAN, S.M. Análise econômica de sistemas de produção de grãos com pastagens anuais de inverno, em sistema de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, p.2129-2137, 2000.

FORSTHOFER, E.L.; SILVA, P.R.F.; STRIEDER, M.L.; MINETTO, T.; RAMBO, L.; ARGENTA, G.; SANGOI, L.; SUHRE, E.; SILVA, A.A. Desempenho agrônomo e econômico do milho em diferentes níveis de manejo e épocas de semeadura. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, n.3, p.399-407, 2006.

FREITAS, F.C.L.; FERREIRA, L.R.; FERREIRA, F.A.; SANTOS, M.V.; AGNES, E.L.; CARDOSO, A.A.; JAKELAITIS, A. Formação de pastagem via consórcio de Brachiaria brizantha com o milho para silagem no sistema de plantio direto. **Planta Daninha**, v.23, n.1, p.49-58, 2005.

FREY, N.M. Dry matter accumulation in kernels of maize. **Crop Science**, v.21, p.118-122, 1982.

FRIZZONE, J.A. Planejamento da irrigação com uso de técnicas de otimização. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.1, n.1, p.24-49, 2007.

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

FRIZZONE, J.A.; BOTREL, T. A; FREITAS, H.A.C. Análise comparativa dos custos de irrigação por pivô-central, em culturas de feijão, utilizando energia elétrica e óleo diesel. **Engenharia Rural**, v.5, n.1, p.34-53, 1994.

GALVÃO, J.C.C.; BORÉM, A.; PIMENTEL, M.A. **Milho: do plantio à colheita**. Viçosa, MG: UFV, 2015. 351 p.

GARCIA, C.M.P.; ANDREOTTI, M.; CARVALHO, M.T.F.; BUZETTI, M.S.; SOUZA, C.T.; MASCARENHAS, L.; KENY, S. Desempenho agrônomo da cultura do milho e espécies forrageiras em sistema de Integração Lavoura-Pecuária no Cerrado. **Ciência Rural**, v.43, n.4, p.589-595, 2013.

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

GENCOGLAN, C. **Water yield relations on maize, determination of crop water stress index an root distribution and validation of the Ceres-Maize growth model**. 1996. Tese (Doutorado), Cukurova University Institute of Natural and Applied Sciences, 1996.

HANKS, R.J.; KELLER, J.; RASMUSSEN, V.P.; WILSON, G.D. Line source sprinkler for continuous variable irrigation-crop production studies. **Soil Science Society of America Journal**, v.40, n.3, p.426-429, 1976.

HANKS, R.J.; SISSON, D.V.; HURST, R.L.; HUBBARD, K.G. Statistical analysis of results from irrigation experiments using the *line-source sprinkler system*. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, p.886-888, 1980.

HEINEMANN, A.B.; SOUSA, S.A.V. de; FRIZZONE, J.A. Determinação da lâmina ótima de água para cultura do milho doce na região de Sete Lagoas, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.5, n.1, p.147-151, 2001.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Censo Agropecuário 2006: Brasil, Grandes Regiões e Unidades da Federação**. Segunda apuração. Rio de Janeiro. 2012.

INSTITUTO PARA O FORTALECIMENTO DA AGROPECUÁRIA DE GOIÁS – IFAG. Disponível em: <http://ifag.org.br/>. Acesso em 17 nov. 2019.

INSTITUTO MATO-GROSSENSE DE ECONOMIA AGROPECUÁRIA – IMEA. Disponível em: <http://www.imea.com.br/imea-site/relatorios-mercado-detalhe?c=3&s=3>. Acesso em: 15 nov. 2019.

IRMAK, S.; DJAMAN, K.; RUDNICK, D.R. Effect of full and limited irrigation amount and frequency on subsurface drip-irrigated maize evapotranspiration, yield, water use efficiency and yield response factors. **Irrigation Science**, v.34, p.271-286, 2016.

ISTANBULLUOGLU, A.; KOCAMAN, I.; KONUKCU, F. Water use-production relationship of maize under Tekirdag conditions in Turkey. **Pakistan Journal of Biological Sciences**, v.5, p.287-291, 2002.

