

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA AGRÍCOLA

Miguel Chaiben Neto

**VIABILIDADE ECONÔMICA DO USO DE CEREAIS IRRIGADOS
PARA PRODUÇÃO DE ETANOL**

Santa Maria, RS

2022

Miguel Chaiben Neto

**VIABILIDADE ECONÔMICA DO USO DE CEREAIS IRRIGADOS NA
PRODUÇÃO DE ETANOL**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de Concentração Engenharia de Água e Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau parcial de **Doutor em Engenharia Agrícola**.

Orientador: Prof. Dr. Adroaldo Dias Robaina

Santa Maria, RS
2022

Chaiben Neto, Miguel
VIABILIDADE ECONÔMICA DO USO DE CEREAIS IRRIGADOS NA
PRODUÇÃO DE ETANOL / Miguel Chaiben Neto.- 2022.
90 p.; 30 cm

Orientador: Adroaldo Dias Robaina
Coorientadora: Marcia Xavier Peiter
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós
Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2022

1. Etanol 2. Manejo Irrigação 3. Viabilidade Econômica
4. Sorgo Granífero 5. Milho I. Dias Robaina, Adroaldo II.
Xavier Peiter, Marcia III. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, MIGUEL CHAIBEN NETO, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Tese) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Miguel Chaiben Neto

**VIABILIDADE ECONÔMICA DO USO DE CEREAIS IRRIGADOS NA
PRODUÇÃO DE ETANOL.**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de Concentração Engenharia de Água e Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau parcial de **Doutor em Engenharia Agrícola.**

Aprovada em 01 de abril de 2022.

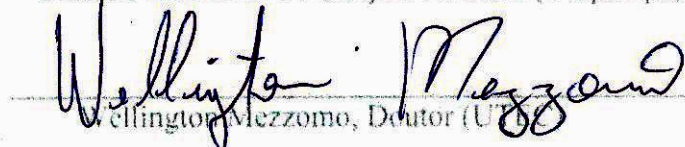

Adroaldo Dias Robaina, Doutor (UFSM) (Orientador)


Marcia Xavier Peiter, Doutora (UFSM) (Coorientadora)


Filipe Fagan Donato, Doutor (UFSM)


Tonismar dos Santos Pereira, Doutor (UFPel)


Chaiane Guerra da Conceição, Doutora (Unipampa)


Wellington Mezzomo, Doutor (UFPA)

Santa Maria, RS
2022

AGRADECIMENTOS

Ao professor orientador Dr. Adroaldo Dias Robaina pela oportunidade, ensinamentos, atenção, amizade e paciência depositada.

À professora coorientadora Dra. Marcia Xavier Peiter pela oportunidade, ensinamentos, atenção e amizade.

À minha família, em especial aos meus pais Miguel e Marilete, a minha irmã Camila por todo o apoio, carinho, amor e incentivo ao longo da minha trajetória.

À minha namorada Mariane pelo carinho, amor, compreensão e incentivo a seguir em frente.

Aos colegas e amigos do Laboratório Engenharia de Irrigação por toda a amizade, troca de experiências, e incentivo.

Aos amigos da “Estância do Cinamomo” e da “casa 80” pela amizade e companheirismo.

À Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa de estudos concedida.

Muito Obrigado!

RESUMO

VIABILIDADE ECONÔMICA DO USO DE CEREAIS IRRIGADOS NA PRODUÇÃO DE ETANOL

AUTOR: Miguel Chaiben Neto
ORIENTADOR: Adroaldo Dias Robaina

O estado do Rio Grande do Sul possui uma produção de etanol inferior a 1% de sua demanda, isso se deve a cana-de-açúcar, principal matéria-prima utilizada no Brasil, não ter boa adaptação ao clima do estado. No entanto, outras matérias-primas podem ser utilizadas na produção de etanol como, por exemplos, as amiláceas, que são utilizadas em diferentes países. Porém, é necessário avaliar a viabilidade técnica e econômica destas matérias-primas alternativas à cana-de-açúcar. Diante do exposto e considerando-se as condições climáticas do estado do Rio Grande do Sul, o presente estudo tem o objetivo de avaliar a viabilidade econômica, propriedades morfofisiológicas e rendimento das culturas de milho e sorgo granífero irrigados com diferentes lâminas de irrigação para produção de etanol. Foram conduzidos experimentos com as culturas do milho e do sorgo granífero durante as safras 2019/20 e 2020/21, em área experimental do Colégio Politécnico da UFSM. Os experimentos foram dispostos em um arranjo bifatorial, em faixas com blocos ao acaso e quatro repetições. Foram avaliadas no fator "A" as influências de três lâminas de irrigação: 0%, 50% e 100% da evapotranspiração de referência enquanto para o fator "D" foram avaliadas as respostas de duas cultivares de milho e uma cultivar de sorgo granífero. As unidades experimentais foram constituídas de 4 m de largura e 4 m de comprimento. Para a análise de viabilidade econômica foram elaborados 45 cenários avaliando três condições de matérias-primas, três lâminas de irrigação e cinco valores de comercialização de etanol, sendo o valor de 3,00 R\$.L⁻¹ considerado como padrão. A lâmina de irrigação de 100% de reposição de água proporcionou um incremento de 46,8% na produtividade de etanol para as culturas. A lâmina de 50% de reposição de água apresentou resultados 15,3% superiores às demais lâminas para a produtividade da água e produtividade econômica da água. A cultura do milho obteve o melhor desempenho para a produtividade de grãos, produtividade de etanol, produtividade da água e produtividade econômica da água, quando comparada com a cultura do sorgo granífero. O uso da irrigação plena reduz os custos de produção do litro de etanol em 15% e 17,89% e aumenta a produção do etanol em 44,18% e 48,25% para as culturas do milho e sorgo granífero, respectivamente. Para o preço de comercialização de R\$ 2,00 L⁻¹, a cultura do sorgo granífero não demonstra bom desempenho, apresentando VPL e TIR negativos. Por outro lado, a cultura do milho é economicamente viável para a produção de etanol em todos os cenários, com resultados positivos para todos os indicadores. A cultura do milho com irrigação plena e preço de comercialização de R\$ 4,00 L⁻¹, representa o melhor cenário econômico, com maiores resultados em todos os indicadores.

Palavras-chave: milho, sorgo granífero, manejo de água, retorno econômico, biocombustível

ABSTRACT

ECONOMIC FEASIBILITY OF THE USE OF IRRIGATED CEREALS IN ETHANOL PRODUCTION

AUTHOR: Miguel Chaiben Neto
ADVISOR: Adroaldo Dias Robaina

The state of Rio Grande do Sul has an ethanol production of less than 1% of its demand, this is due to the fact that sugarcane, the main raw material used in Brazil, does not adapt well to the state's climate. However, other raw materials can be used in the production of ethanol, such as starch, which are used in different countries. However, it is necessary to evaluate the technical and economic feasibility of these alternative raw materials to sugarcane. In view of the above and considering the climatic conditions of the state of Rio Grande do Sul, the present study aims to evaluate the economic viability, morphophysiological properties and yield of corn and grain sorghum crops irrigated with different irrigation depths for the production of ethanol. Experiments were carried out with corn and grain sorghum crops during the 2019/20 and 2020/21 harvests, in an experimental area of the Colégio Politécnico da UFSM.. The experiments were arranged in a bifactorial arrangement, in strips with randomized blocks and four replications. Where the influences of three irrigation depths were evaluated in factor "A": 0%, 50% and 100% of the reference evapotranspiration and for factor "D" the responses of two maize cultivars and one grain sorghum cultivar were evaluated. . The experimental units were 4 m wide and 4 m long. For the analysis of economic viability, 45 scenarios were elaborated, evaluating three conditions of raw materials, three irrigation depths and five values of ethanol commercialization, being the value of 3.00 R\$.L-1 considered as standard. The irrigation depth of 100% water replacement provided an increase of 46.8% in ethanol productivity for crops. The 50% water replacement depth showed results 15.3% higher than the other depths for water productivity and economic water productivity. The corn crop had the best performance for grain yield, ethanol yield, water yield and economic water yield, when compared to grain sorghum. The use of full irrigation reduces the production costs of a liter of ethanol by 15% and 17.89% and increases ethanol production by 44.18% and 48.25% for corn and grain sorghum crops, respectively. For the commercialization price of R\$ 2.00 L-1, the grain sorghum crop does not show good performance, showing negative NPV and IRR. On the other hand, corn is economically viable for ethanol production in all scenarios, with positive results for all indicators. The corn crop with full irrigation and commercialization price of R\$ 4.00 L-1, represents the best economic scenario, with higher results in all indicators.