JAKELAITIS, A.; DANIEL, T.A.D.; ALEXANDRINO, E.; SIMÕES, L.P.; SOUZA, K.V.; LUDTKE, J. Cultivares de milho e de gramíneas forrageiras sob monocultivo e consorciação. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.40, p.380- 387, 2010.

JAKELAITIS, A.; SILVA, A.F.; SILVA, A.A.; FERREIRA, L.R.; FREITAS, F.C.L; VIANA, R.G. Influência de herbicidas e de sistemas de semeadura de *Brachiaria brizantha* consorciada com milho. **Planta daninha**, v.23, n.1, p.59-67, 2005.

KARAM, F.; BREIDY, J.; STEPHAN, C.; ROUPHAEL, J. Evapotranspiration, yield and water use efficiency of drip irrigated corn in the Bekaa Valley of Lebanon. **Agricultural Water Management**, v.63, p.125-137, 2003.

KIRCHNER, J.H.; ROBAINA, A.D.; PEITER, M.X.; TORRES, R.R.; MEZZOMO, W.; BEN, L.W.B.; PIMENTA, B.D.P.; PEREIRA, A.C. Funções de produção e eficiência no uso da água em sorgo forrageiro irrigado. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.14, n.2, 2019.

KLOCKE, N.L.; CURRIE, R.S.; TOMSICEK, D.J.; KOEHN, J.W. Sorghum yield response to deficit irrigation. **Transaction of the ASABE**, v.55, n.3, p.947-955, 2012.

KLUTHCOUSKI, J.; AIDAR, H. Uso da integração lavoura-pecuária na recuperação de pastagens degradadas. In: KLUTHCOUSKI, J.; STONE, L.F.; AIDAR, H. (Ed.). **Integração lavoura-pecuária**. 1.ed. Santo Antonio de Goiás, Embrapa Arroz e Feijão, p.185-223, 2003.

KLUTHCOUSKI, J.; COBUCCI, T.; AIDAR, H.; YOKOYAMA, L.P.; OLIVEIRA, I.P.; COSTA, J.L.S.; SILVA, J.G.; VILELA, L.; BARCELLOS, A.O.; MAGNABOSCO, C.U. **Sistema Santa Fé - tecnologia Embrapa: integração lavoura pecuária pelo consórcio de culturas anuais com forrageiras, em áreas de lavoura, nos sistemas plantio direto e convencional**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2000. 28p. (Embrapa Arroz e Feijão. Circular Técnica, 38).

KUNTZ, R.P. **Produtividade do milho em função do arranjo e da população de plantas no sistema de plantio direto na palha**. 2005. 115p. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2005.

KURIHARA, C.H.; CECCON, G.; TROPALDI, L. Resposta de milho safrinha em cultivo solteiro ou consorciado com *Brachiaria ruziziensis* à adubação nitrogenada e potássica, em Mato Grosso do Sul. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE MILHO SAFRINHA, 10., 2009, Rio Verde. **Anais...** Rio Verde: FESURV, p.563-570, 2009.

LANDAU, E.C.; MAGALHÃES, P.C.; GUIMARÃES, D.P. Milho: relações com o clima. 2017. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/milho/arvore/CONTAG01_17_168200511157.html. Acesso em: 20 ago. 2019.

LANDAU, E.C.; SANS, L.M.A.; SANTANA, D.P. Clima e solo. In: CRUZ, J.C. (Ed.). **Cultivo do milho**. 5. ed. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2009. (Embrapa Milho e Sorgo. Sistemas de Produção, 1).

LIMA, J.E.F.W.; FERREIRA, R.S.A; CRISTOFIDIS, D. O uso da Irrigação no Brasil. In: Freitas, M. A V. **O Estado das Águas no Brasil**. MME, MMA/SRH, OMM, p.73-101, 1999. LIMA JÚNIOR, J.A. de; SILVA, A.L.P. da; GUEDES, M.G.M. Avaliação da qualidade de raízes de cenouras em função do manejo de irrigação. **Enciclopédia Biosfera**, v.7, n.12, p.1-7, 2011.

LOSS, A.; PEREIRA, M.G.; GIÁCOMO, S.G.; PERIN, A.; ANJOS, L.H.C. Agregação, carbono e nitrogênio em agregados do solo sob plantio direto com integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, n.10, p.1269-1276, 2011.

MACEDO, M.C.M. Integração lavoura e pecuária: o estado da arte e inovações tecnológicas. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.38, p.133-146, 2009.

MAGALHÃES, P.C.; SOUZA, T.C. Ecofisiologia. In: PEREIRA FILHO, I.A. (Ed.). **Cultivo do Milho**. 9. ed. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2009. (Embrapa Milho e Sorgo. Sistemas de Produção, 1).

MARQUES, P.A.A.; FRIZZONE, J.A. Modelo computacional para determinação do risco econômico em culturas irrigadas. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.27, n.4, p.719-727, 2005.

MARTIN, J.D.; CARLESSO, R.; AIRES, N.P.; GATTO, J.C.; DUBOU, V.; FRIES, H.M.; SCHEIBLER, R.B. Irrigação deficitária para aumentar a produtividade da água na produção de silagem de milho. **Irriga**, Edição Especial, p.192-205, 2012.

MASCHIO, R. **Produtividade da água em biomassa e energia para 24 variedades de cana-de-açúcar**. 2011. 88 f. Dissertação (Mestrado em Ciências), Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2011.

MECHI, I.A.; SANTOS, A.L.F.; FACHINELLI, R.; LEITE, E.M.; NARDI, J.L.; CECCON, G. Efeito de anos de consórcio milho safrinha com braquiária sobre a produtividade da soja em sucessão. In: XXXI CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO. Inovações, mercados e segurança alimentar. **Anais...** Bento Gonçalves, Rio Grande do Sul, 2016.

MEDRANO, H.; TOMÁS, M.; MARTORELL, S.; ESCALONA, J.M.; POU, A.; FUENTES, S.; BOTA, J. Improving water use efficiency of vineyards in semi-arid regions: a review. **Agronomy for Sustainable Development**, v.35, n.2, p.499-517, 2015.

MELLO, J.L.P.; SILVA, L.D.B. da. **Apostila de manejo da irrigação**. 2009. Disponível em: <http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/leonardo/downloads/APOSTILA/Apostila%20IT%20157/it157-Manejo2000.pdf>. Acesso em: 01 jun. 2018.

MELLO, R.; NORBERG, J. L. Fracionamento dos carboidratos de silagens de milho, sorgo e girassol. **Ciência Rural**, v.34, n.5, p.1537-1542, 2004.

MELO, M.L.A. DE.; CAMILO, J.A.; ANDRADE, C.L.T. DE.; AMARAL, T.A.; TIGGES, C.H.P. **Simulação da Produtividade Potencial de Silagem de Milho em Municípios de Minas Gerais**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2019. 23p. (Embrapa Milho e Sorgo. Documentos, 234).

MENDONÇA, F.C.; MEDEIROS, R.D.; BOTREL, T.A.; FRIZZONE, J.A. Adubação nitrogenada do milho em um sistema de irrigação por aspersão em linha. **Scientia Agricola**, v.56, n.4, p.1035-1044, 1999.

MENDONÇA, F.C.; RASSINI, J.B. **Método EPS para manejo da irrigação de forrageiras**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2009, 9p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 19).

MENDONÇA, V.Z. **Consociação de milho com forrageiras: produção de silagem e palha para plantio direto de soja**. 2012. 71 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Produção) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira. 2012.

MENGU, P.G.; OZGUREL, M. An evaluation of wateryield relations in maize (*Zea mays* L) in Turkey. **Pakistan Journal of Biological Sciences**, v.11, p.517-524, 2008.

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**, v.58, p.193-201, 2011.

MUNIZ, L.C.; FIGUEIREDO, R.S.; MAGNABOSCO, C.U.; WANDER, A.E.; MARTHA JÚNIOR, G.B. Análise de risco da integração lavoura e pecuária com a utilização do system dynamics. In: Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural, 45, Londrina. **Anais... SBEASR**, 2007.

NERY, J.T. Variabilidade interanual: Oscilação Sul El Niño. **Apontamentos**, n.75, 1998. 59p.

NEUMANN, M.; RESTLE, J.; BRONDANI, I.L. Avaliação de silagens de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) e milho (*Zea mays* L.) na produção do novilho superprecoce. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.3, n.3, p.438-452, 2004.