Keywords: corn, grain sorghum, water management, economic return, biofuel

Sumário

1	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVOS	11
2.1	OBJETIVO GERAL	11
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
3	REVISÃO DA LITERATURA	12
3.1	CULTURA DO MILHO	13
3.2	CULTURA DO SORGO GRANÍFERO	14
3.3	IRRIGAÇÃO NA AGRICULTURA	15
3.4	ETANOL	16
3.5	VIABILIDADE ECONÔMICA	19
4	MATERIAL E MÉTODOS	22
4.1	ATRIBUTOS DO SOLO	22
4.2	PARÂMETROS DO SISTEMA DE IRRIGAÇÃO	23
4.3	PARÂMETROS DE PLANTA	23
4.5	VIABILIDADE ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE ETANOL	25
4.5.1	Custos de produção	25
4.5.2	Análise da viabilidade econômica	27
4.5.3	Cenários da viabilidade econômica	29
5	ARTIGO 1 - RENDIMENTO DE ETANOL, PRODUTIVIDADE DA ÁGUA E PRODUTIVIDADE ECONÔMICA DA ÁGUA PARA MILHO E SORGO	30
6	ARTIGO 2 – ECONOMIC INDICATORS FOR ETHANOL PRODUCTION FROM STARCH CROPS UNDER DIFFERENT IRRIGATION MANagements	49
7	DISCUSSÃO GERAL	75
8	CONCLUSÃO	82
9	REFERÊNCIAS	83

1 INTRODUÇÃO

A produção nacional de etanol atingiu um recorde de 35,6 bilhões de litros, na safra 2019/2020 (CONAB, 2020). Sua produção está pautada quase que exclusivamente na utilização de cana-de-açúcar como matéria-prima. No entanto, na tentativa de desenvolver a produção de combustíveis cada vez mais sustentáveis economicamente, novas matérias-primas, alternativas ao uso de cana-de-açúcar vêm sendo pesquisadas para suprir a demanda de etanol.

No Brasil a produção de etanol a partir de cereais em escala comercial começou no ano de 2012 no estado do Mato Grosso, tendo como matéria-prima o milho (*Zea mays*), cereal com alta produção e oscilação de preços na região. As usinas que processam tanto a cana-de-açúcar quanto o milho são chamadas de usinas flex, pois o processo de produção é semelhante para ambas as culturas (FREITAS; MIURA, 2018).

No Rio Grande do Sul está em andamento, desde o ano de 2019, o Programa de Produção de Etanol Amiláceo (Pró-Etanol) juntamente com uma política que busca a autossuficiência na produção de etanol. Esse projeto busca matérias-primas alternativas que possam suprir a demanda das novas refinarias. A primeira refinaria do estado será na cidade de Carazinho e encontra-se na fase de obtenção das licenças prévias e de instalação.

O elevado valor praticado no Rio Grande do Sul está interligado com a baixa produção de etanol no estado, e esta pode ser atribuída ao fato da cana-de-açúcar que é principal matéria-prima para a produção do etanol, não ter uma boa adaptação ao clima do RS devido ao inverno rigoroso (NOGUEIRA et al., 2015).

O etanol possui uma taxa de atratividade de 70% em relação ao valor da gasolina, valores inferiores a esse tornam o uso mais econômico. No RS nos últimos 10 anos a relação entre o etanol/gasolina esteve abaixo desse índice apenas 21 meses, nos demais foi menos oneroso abastecer com gasolina. Além dos custos com frete e distribuição, o estado ainda conta com uma elevada carga tributária.

Frente a essa nova fase de investimentos é fundamental desenvolver estudos com matérias-primas que sejam adaptadas às condições climáticas do RS e consigam atingir uma produção que supra essa nova demanda. As pesquisas têm sido direcionadas para culturas de grãos com alto teor de amido, como milho, sorgo granífero, triticale, trigo, arroz entre outros, sendo estes com adaptabilidade e capacidade de produção no estado. Além disso, a viabilidade econômica desses empreendimentos precisa ser estudada de forma ampla, desde a produção dos grãos até a atividade da indústria.

Assim como o milho, a cultura do sorgo granífero (*Sorghum bicolor*) pode ser uma alternativa para a produção de etanol, pois apresenta elevado teor de amido. Além disso, possui rusticidade e certa tolerância ao déficit hídrico, tendo como fase mais sensível a disponibilidade de água no seu desenvolvimento a emissão da panícula (ALBUQUERQUE et al., 2010; KLOCKE et al., 2012).

A produtividade e a qualidade das plantas para a obtenção de elevada produção de etanol estão diretamente relacionadas às condições edafoclimáticas de cada região, e das características da cultura (FONSECA NETO, 2013). Para que isso seja possível é necessário o monitoramento fenológico constante da cultura em questão, possibilitando a utilização de práticas de manejo que visem à otimização da aplicação de água através da lâmina de irrigação de forma adequada, em cada fase da cultura.

Além disso, a viabilidade econômica de sistemas irrigados, avaliada em função da produtividade da cultura e seu consumo de água se torna um ponto crucial (MARTINS et al., 2016). Assim, as restrições ambientais e a capacidade de uso do solo geram a necessidade de adoção de tecnologias que possibilitem maximizar a produtividade.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a viabilidade econômica, propriedades morfofisiológicas e rendimento das culturas de milho e sorgo granífero sob diferentes lâminas de irrigação, e destinados à produção de etanol nas condições climáticas do estado do Rio Grande do Sul.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Identificar os efeitos da irrigação na produtividade de grãos de milho e sorgo granífero;
Identificar o manejo de água para milho e sorgo granífero que conduza à máxima produtividade de etanol;

Determinar a produtividade da água e a produtividade econômica da água na produção de etanol;

Quantificar os custos de produção para milho e sorgo granífero;

Determinar os custos relacionados a irrigação;

Analisar a viabilidade econômica e explorar cenários de produção com diferentes preços de venda do etanol.

3 REVISÃO DA LITERATURA

No ano de 1975 devido às recorrentes crises do petróleo foi criado por meio do Decreto nº 76.593 o Programa Nacional do Álcool (Proálcool) incentivando a produção de etanol produzido a partir da cana-de-açúcar. Os anos iniciais (1975/1980) foram marcados por muitos investimentos com juros subsidiados para a implantação de lavouras e instalação de plantas industriais (CORTEZ, 2018). O estado do Rio Grande do Sul criou a Lei Estadual Nº 15.641 em maio de 2021, que institui a política estadual de estímulo à produção de etanol criando o programa PRÓ-ETANOL/RS. A lei estimula principalmente: a geração de bioenergia, a autossuficiência estadual na produção de bioetanol e a utilização de novas matérias-primas.

O cenário da produção de etanol no Brasil vem sofrendo alterações em sua fonte de matéria-prima, com uma pequena participação de matérias-primas amiláceas. Isso vem ocorrendo em virtude das cultivares de cana-de-açúcar existentes não permitirem a produção durante todo o ano, dado às diferentes condições edafoclimáticas do Brasil, deixando algumas plantas industriais ociosas em alguns períodos do ano (MILANEZ et al., 2014).

Cereais como milho, arroz, trigo, aveia, cevada, sorgo granífero entre outros, são ricos em amido e proteína, o que pode favorecer o seu uso para a produção de etanol. No processo de produção de etanol de cereais o primeiro passo é a trituração de grãos para aumentar sua área de contato e expor o amido presente nos grãos. A quantidade de etanol que pode ser produzida está relacionada com o teor de amido presente nos grãos. A Tabela 1 apresenta alguns cereais e sua capacidade de produção de etanol (KUMAR et al., 2020).