OLIVEIRA, I.P. de; KLUTHCOUSKI, J.; YOKOYAMA, L.P.; DUTRA, L.G.; PORTES, T. de A.; SILVA, A.E. da; PINHEIRO, B. da S.; FERREIRA, E.; CASTRO, E. da M.; GUIMARÃES, C.M.; GOMIDE, J. de C.; BALBINO, L.C. **Sistema Barreirão: recuperação/renovação de pastagens degradadas em consórcio com culturas anuais**. Goiânia: EMBRAPA CNPAF, 1996. 90p. (EMBRAPA- CNPAF. Documentos, 64).

PANOSO, L.A.; RAMOS, D.P.; BRANDÃO, M. Solos do Campo Experimental da Embrapa Milho e Sorgo: suas características e classificação no novo sistema brasileiro. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, n.5, 2002.

PANTANO, A.C. Semeadura de braquiária em consorciação com o milho em diferentes espaçamentos na integração agricultura- pecuária em plantio direto. 2003.60 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Sistema de Produção) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2003.

PARIZI, A.R.C.; ROBAINA, A.D.; GOMES, A.C.S.; SOARES, F.C.; RAMÃO, C.J.; PEITER, M.X.; CALEGARO, L. Efeito de diferentes estratégias de irrigação suplementar sobre a produção de grãos e seus componentes na cultura do milho. **Irriga**, v.14, n.3, p.254-267, 2009.

PATERNIANI, E.; NASS, L.L.; SANTOS, M.X. O valor dos recursos genéticos de milho para o Brasil: uma abordagem histórica da utilização do germoplasma. In: UDRY, C.W.; DUARTE, W. (Org.) **Uma história brasileira do milho: o valor dos recursos genéticos**. Brasília: Paralelo, v.15, p.11-41, 2000.

PAYERO, J.O.; TARKALSON, D.D.; IRMAK, S.; DAVISON, D.; PETERSEN, J.L. Effect of timing of a deficit irrigation allocation on corn evapotranspiration, yield, water use efficiency and dry mass. **Agricultural water management**, v.96, n.10, p.1387-1397, 2009.

PAZ, V.P.S.; TEODORO, R.E.F.; MENDONÇA, F.C. Recursos hídricos, agricultura irrigada e meio ambiente. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.4, n.3, p.465-473, 2000.

PAZIANI, S.F.; DUARTE, A.P.; NUSSIO, L.G.; GALLO, P.B.; BITTAR, C.M.M.; ZOPOLLATTO, M.; RECO, P.C. Características agronômicas e bromatológicas de híbridos de milho para produção de silagem. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.38, n.3, p.411-417, 2009.

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

PEREIRA, E.S.; MIZUBUTI, I.Y.; PINHEIRO, S.M.; VILLAROEL, A.B.S.; CLEMENTINO, R.H. Avaliação nutricional de silagens de milho. **Caatinga**, v.20, n.3, p.8-12, 2007.

PEREIRA, J.L.A.R.; VON PINHO, R.G.; SOUZA FILHO, A.X.; FONSECA, R.G.; SANTOS, A.O. Influência das características qualitativas dos componentes da planta de milho na degradabilidade da matéria seca da planta inteira. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.10, n.2, p.158-170, 2011.

PEREIRA, L.S., CORDERY, I., IACOVIDES, I. Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving. **Agricultural Water Manage**, v.108, p.39-51, 2012.

PEREIRA, L.S.; OWEIS, T.; ZAIRI, A. Irrigation management under water scarcity. **Agricultural Water Management**, v.57, p.175-206, 2002.

PEREIRA, L.S.; CORDERY, I.; IACOVIDES, I. **Coping with Water Scarcity: Addressing the Challenges**. Dordrecht: Springer, 2009. 382 p.

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

PORTES, T.A.; CARVALHO, S.I.C.; OLIVEIRA, I.P.; KLUTHCOUSKI, J. Análise do crescimento de uma cultivar de braquiária em cultivo solteiro e consorciado com cereais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, n.7, p.1349-1358, 2000.

QUEIROZ, T.M.D.; CARVALHO, J.A.; RABELO, G.F.; ANDRADE, M.J.B. Avaliação de sistema alternativo de automação da irrigação do feijoeiro em casa de vegetação. **Revista Engenharia Agrícola**, v.25, n.3 p.632-641, 2005.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, 2018.