Tabela 1 - Teor de amido e rendimento de etanol de cereais com aptidão de produção

Cereais	Teor de amido (%)	Rendimento de etanol (L.ton ⁻¹)
trigo	58 - 62	360 - 390
arroz	55 - 70	480 - 570
cevada	54 - 65	340 - 410
milho	60 - 63	380 - 400
sorgo granífero	55 - 65	360 - 420
aveia	54 - 64	360 - 420

Fonte: Adaptado de Kumar et al., 2020.

Segundo Taborda et al. (2015), as culturas com maior potencial de produção de etanol por tonelada processadas são milho, sorgo granífero, batata-doce, mandioca, cana-de-açúcar e

sorgo sacarino, sendo que o alto potencial de rendimento do milho e do sorgo granífero são verificados devido ao seu alto teor de amido presente nos grãos. Ainda em estudos conduzidos com batata-doce, Taborda et al. (2015), salientam a importância de verificar o teor de amido presente e não apenas o rendimento da cultura por hectare, pois no caso estudado esse teor pode ser variável de acordo com condições da cultura.

3.1 CULTURA DO MILHO

Para Ali et al. (2018) a cultura do milho representa um papel importante na agricultura global, pois é uma commodity utilizada como fonte de proteína na produção de rações e biocombustíveis. No Brasil, a cadeia produtiva do milho é uma das mais importantes para o agronegócio (ARTUZO et al., 2018)

Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (Conab) para a safra 2020/21 é esperada uma produção de 108 milhões de toneladas de milho, quantidade esta 5,4% superior à da safra passada. Dessa produção, aproximadamente 73 milhões de toneladas devem ser destinadas para o abastecimento do mercado interno, sendo essa quantidade 6,2% superior ao da safra passada, esse aumento está diretamente relacionado com os grãos destinados à crescente produção de etanol de milho (CONAB, 2021).

O milho tem uma necessidade hídrica entre 400 e 650 mm e, além disso, exige um bom manejo da fertilidade e estrutura do solo, de modo a favorecer o crescimento radicular e assim permitir o acesso das raízes à água e nutrientes que estão em camadas mais profundas do solo (BERGAMASCHI et al., 2006; SIMÃO et al., 2018).

A ocorrência de déficit hídrico na cultura do milho durante o período de crescimento vegetativo, afeta a quantidade de grãos e a massa seca da planta, influenciando negativamente na produtividade da cultura. No entanto, quando o déficit hídrico ocorre durante a maturação fisiológica o enchimento de grãos é prejudicado e a redução na produtividade da cultura é ainda mais severa (ZHANG et al., 2019; COMAS et al., 2019).

Em regiões onde as precipitações pluviais são inferiores e/ou as distribuições das chuvas são irregulares é necessária a utilização da irrigação suplementar para suprir a demanda hídrica da cultura, principalmente nos momentos de maior exigência, a irrigação suplementar pode ser uma alternativa quando os volumes de água disponíveis estiverem baixos (ZHANG et al., 2019).

3.2 CULTURA DO SORGO GRANÍFERO

O sorgo granífero, *Sorghum bicolor* (L.) Moench, é uma planta com origem no continente Africano, pertencente à família das poaceas, sendo uma planta de porte baixo podendo chegar a no máximo 1,70 metros, com uma boa adaptação em distintas condições climatológicas. Atualmente o sorgo granífero é o quinto cereal mais produzido mundialmente (GUIMARÃES et al., 2020; LANDAU; MOURA 2020), seu ciclo curto, manejo mecanizado e eficiência no uso da água são algumas das vantagens atreladas à cultura, que apresenta uma produção de grãos em torno de 2,5 t.ha⁻¹, e que podem ser utilizados para alimentação humana, para a produção de rações e biocombustíveis (FAO, 2012).

Segundo Araya et al. (2018) a cultura do sorgo é mais tolerante a restrições hídricas em relação a outras culturas produtoras de grãos, e devido a essa característica está entre as principais espécies cultivadas em algumas regiões dos Estados Unidos. Com o passar do tempo o sorgo perdeu espaço para culturas mais produtivas como o milho, no entanto, há uma crescente demanda pelo seu uso devido ao seu desempenho em condições adversas e a possibilidade da sua utilização na produção de biocombustível (KOTHARI et al., 2019).

Da Rocha Gomes et al. (2019) conduziram um estudo em quatro cidades brasileiras produtoras de sorgo granífero, com o intuito de avaliar as respostas de trinta e seis híbridos nos componentes de crescimento e produtividade. As produtividades encontradas no estudo variaram de 1,13 a 7,73 t.ha⁻¹ dependendo da localidade e híbrido utilizado. Batista et al. (2019) em experimento com dezesseis híbridos avaliando o efeito do déficit hídrico na produtividade da cultura obtiveram uma redução de 35%, 64% e 62% na produtividade do sorgo, os autores relatam que no primeiro ano a restrição hídrica foi mais severa do que nos anos seguintes.

Apesar de sua rusticidade em condições de pouca umidade (ARAYA et al., 2016; KISEKKA et al., 2016; DAHLBERG, 2019), diversos estudos vêm demonstrando que os rendimentos do sorgo granífero podem obter incrementos consideráveis na produtividade com o uso de irrigação (PANG et al., 2018; SCHLEGEL et al., 2019), amenizando os impactos das oscilações climáticas sobre a produção agrícola (AMUDHA; BALASUBRAMANI, 2011). Amaral et al. (2003) relatam que o sorgo possui características fisiológicas que possibilitam que a planta diminua suas atividades metabólicas durante um período de déficit hídrico e após o suprimento de água retomem suas atividades plenamente.

3.3 IRRIGAÇÃO NA AGRICULTURA

Atualmente a agricultura irrigada é a principal consumidora de água no mundo, no entanto, sem este uso as demandas por alimentos dificilmente seriam alcançadas devido ao crescimento populacional e ao impacto das mudanças climáticas na produção de alimentos (ASSENG et al., 2018; DAVARPANA; AHMADI, 2021; DING et al., 2021). Frente a uma escassez dos recursos hídricos, estratégias de irrigação mais eficientes e sustentáveis são necessárias para reduzir os efeitos da variabilidade das precipitações e manter a produção agrícola estável (BELL et al., 2020).

O uso de tecnologias nos cultivos agrícolas tem como finalidade o aumento de produtividade, em áreas irrigadas a melhor resposta da cultura pode não coincidir com a maior rentabilidade do sistema produtivo, pois o custo com o bombeamento de água pode ser maior que o incremento de produtividade. Irrigar buscando um maior rendimento econômico pode ser ainda mais desafiador do que quando se busca a máxima produtividade, pois este pode ocorrer em produtividades menores porém com custos reduzidos (CASTRO JUNIOR et al., 2015).

De acordo com Zhang et al. (2019), a necessidade de água para a cultura do milho é de aproximadamente 660 mm, em localidades onde a precipitação seja inferior a essa quantidade o uso da irrigação é fundamental para atender a demanda da cultura durante seu desenvolvimento e assim assegurar a produtividade. Em casos de escassez de água, manejos alternativos devem ser considerados de modo a manter a produtividade econômica das culturas (COMAS et al., 2019).

Zou et al. (2021) avaliaram o efeito da irrigação deficitária em diferentes estágios do milho, no qual, com 20% de redução na irrigação durante os estádios de desenvolvimento de v8 até maturidade foi o tratamento com a melhor resposta em produtividade, já o tratamento com 40% de redução no mesmo estágio do anterior foi a que apresentou pior rendimento, a intensidade e momento em que ocorre o déficit hídrico estão relacionados com a resposta da cultura.