RESENDE, A.V.; SHIRATSUCHI, L.S.; FONTES, J.R.A.; ARNS, L.L.K.; RIBEIRO, L.F. Adubação e arranjo de plantas no consórcio milho e braquiária. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.38, n.4, p.269-275, 2008.

REZENDE, R.S.; ANDRADE JÚNIOR, A.S. de. **Cana-de-açúcar: irrigação**. Brasília: Embrapa, 2007. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_56_711200516718.html. Acesso em: 20 mai. 2018.

RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ, V.V.H. (Ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. Viçosa: UFV, 1999. 359p.

RICHTER, L.A. Irrigação de pastagens. In: FONTANELI, RENATO. S.; SANTOS, H. P. dos.; FONTANELI, ROBERTO S. (Eds.). **FORAGEIRAS PARA INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA NA REGIÃO SUL BRASILEIRA**. 2. ed. Brasília: Embrapa, cap.17, p.487-507, 2012.

RODRIGUES, G.C.; PAREDES, P.; GONÇALVES, J.M.; ALVES, I; PEREIRA, L.S. Comparing sprinkler and drip irrigation systems for full and deficit irrigated maize using multicriteria analysis and simulation modelling: Ranking for water saving vs. farm economic returns. **Agricultural Water Management**, v.126, p.85-96, 2013.

SANGOI, L.; ERNANI, P.R.E.; SILVA, P.R.F.; HORN, D.; SCHIMITT.; SCHWEITZER, C.; MOTTER, F. Rendimento de grãos e margem bruta de cultivares de milho com variabilidade genética contrastante em diferentes sistemas de manejo. **Ciência Rural**, v.36, 2006.

SANTOS, G.; MORAES, J.M.M.; NUSSIO, L.G. Custo e análise de sensibilidade na produção de silagem. **Revista iPecege**, v.3, p.39- 48, 2017.

SANTOS, R.F.; CARLESSO, R. Enrolamento e expansão das folhas de milho submetidas a déficit hídrico em diferentes solos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.3, n.1, p.1-6, 1998.

SATTER, L.D.; REIS, R.B. Milk production under confinement conditions. 2012. Disponível em: <http://www.ars.usda.gov/research/publications/publications.htm?seq_no_115=84465>. Acesso: 15 set. 2019.

SECRETARIA DA AGRICULTURA E DO ABASTECIMENTO – SEAB. Disponível em: <http://www.agricultura.pr.gov.br/CustosProducao>. Acesso em: 10 nov. 2019.

SILVA, A.A. et al. Herbicidas: classificação e mecanismo de ação. In: SILVA, A.A.; SILVA, J.F. (Eds.). **Tópicos em manejo de plantas daninhas**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, p.83-148, 2007.

SILVA, A.A.; JAKELAITIS, A.; FERREIRA, L.R. Manejo de plantas daninhas no sistema integrado agricultura-pecuária. In: ZAMBOLIM, L.; FERREIRA, A.A.; AGNES, E.L. **Manejo integrado: integração agricultura-pecuária**. Viçosa, MG, 2004. p. 117-169.

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

SILVA, A.L.; FARIA, M.A.; REIS, R.P. Viabilidade técnico-econômica do uso do sistema de irrigação por gotejamento na cultura do cafeeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n.1, p.34-74, 2003.

SILVA, A.M.; COELHO, G.; FARIA, M.A.; SILVA P.A.M.; GUIMARÃES P. T. G.; COELHO, M. R.; COELHO, G. S. Avaliação da época de irrigação e da fertirrigação sobre a produtividade. **Engenharia Agrícola**, v.22, n.1, p.33-42, 2002.

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**, v.8, n.1, p.38-51, 2014.

SILVA, D.D. da. **Efeito de lâminas de água e doses de nitrogênio na cultura do milho, irrigada por aspersão em linha**. 1990. 58 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1990.

SILVA, F.A.; FREITAS, F.C.L.; ROCHA, P.R.R.; CUNHA, J.L.X.L.; DOMBROSKI, J.L.D.; COELHO, M.E.H.; LIMA, M.F.P. Milho para ensilagem cultivado nos sistemas de plantio direto e convencional sob efeito de veranico. **Semina: Ciências Agrárias**, v.36, n.1, p.327-340, 2015.