Nas condições do estudo conduzido por Araya et al. (2018) com a cultura do sorgo granífero para atingir uma produtividade de 5.000 kg.ha⁻¹ foi necessário uma irrigação de 1,7 – 2,5 mm.d⁻¹, quando a meta de produtividade estabelecida foi de 6.000 kg.ha⁻¹ a lâmina de irrigação aumentou para 3,6 mm.d⁻¹, sendo o início da irrigação direcionada para o momento de emissão da panícula até a maturidade. Quando a irrigação inicia-se na semeadura, os mesmos

autores recomendam uma lâmina de até 1,7 mm.d⁻¹ visando uma menor perda de água por evaporação e drenagem.

Bell et al. (2018) avaliaram o efeito da irrigação com reposição de água inferior à evapotranspiração ao longo do ciclo da cultura, concentrando a irrigação nos estágios fisiológicos mais críticos, onde obtiveram um incremento de produtividade na cultura do sorgo granífero. Bell et al. (2020) verificaram que diferentes estratégias de irrigação com déficit hídrico não influenciaram na profundidade do enraizamento da cultura do sorgo granífero, onde as plantas provavelmente buscaram a água nas camadas mais superficiais e não tiveram acesso a água nas camadas mais profundas do solo.

Aydisakir et al. (2021) avaliaram a irrigação por gotejamento superficial e subsuperficial com redução da reposição de água necessária. O método de irrigação subsuperficial resultou em uma economia de água de aproximadamente 23 mm, onde o tratamento com 100% de reposição com gotejamento subsuperficial foi o que apresentou o melhor resultado nos parâmetros avaliados no estudo. No entanto, para o tratamento com 75% de reposição, para o mesmo sistema de irrigação, não houve diferença estatística significativa nos parâmetros avaliados.

3.4 ETANOL

O etanol é um combustível de origem vegetal obtido de qualquer biomassa que contenha quantidades significativas de amido ou açúcares. A utilização desse biocombustível é a principal alternativa na substituição do uso de combustíveis fósseis (ZABED et al., 2017). Além disso, tem sido amplamente utilizado em diversos países reduzindo as emissões líquidas de dióxido de carbono em comparação com os combustíveis fósseis não renováveis (OJEDA et al., 2011).

Possui uma energia 34% menor quando comparado com a gasolina, no entanto, o índice de octanagem é maior, o que melhora o desempenho e permite uma taxa de compressão interna nos motores maior, resultando em um menor tempo de queima do combustível (ZABED et al., 2017). É um biocombustível utilizado em motores de combustão interna com ignição por centelha (Ciclo Otto) podendo ser utilizado de duas formas como etanol anidro, sendo um componente de mistura na composição da gasolina ou como etanol hidratado, comercializado em todo o país como um combustível acabado. Na Tabela 2 são comparadas as principais características entre o etanol e a gasolina.

Tabela 2 - Resumo das principais características do etanol e de uma gasolina típica

PARÂMETRO	UNIDADE	GASOLINA	ETANOL
Poder Calorífico Inferior (Pci)	kJ/kg	43500	28225
	kJ/l	32180	22350
Densidade	kg/l	0,72-0,78	0,8
Octanagem Ron	-	90-100	102-130
Octanagem Mon	-	80-92	89-96
Calor Latente De Vaporização	kJ/kg	330-400	842-930
Relação Estequiométrica Ar/Combustível	-	14,5	9
Pressão Vapor	kPa	40-65	115-17
Temperatura De Ignição	°C	220	420
Solubilidade	% Volume	0	100

Fonte: Adaptado de BNDES, 2008.

Na Tabela 2 observa-se que algumas propriedades como carburantes do etanol são melhores que as da gasolina. O etanol apresenta um valor mais alto de octanagem, o que evidencia uma capacidade antioxidante maior que a da gasolina, e por tanto, menor risco de detonação prematura por compressão no uso do combustível em motores de ignição. Por outro lado, também destaca-se a densidade energética da gasolina, que é maior que a do etanol, quando observados os valores de PCI.

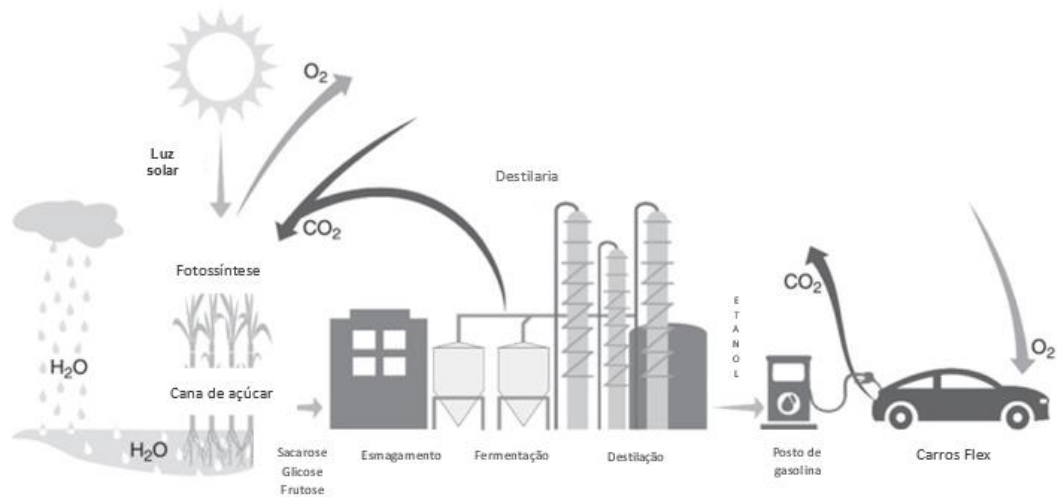
As matérias-primas utilizadas na produção de etanol podem ser açucaradas, amiláceas, lignocelulósicas e algas. O etanol de primeira geração é obtido através do processamento de matérias-primas ricas em açúcares e amido, já a biomassa lignocelulósica produz o etanol de segunda geração, enquanto que as algas são responsáveis pela produção de etanol de terceira geração (ZABED et al., 2017). A produção em primeira geração é responsável pela maior quantidade de etanol produzido, enquanto a segunda geração representa uma pequena parcela da produção (PERSSON et al., 2020).

Atualmente, a principal rota industrial utilizada na produção de etanol em todo o mundo é o processo microbiológico, também denominado fermentação alcoólica ou etanólica (SILVA et al., 2005; MADALENO et al., 2016). Durante esse processo, os açúcares são convertidos em etanol, energia, biomassa celular, CO₂ e outros subprodutos pelas células de levedura.

Na indústria sucroalcooleira brasileira, a cana de açúcar é a matéria-prima mais utilizada, enquanto os Estados Unidos da América (EUA) produzem em sua maioria etanol a partir de milho (SZAMBELAN et al., 2018). A Cana-de-açúcar, milho e sorgo são plantas C4

com alta eficiência para converter CO₂ atmosférico e água (Figura 1) em açúcares e polímeros como amido, celulose e hemicelulose através da fotossíntese (LOPES et al., 2016).

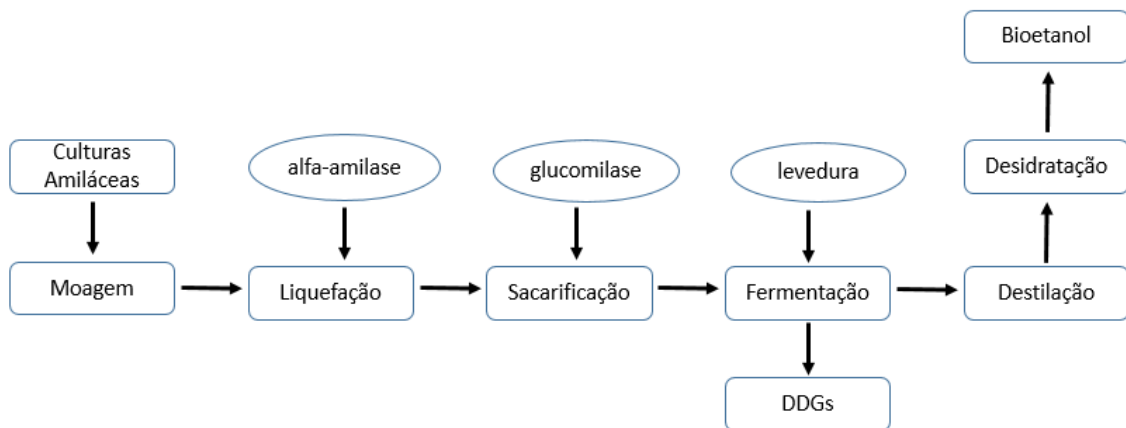
Figura 1 - Ciclo de dióxido de carbono (CO₂), e oxigenio (O₂) dentro de um sistema de produção e consumo de etanol



Fonte: Adaptado de LOPES et al., (2016).