SILVA, P.P.G.; ANDRADE, C.L.T. DE.; MAGALHÃES, B.G.; GONTIJO NETO, M.M.; MELO, B.F. **Produtividade potencial e variabilidade da produtividade de milho, em regime de sequeiro, em Rio Verde, Goiás**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2016. 30 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 140).

SIMÕES, W.L.; GUIMARÃES, M.J.M.; OLIVEIRA NETO, H.T.; OLIVEIRA, A.R.; VOLTOLINI, T.V. Ajuste da lâmina de irrigação no cultivo de milho para silagem no Vale do Submédio São Francisco. **Revista Científica Intellecto**, v.2, n.3, p. 95-104, 2017.

SMIT, M.A.; SINGELS, A. The response of sugarcane canopy development to water stress. **Field Crops Research**, v.98, p.91-97, 2006.

SORIA, L.G.T. **Produtividade do capim-Tanzânia (*Panicum maximum* Jacq. cv. Tanzânia) em função da lâmina de irrigação e de adubação nitrogenada**. 2002. 170f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

SOUSA, P. de.; NERY, J.T. Análise da variabilidade anual e interanual da precipitação pluviométrica da região de Manuel Ribas, Estado do Paraná. **Acta Scientiarum**, v.24, n.6, p.1707-1713, 2002.

SOUZA, G.M.; BARBOSA, A.M. Produtividade: Fatores de estresse no milho são diversos e exigem monitoramento constante. **Visão Agrícola**, n.13, p.30-34, 2015.

SOUZA, L.S.B.; MOURA, M.S.B.; SEDIYAMA, G.C.; SILVA, T.G.F. Eficiência do uso da água das culturas do milho e do feijão-caupí sob sistemas de plantio exclusivo e consorciado no semiárido brasileiro. **Bragantia**, v.70, n.3, p.715-721, 2011.

STEWART, J.I.; HAGAN, R.M. Functions to predict effects of crop water deficits. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, v.99, n.4, p.421-439, 1973.

STEWART, J.L.; HANKS, R.J.; DANIELSON, R.E.; JACKSON, E.B.; PRUITT, W.O.; FRANKLIN, W.T.; RILEY, J.P.; HAGAN, R.M. **Optimizing crop production through control of water and salinity levels in the soil**. Logan: Utah State University, Utah Water Research Laboratory, 1977. 191p. (Report, PRWG151-1).

TAGLIAFERRE, C.; SANTOS, T.J.; SANTOS, L.C.; SANTOS NETO, I.J.; ROCHA, F.A.; DE PAULA, A. Características agronômicas do feijão caupi inoculado em função de lâminas de irrigação e de níveis de nitrogênio. **Revista Ceres**, v.60, n.2, p.242-248, 2013.

TAGLIAFERRE, C.; SANTOS, L.C.; SANTOS NETO, I.J.; SANTOS, T.J.; ROCHA, F.A.; SILVA, C.S. Ajuste e aplicação do irrigâmetro no manejo da água de irrigação. **Irriga**, v.19, n.1, p.61-72, 2014.

TELES, T.G.R.M.; CARNEIRO, M.S.S.; SOARES, I.; PEREIRA, E.S.; SOUZA, P.Z.; MAGALHÃES, J.A. Produção e composição química da *Brachiaria brizantha* cv. MG4 sob efeito de adubação com NPK. **Acta Scientiarum. Animal Sciences**, v.33, n.2, p.137-143, 2011.

TESTEZLAF, R.; MATSURA, E. E.; CARDOSO, J. L. **Importância da irrigação no desenvolvimento do agronegócio**. Campinas: ABIMAQ, 2002. 6p.

TRECENTI, R.; OLIVEIRA, M.C.; HASS, G. **Integração lavoura-pecuária-silvicultura**. Brasília: MAPA/SDC, 2008, 54p. (MAPA/SDC. Boletim técnico).

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE – USDA. Disponível em: <https://www.usda.gov/>. Acesso em: 20 mai. 2019.

VAUX, J.H.J.; PRUITT, W.O. Crop water production functions. **Advances in irrigation**, v.2, p.61-97, 1983.