Apesar de difundida em alguns países, no Brasil a produção de álcool a partir de culturas amiláceas ainda é recente, sendo usada em escala comercial a partir de 2012 com o uso do milho como matéria-prima (FREITAS; MIURA, 2018). Na produção de etanol por fontes amiláceas (Figura 2), a biomassa deve ser convertida em etanol por meios biotecnológicos e termoquímicos (EBTP, 2011).

Figura 2 - Processo de produção de etanol de primeira geração a partir de fontes amiláceas.



Fonte: Adaptado de Gómez et al., (2010).

O processo de moagem dos grãos pode ser a seco ou moagem úmida, a diferença entre os métodos é que no processo a seco são utilizados os grãos inteiros, e no processo de moagem úmida os componentes dos grãos são separados e apenas o amido é utilizado, sendo este, um método que necessita de mais equipamentos e investimentos. A moagem a seco é amplamente utilizada nas indústrias. Como coprodutos tem-se os grãos secos de destilaria com solúveis (DDGs, do inglês *Dry Distillers Grain*) que tem boa comercialização para as fábricas de ração animal (ZABED et al., 2017; KURAMBHATTI et al., 2018).

Para a produção de etanol o grão é moído para expor o amido, o qual é enzimaticamente tratado para ser quebrado em açúcares fermentáveis para que ocorra a fermentação (SÁNCHEZ; CARDONA, 2008). Na etapa de liquefação ocorre a desintegração do amido, quebrando os seus componentes, numa mistura de dextrinas e começam a aparecer pequenas quantidades de glicose. Na etapa de sacarificação ocorre a desramificação dessas dextrinas e conseqüentemente a liberação máxima dos açúcares fermentescíveis, principalmente glicose (PRAJAPATI et al., 2015).

O processo implica na adição de enzimas e o acondicionamento da mistura até condições idóneas para favorecer o processo de fermentação com aditivos e acréscimo de temperatura e água. Se utilizam diferentes configurações para a otimização do processo, como a sacarificação e fermentação simultânea (SSF, do inglês *simultaneous saccharification and fermentation*). O principal processo bioquímico que descreve a produção de etanol é a reação de fermentação realizada por leveduras (EBTP, 2011). Na sequência o mosto é levado para a destilação e desidratação para a obtenção do etanol (GÓMEZ et al., 2010).

Outra fonte de matéria-prima potencial para a produção de etanol é a biomassa lignocelulósica através de processos enzimáticos. Infelizmente, devido ao baixo carregamento do substrato, aos baixos desempenhos de homogeneização, à baixa concentração de álcool e ao alto custo de energia, a produção de etanol celulósico dificilmente poderia ser economicamente viável (ELLISTON et al., 2013).

3.5 VIABILIDADE ECONÔMICA

Informações sobre o mercado e gestão dos recursos são fundamentais no planejamento das atividades de produção, auxiliando no processo de tomadas de decisões (ARTUZO et al., 2018). Sistemas de produção de grãos além de todo o conhecimento técnico envolvido nas

atividades agrônômicas, além disso, são necessários também avaliações com viés econômico, visando os melhores resultados (DA SILVA et al., 2019).

Para Sesmero et al. (2012) a viabilidade econômica da produção de etanol de milho passa pela eficiência técnica e financeira das indústrias, dos preços de matéria-prima, etanol e das políticas públicas. Stamenkovic et al. (2020) destaca as diversas possibilidades de se obter etanol de sorgo e salienta a importância de novas pesquisas para a melhoria dos processos de modo a garantir a produção e a viabilidade econômica desse biocombustível.

O tamanho da indústria é um fator importante a ser considerado na hora de realizar o investimento, a relação entre os custos, disponibilidade e capacidade de processamento de matérias-primas são fatores relevantes para instalar a indústria em uma determinada região. Para o processamento de cereais como milho, sorgo e trigo a escolha no processo de moagem a seco pode resultar em uma economia de até 40% quando comparada com a moagem úmida (GALLAGHER et al., 2005).

Para Frizzone e Andrade Júnior (2005), antes de decidir por um investimento são necessárias análises econômicas que avaliem as possibilidades no tempo, sendo eles no presente, intermediário e futuro. Furlaneto e Esperancini (2010) destacam que para estimar os custos de produção de uma atividade agrícola é necessário a utilização de alguns indicadores econômicos, sendo os principais a receita líquida, o índice de rentabilidade, a receita líquida operacional e a taxa de retorno.

A viabilidade econômica da produção de etanol pode ser avaliada por vários indicadores econômicos, como o valor presente líquido (VPL), a taxa interna de retorno (TIR), entre outros. O VPL é um indicador que auxilia na tomada de decisões de investimentos, quando a resposta do VPL é positiva o investimento é viável economicamente (APPIAH-NKANSAH et al., 2019). O VPL traz o fluxo de caixa (custos e benefícios) esperado ao longo da vida útil do projeto para o momento inicial, onde a taxa de juros representa a mínima remuneração necessária ao capital. O payback é o período de recuperação do capital investido, o qual geralmente é quantificado em anos, já a relação B/C aponta se os benefícios do investimento serão maiores que os custos (GITMAN, 2002; GUIDUCCI et al., 2012).

A TIR transforma os valores que serão recebidos no futuro em valores no ato da realização do projeto, sendo caracterizada como taxa de remuneração do capital investido (FRIZZONE; ANDRADE JÚNIOR, 2005), taxa de desconto que faz o VPL do investimento igualar-se a zero (GITMAN, 2010).

Rezende e Richardson (2015) realizaram um estudo utilizando o modelo de simulação de Monte Carlo de viabilidade financeira das indústrias de etanol e açúcar no Brasil para um período de 10 anos. No trabalho foram elaborados 4 cenários com preços sugeridos por diferentes instituições, a atividade industrial foi viável em todos eles, mesmo diante dos riscos e incertezas na produção.

Em uma análise econômica conduzida por Maroun e La Rovere (2014) para a produção de etanol por uma microdestilaria de 600 L.d^{-1} , com o uso da cana-de-açúcar produzida por pequenos produtores no estado do Rio Grande do Sul, encontraram um payback de 5 anos. Os autores julgam este tempo muito longo pois os produtores usariam todo o primeiro ciclo da cana-de-açúcar para pagar o investimento.

Rezende e Richardson (2017), em estudo conduzido para o estado de São Paulo em uma indústria que processa a matéria-prima de uma área de 20.000 hectares de cana-de-açúcar avaliaram a introdução da cultura do sorgo sacarino em 20% da área e verificaram um aumento no VPL e na renda anual líquida além de reduzir o risco. Os benefícios econômicos melhoram com o aumento da produtividade do sorgo sacarino.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo foi conduzido com as culturas de milho e sorgo granífero durante as safras 2019/20 e 2020/21, em área experimental do Colégio Politécnico da UFSM, na região fisiográfica da Depressão Central do estado do Rio Grande do Sul - RS. A área experimental localiza-se a uma altitude de 122 metros, latitude 29° 42' 55,20" S e longitude 53° 44' 22,60" O e possui uma área de 3000 m². O clima da região, segundo a classificação de KÖEPPEN (MORENO, 1961) é do tipo cfa – subtropical úmido, sem estação seca e com temperaturas médias em 16,1 °C no período do inverno e 22,5 °C no período do verão, com precipitação anual média de 1688 mm. O solo da área experimental é classificado como Argissolo Vermelho Eutrófico típico (EMBRAPA, 2006).

O experimento constituiu-se de um arranjo bifatorial, em faixas com blocos ao acaso e quatro repetições. Foram avaliadas no fator “A” as influências de três lâminas de irrigação: 0%, 50% e 100% da evapotranspiração de referência, e no fator “D” foram avaliadas as respostas de duas cultivares de milho e uma cultivar de sorgo granífero. As unidades experimentais foram constituídas de 4 metros de largura e 4 metros de comprimento, totalizando 16 m² e irrigadas por 4 aspersores.

4.1 ATRIBUTOS DO SOLO

Os atributos físicos do solo foram avaliados no Laboratório de Solos da Universidade Federal de Santa Maria, onde foram determinadas a capacidade de campo (0,30 m³.m⁻³), o ponto de murcha permanente (0,16 m³.m⁻³), a densidade do solo (1,40 g.dm⁻³) e a textura do solo (franco argilosa). A infiltração de água no solo foi determinada pelo método do infiltrômetro de duplo anel, a qual obteve-se uma taxa de infiltração de 15 mm.h⁻¹.

A análise química do solo apresentou os seguintes resultados: pH de 5,6, 8,1 cmolc dm⁻³ de Ca, 3,3 cmolc dm⁻³ de Mg, 0,0 cmolc dm⁻³ de Al, CEC efetivo de 11,7 cmolc dm⁻³, CEC em pH7 de 15,2 cmolc dm⁻³, saturação por bases de 77%, índice SMP de 6,2, 2,3% de matéria orgânica, 28% de argila, 9,7 mg dm⁻³ de P (Mehlich) e 96 mg dm⁻³ de K (Mehlich). A adubação para as culturas foram realizadas nas quantidades recomendadas após análise química, conforme o Manual de Adubação e Calagem para o RS e SC (2016). A adubação de base foi de 380 kg.ha⁻¹ com formulação de 5-20-20 NPK, com duas aplicações de uréia a lanço de 200 kg.ha⁻¹.

4.2 PARÂMETROS DO SISTEMA DE IRRIGAÇÃO

O sistema de irrigação utilizado foi de aspersão convencional, composto por uma linha principal com 100 metros de comprimento e 24 linhas laterais espaçadas em 4 metros e com 24 metros de comprimento cada. Os aspersores utilizados foram da marca Agrojet, modelo P5 espaçados em 4 metros entre si e com elevações de 1,5 metros de altura em relação ao solo.

O sistema de irrigação foi instalado logo após a semeadura do experimento nas duas safras. A uniformidade e a taxa de aplicação (13 mm.h^{-1}) foram determinadas pelo o Teste de Uniformidade de Christiansen (CUC) conforme metodologia proposta por Bernardo et al. (2009).

O manejo da irrigação foi realizado por meio da evapotranspiração de referência, pelo método de Penman-Monteith. Para isto foram coletados dados meteorológicos diários da estação meteorológica pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia - Inmet, localizada na UFSM a uma distancia de 2 km do local do experimento. O turno de rega adotado foi fixo de 7 dias, quando não ocorreu precipitação efetiva que suprisse a demanda da evapotranspiração de referência. Para cálculo da precipitação efetiva foi utilizada a metodologia proposta por Millar (1978).

Para atender as distintas lâminas de irrigação foi utilizada a taxa de aplicação de água do sistema, variando o tempo de irrigação de acordo com os tratamentos de 50% e 100% da evapotranspiração de referência. O tempo de irrigação foi determinado de acordo com a Equação 1.

$$T_i = \frac{L_n}{L_r \cdot E_f} \cdot 100 \quad (1)$$

onde: T_i – Tempo de irrigação (h); L_n – Lâmina necessária (mm); L_r – Lâmina de referência (mm.h^{-1}); E_f – Eficiência de aplicação (%).

4.3 PARÂMETROS DE PLANTA

A semeadura dos experimentos foi realizada no dia 15 de dezembro de 2019 para a primeira safra e no dia 17 de dezembro de 2020, para a segunda safra. A cultivar de sorgo utilizada foi a biomatrix BM 737 de ciclo precoce, com uma densidade de semeadura de

180.000 plantas por hectare. As cultivares de milho utilizadas foram DKB345 IPRO3 RR e DKB230 IPRO3, com uma densidade de semeadura de 90.000 plantas por hectare.

Para avaliar os componentes de rendimento de grãos foram colhidas as plantas de uma área de 5 m lineares. Após a colheita realizou-se o processo de trilha com o objetivo de eliminar as impurezas, posteriormente foi corrigida a umidade dos grãos para 13% e realizada a pesagem dos mesmos.

A produtividade de água foi determinada pela relação entre a produtividade de etanol e o volume total de água aplicada (precipitação efetiva + lâmina de água), conforme Equação 2.

$$PA = \frac{Y}{W} \quad (2)$$

onde PA - produtividade da água, (L.ha⁻¹.mm⁻¹); Y - produtividade de etanol para cada cultura, (L.ha⁻¹) e W - lâmina total de água aplicada durante o ciclo da cultura, (mm).

A produtividade econômica da água por meio da Equação 3.

$$PEA = \frac{p \cdot Y}{W} \quad (3)$$

onde PEA - produtividade econômica da água (R\$.ha⁻¹.mm⁻¹) e p - preço médio do litro de etanol (R\$.L⁻¹).

Os dados obtidos foram submetidos ao teste das pressuposições do modelo matemático (normalidade e homogeneidade das variâncias). A análise da variância foi realizada através do teste F a 5% de probabilidade de erro com auxílio do programa Sisvar 5.6. Quando houve interação entre os fatores quantitativos e qualitativos foi realizada a regressão. Quando não houve interação entre os fatores foi realizado o teste de Tukey a nível de 5% de probabilidade de erro.

4.4 PRODUÇÃO DE ETANOL

A capacidade de produção de etanol das culturas de milho e sorgo granífero foi quantificada por meio de um levantamento de dados já publicados na literatura científica. Trabalhos como os de Gumienna et al. (2016), Szambelan et al. (2018), Kumar et al. (2018),

Kurambhatti et al. (2018), Kumar et al. (2020) e Silva e Castañeda-ayarza (2021) relatam que a produção de etanol das culturas pode variar de 310 a 430 L.ton⁻¹. Com isso, foi adotada uma produção de etanol média de 390 L.ton⁻¹ para as duas culturas. A produtividade de etanol foi obtida de acordo com a produtividade de grãos das culturas de milho e sorgo em cada tratamento de irrigação avaliado.

4.5 VIABILIDADE ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE ETANOL

O presente estudo utilizou como base a metodologia proposta pela Conab (2010), para o cálculo dos fatores que influenciam nos custos e receitas de produção. Foi adotado um sistema de irrigação padrão descrito por Torres et al. (2019) como forma de quantificar os custos de instalação e manutenção do sistema de irrigação

4.5.1 Custos de produção

Os custos de insumos não relacionados à irrigação foram quantificados e ajustados para (R\$.ha⁻¹). Os custos fixos da irrigação são referentes a aquisição e instalação do sistema de irrigação (moto-bomba, tubulações e conexões, aspersores e mão de obra), este valor inicial é diluído ao longo da vida útil do sistema, sendo fixo independente do uso ou não do sistema de irrigação. Para o cálculo da depreciação (Equação 4) do sistema o valor residual do bem foi adotado em 20% do valor do equipamento novo (CONAB, 2010).

$$DC = \left(\frac{VN - VR}{VU_h} \right) \cdot HsTr \quad (4)$$

onde DC é a depreciação do componente do sistema (R\$); VN é o valor de aquisição do componente novo (R\$); VR é o valor residual do componente (R\$); VUh é a vida útil do componente (h); HsTr é o total de horas trabalhadas por hectare.

O custo de oportunidade foi calculado de acordo com a taxa de juros sobre o capital investido, no presente estudo foi considerado uma taxa de 2,8% a.a. conforme a Equação 5.

$$JC = TAJ \cdot VAE \quad (5)$$

onde JC é o juro sobre o capital investido (R\$); TAJ é a taxa anual de juros (%); VAE é o valor de aquisição dos equipamentos (R\$).