VAZIFEDOUST, M.; VAN DAM, J.C.; FEDDES, R.A.; FEIZI, M. Increasing water productivity of irrigated crops under limited water supply at field scale. **Agricultural Water Management**, v.95, n.2, p.89-102, 2008.

VON PINHO, R.G.; VASCONCELOS, R.C.; BORGES, I.D.; RESENDE, A.V. Produtividade e qualidade da silagem de milho e sorgo em função da época de semeadura. **Bragantia**, v.66, n.2, p.235-245, 2007.

WERLE, A.J.K.; NICOLAY, R.J.; SANTOS, R.F.; BORSOI, A.; SECCO, D. Avaliação de híbridos de milho convencional e transgênico (Bt), com diferentes aplicações de inseticida em cultivo safrinha. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, v.4, n.1, p.150-159, 2011.

ZWIRTES, A.L.; CARLESSO, R.; PETRY, M.T.; JUNIOR KUNZ.; REIMANN, G.K. Desempenho produtivo e retorno econômico da cultura do sorgo submetida à irrigação deficitária. **Engenharia Agrícola**, v.35, n.4, p.676-688, 2015.

APÊNDICE I - Tabelas referentes a análise financeira

Tabela 17 - Lâminas de irrigação e respectiva conversão, em tempo, para os diferentes níveis de irrigação, ao longo do ciclo da cultura do milho.

Ano	Nível de irrigação	Silagem		Grãos	
		Lâmina (mm)	Tempo (h)	Lâmina (mm)	Tempo (h)
2018	L1	377,0	848,3	421,6	948,6
	L2	309,1	695,4	348,0	783,0
	L3	235,8	530,4	264,6	595,3
	L4	172,9	389,1	193,0	434,3
	L5	104,7	235,5	113,0	254,3
	L6	42,7	96,1	43,8	98,6
2019	L1	315,0	708,8	322,0	724,5
	L2	301,0	677,3	308,0	693,0
	L3	272,0	612,0	277,0	623,3
	L4	243,0	546,8	247,0	555,8
	L5	183,0	411,8	185,0	416,3
	L6	121,0	272,3	121,0	272,3

Tabela 18 - Receita bruta (R\$ ha⁻¹) para produção de silagem e grãos de milho, em cada nível de irrigação.

Ano	Nível de irrigação	Silagem		Grãos	
		Produtividade (t ha ⁻¹)	Receita Bruta (R\$ ha ⁻¹)	Produtividade (t ha ⁻¹)	Receita Bruta (R\$ ha ⁻¹)
2018	L1	60,40	9.241,20	7,91	4.962,21
	L2	58,70	8.981,10	7,99	5.012,39
	L3	54,73	8.373,69	7,38	4.629,72
	L4	42,60	6.517,80	5,83	3.657,35
	L5	31,90	4.880,70	3,49	2.189,39
	L6	26,26	4.017,78	2,08	1.304,85
2019	L1	51,62	7.897,86	7,61	4.774,01
	L2	52,29	8.000,37	7,16	4.491,71
	L3	50,43	7.715,79	6,95	4.359,97
	L4	51,25	7.841,25	6,9	4.328,60
	L5	43,97	6.727,41	5,77	3.619,71
	L6	35,62	5.449,86	5,47	3.431,51

Tabela 19 - Requerimento de energia e respectivos gastos sazonais com energia, para cada nível de irrigação.

Ano	Nível de irrigação	Silagem		Grãos	
		Requerimento de energia (kWh)	Gasto sazonal (R\$ ha ⁻¹)	Requerimento de energia (kWh)	Gasto sazonal (R\$ ha ⁻¹)
2018	L1	62.388,8	595,85	69.766,2	666,31
	L2	51.148,9	488,50	57.589,7	550,02
	L3	39.013,7	372,60	43.784,7	418,17
	L4	28.616,1	273,30	31.939,1	305,04
	L5	17.323,2	165,45	18.703,4	178,63
	L6	7.071,3	67,53	7.251,7	69,26
2019	L1	52.128,6	497,86	53.287,0	508,92
	L2	49.811,7	475,73	50.970,2	486,80
	L3	45.012,6	429,90	45.840,0	437,80
	L4	40.213,5	384,06	40.875,4	390,38
	L5	30.284,2	289,23	30.615,2	292,39
	L6	20.024,0	191,24	20.024,0	191,24