O seguro do investimento foi determinado conforme metodologia proposta pela Conab (2010) (Equação 6) como sendo 0,35% do valor médio do investimento.

$$S = \frac{VN}{2} \cdot 0,0035 \quad (6)$$

onde S é o custo com seguro (R\$); VN é o valor de aquisição do componente novo (R\$);

Para determinação dos custos variáveis relacionados à irrigação foi utilizada a seguinte Equação 7:

$$C_{vri} = W \cdot (P_w + E_e + M_o) \quad (7)$$

onde W é a lâmina de água aplicada (mm); P_w é o preço do fator água (R\$ mm^{-1}); E_e é o preço do fator energia (R\$ mm^{-1}); M_o é o preço do fator mão-de-obra empregada na irrigação (R\$ mm^{-1}).

A manutenção é entendida como o conjunto de procedimentos que visam manter o sistema de irrigação nas melhores condições possíveis de funcionamento, a fim de prolongar sua vida útil. Desse modo, o valor com manutenção é incluído no custo variável, e foi de 1% do valor do sistema de irrigação (CONAB, 2010).

O custo variável da energia elétrica foi determinado de acordo com a potência do conjunto motobomba e o tempo para aplicação da lâmina de irrigação (Equação 8). O custo da energia elétrica foi obtido de acordo com o preço da energia praticado pela concessionária da região, considerando-se a tarifa verde, que possibilita a utilização por 21 horas diárias.

$$C_{vE} = P_w \cdot E_e \cdot T \cdot L \quad (8)$$

onde: C_{vE} é o custo variável com energia elétrica (R\$); P_w é a potência do conjunto motobomba (kW); E_e é o preço da energia elétrica (R\$ kWh^{-1}); T é o tempo para aplicação de um milímetro de água (h mm^{-1}); L é a lâmina de irrigação (mm).

O valor da hora trabalhada foi determinado com base na metodologia da CONAB (2010), com o valor horário equivalente ao salário mínimo rural (Equação 9).

$$CvMo = Ni \cdot Ns \cdot 0,5 \cdot \frac{VSMin}{220} \quad (9)$$

onde CvMo é o custo com mão-de-obra empregada na irrigação (R\$); Ni é o número de irrigações; Ns é o número de setores do sistema de irrigação; VSMin é o valor do salário mínimo rural (R\$).

Os custos de manutenção foram calculados considerando os valores relativos a 1% do valor do sistema de irrigação e 10% do valor gasto com energia (Equação 10).

$$CvMan = VN \cdot 0,01 \cdot \frac{Cve}{10} \quad (10)$$

onde CvMan é o custo com manutenção dos equipamentos (R\$); VN é o valor de aquisição do componente novo (R\$ ha⁻¹); Cve é o custo variável da energia elétrica.

4.5.2 Análise da viabilidade econômica

Após o levantamento de todos os custos presentes no sistema de produção, de posse dos dados de produtividade de grãos obtidos nos experimentos e a produtividade de etanol (L.ha⁻¹), foram realizadas as análises financeira e econômica com os indicadores de investimento: valor presente líquido (VPL); taxa interna de retorno (TIR); razão benefício/custo (B/C); payback (PB) e o índice de rentabilidade (IR).

Assim, após serem verificadas as entradas e saídas, foi construído o fluxo de caixa com taxa de 2,8% ao ano (CONAB, 2010). O VPL foi calculado por meio da Equação 11:

$$VPL = \sum_{t=0}^N \frac{Ft}{(1+j)^t} \quad (11)$$

onde VPL é o valor presente líquido (R\$ ha⁻¹); j é a taxa de desconto ou taxa mínima de atratividade (TMA); N é o horizonte do projeto (anos); t é o tempo (período) do projeto (anos); Ft é o fluxo de caixa líquido em cada ano (R\$ ha⁻¹).

A taxa interna de retorno (TIR) de um projeto consiste na determinação da taxa de juros a qual o VPL é nulo. É nessa taxa que o somatório dos benefícios se torna igual ao somatório dos custos, pois o valor presente líquido é a soma algébrica, no instante zero, dos benefícios e dos custos. Sendo calculado de acordo com a Equação 12.

$$\sum_{j=0}^N \frac{F_t}{(1+TIR)^t} = 0 \quad (12)$$

onde TIR é a taxa interna de retorno, em decimal; j é a taxa de desconto ou taxa mínima de atratividade (TMA), em decimal.

Após a realização do cálculo da TIR, a mesma deve ser comparada com a TMA. Sendo o projeto aceito se apresentar TIR maior ou igual à TMA. A TIR, desta maneira, é a taxa que torna o valor dos lucros futuros equivalente aos gastos realizados com o projeto, caracterizando, desse modo, a taxa de remuneração do capital investido.

Em uma análise econômica é considerado um fluxo de caixa, onde se encontram os valores de entradas e saídas, e desta forma, se obtém a soma dos valores presentes de todos os benefícios e custos, para assim poder encontrar o valor presente líquido do fluxo de caixa. Através da razão benefício/custo é possível verificar se os benefícios atualizados são maiores que os desembolsos atualizados. No caso da relação B/C ser superior a 1, pressupõe-se um VPL positivo e assim que há viabilidade econômica do investimento, considerando a taxa de desconto empregada. Esta relação é calculada através da Equação 13:

$$B/C = \frac{\sum_{t=0}^n B/(1+j)^t}{\sum_{t=0}^n C/(1+j)^t} \quad (13)$$

onde B/C é a razão benefício/custo; B são as receitas (R\$ ha⁻¹); C são as despesas (R\$ ha⁻¹)

O IR indica o quanto de lucro ou perda o projeto obtém para um determinado período de tempo. Foi calculado dividindo o valor do VPL pelo investimento inicial, conforme mostrado na Equação 14:

$$IR = \frac{\sum_{t=0}^N \frac{F_t}{(1+j)^t}}{\text{Inv. inicial}} \quad (14)$$

Os valores de $IR > 1$ indicam que o investimento pode ser aceito, quanto maior o valor de IR, mais atraente ele se torna. Por outro lado, valores de $IR < 1$ significam que o investimento deve ser rejeitado.

4.5.3 Cenários da viabilidade econômica

Para a análise da viabilidade econômica foram elaborados cenários com as três condições de matéria-prima e os três manejos de irrigação utilizados, empregando-se cinco valores de comercialização do etanol hidratado (2,00; 2,50; 3,00; 3,50 e 4,00 R\$.L⁻¹), com custo de produção do litro na usina de etanol fixo. Com isso foram elaborados 45 cenários descritos a seguir.

Para os cenários 1 ao 30 foi utilizada a cultura do milho com as cultivares DKB 345 e DKB 230 como fonte de matéria-prima para a produção do etanol. Sendo utilizados todos os custos e produtividades obtidas das duas safras de experimentos para a condição com irrigação e para a condição de sequeiro. A diferença entre os cenários está nos cinco valores da comercialização do etanol. Para os cenários 31 ao 45 foi utilizada a cultura do sorgo granífero como fonte de matéria-prima para a produção do etanol, sendo utilizados os mesmos procedimentos dos cenários anteriores.

5 ARTIGO 1 - RENDIMENTO DE ETANOL, PRODUTIVIDADE DA ÁGUA E PRODUTIVIDADE ECONÔMICA DA ÁGUA PARA MILHO E SORGO

1 RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da irrigação na produtividade de etanol, produtividade da água e produtividade econômica da água para produção de etanol a partir das culturas de milho e sorgo granífero. O estudo foi realizado em duas safras, na área experimental do Colégio Politécnico da UFSM. O delineamento experimental utilizado foi um arranjo bifatorial, em faixas com blocos ao acaso e quatro repetições. Sendo avaliadas no fator “A”, três lâminas de irrigação: 0%, 50% e 100% da evapotranspiração de referência, e no fator “D”, cultivares de milho e sorgo granífero. O manejo da irrigação foi determinado pelo método do balanço hídrico e calculando a evapotranspiração pelo método de Penman-Monteith. Para a determinação da produtividade das culturas foram coletadas as plantas de uma área útil de 5 lineares. A produtividade de etanol de cada tratamento foi obtida pelo produto da produtividade de grãos e rendimento médio de etanol. Foram determinadas a produtividade da água e a produtividade econômica da água. As maiores produtividades de etanol foram obtidas com 100% da irrigação para a cultura do milho. A produtividade da água e a produtividade econômica da água apresentaram os melhores resultados para a lâmina de 50% de reposição hídrica.

Palavras-chave: irrigação, eficiência do uso da água, biocombustível

YIELD ETHANOL PRODUCTIVITY WATER AND ECONOMIC WATER PRODUCTIVITY FOR CORN AND SORGHUM

2 ABSTRACT

The objective of this work was to evaluate the effect of irrigation on ethanol productivity, water yield and economic productivity of water for ethanol production from corn and grain sorghum crops. The experimental design used a two-factor arrangement, in strips with randomized blocks and four replications. Being evaluated in factor “A”, three irrigation depths: 0%, 50% and 100% of the reference evapotranspiration, and in factor “D”, corn and grain sorghum cultivars. Irrigation management was determined using the water balance method and calculating evapotranspiration using the Penman-Monteith method. For the determination of the productivity of the cultures, the plants of a useful area of 5 m² were collected. The ethanol yield of each treatment was obtained by the product of grain yield and average ethanol yield. Water productivity and water economic productivity were determined. The highest ethanol yields were obtained with 100% irrigation for corn. Water productivity and water economic productivity showed the best results for the 50% water replacement depth.

Keywords: irrigation, water use efficiency, biofuel

3 INTRODUÇÃO

*Artigo submetido na Revista Irriga em 24/01/2022.

A matriz energética mundial está em processo de mudança, a necessidade de substituição do uso de combustíveis fósseis por fontes renováveis vem fomentando a pesquisa e o desenvolvimento de diversas culturas, técnicas e tecnologias de alto desempenho e baixo custo (ZHANG et al., 2016).

Uma alternativa para mitigar os impactos ambientais e o aumento do preço dos combustíveis fósseis, e atender estas novas demandas de energia, são os biocombustíveis, como o etanol, que estimulam o crescimento agrícola e proporcionam melhores condições econômicas (ECKERT et al., 2018; MACEDO et al., 2020).

O Brasil é o segundo maior produtor mundial de etanol, sendo o milho e a cana-de-açúcar as principais matérias-primas (DAR et al., 2018). O Brasil apresenta características climáticas que favorecem a produção de milho em mais de uma safra anual, aliado a isso, a cultura tem alto rendimento por área plantada, além da tecnologia de produção e pós-colheita estabelecidas (ECKERT et al., 2018).

A cultura do sorgo tornou-se uma importante alternativa como matéria-prima na produção de etanol. É uma cultura que se adapta a diferentes condições, sendo tolerante a altas temperaturas, excessos e déficits hídricos, apresentando período de crescimento e consumo de água menores em comparação a outras culturas (AYDINSAKIR et al., 2021). Segundo os autores, em condições de escassez de água, a cultura tolera uma redução de até 25% da evapotranspiração da cultura, economizando água e aumentando a produtividade e a produção de etanol.

Em regiões onde a quantidade e distribuição das chuvas não atendem às necessidades das culturas a utilização da irrigação como fonte suplementar de água é uma alternativa para dar sustentabilidade aos sistemas produtivos (GAJIĆ et al., 2018). Na irrigação, é frequente a ocorrência de desperdício de água devido a diversos fatores, como o manejo inadequado,

*Artigo submetido na Revista Irriga em 24/01/2022.

disponibilidade hídrica excessiva ou restritiva e escoamento superficial, gerando oportunidades para melhorar a eficiência e a produtividade da água neste setor (IBIDHI et al., 2020).

Visando uma gestão eficiente na agricultura irrigada, a produtividade da água e a produtividade econômica da água são elementos que possibilitam a avaliação da irrigação, proporcionando o uso racional e de menor custo (HAN et al., 2018; CETIN; KARA, 2019). A irrigação pode reduzir os ganhos do produtor devido ao aumento dos custos relacionados com o sistema de bombeamento de água, por isso, a produtividade econômica da água é importante na definição de tecnologias que proporcionem economia de água na irrigação (CETIN; AKINCI, 2021).

Diante do exposto, o presente estudo tem como objetivo avaliar o efeito da irrigação na produtividade de etanol, produtividade da água e produtividade econômica da água para produção de etanol a partir das culturas de milho e sorgo granífero.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo foi realizado em duas safras, com as sementeiras nos dias 15 de dezembro de 2019 e 17 de dezembro de 2020. A cultivar de sorgo granífero, biomatrix BM 737 e as cultivares de milho, DKB345 IPRO3 RR e DKB230 IPRO3 foram cultivadas com densidades de sementeira de 180.000 e 90.000 plantas por hectare, respectivamente.

A área experimental está localizada no Colégio Politécnico da UFSM, na região fisiográfica da Depressão Central do estado do Rio Grande do Sul - RS, latitude de 29° 42' 55,20" S, longitude 53° 44' 22,60" O e altitude de 120 metros. O solo é classificado como Argissolo Vermelho Eutrófico típico (EMBRAPA, 2006). O clima, é classificado segundo KÖEPPEN (MORENO, 1961) como do tipo Cfa – subtropical úmido, sem estação seca e com

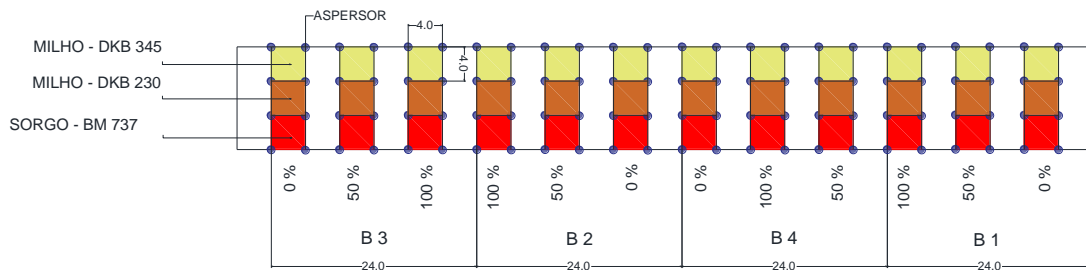
*Artigo submetido na Revista Irriga em 24/01/2022.

temperaturas médias em 16,1 °C no período do inverno e 22,5 °C no período do verão, com precipitação anual média de 1688 mm.

O delineamento experimental utilizado foi um arranjo bifatorial, em faixas com blocos ao acaso e quatro repetições. Foram avaliadas no fator “A”, as influências de duas lâminas de irrigação: 50% e 100% da evapotranspiração de referência (ET_o) e a testemunha sem irrigação, e no fator “D”, as respostas das cultivares de milho e sorgo granífero. Cada unidade experimental foi irrigada por 4 aspersores com 100% de sobreposição, totalizando uma área de 16 m².

A Figura 1 apresenta o croqui da área experimental, com a disposição das culturas e dos aspersores.

Figura 1. Croqui da área experimental



Fonte: Os Autores

A taxa de infiltração de água no solo foi de 15 mm h⁻¹, e os limites de capacidade de campo e ponto de murcha permanente do solo foram de 0,30 e 0,16 m³ m⁻³ respectivamente.

O manejo da irrigação foi determinado pelo método do balanço hídrico, monitorando as variáveis meteorológicas e calculando a evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith. Quando ocorreu precipitação pluvial no intervalo das irrigações, foi determinada a precipitação efetiva através da metodologia proposta por Millar (1978).

*Artigo submetido na Revista Irriga em 24/01/2022.

Foi adotado um turno de rega fixo de 7 dias quando a precipitação pluvial efetiva não suprisse a demanda hídrica de referência no período. O sistema de irrigação foi calibrado a uma taxa de aplicação de 13 mm h^{-1} , determinada pelo teste de uniformidade de Christiansen (CUC). As diferentes lâminas de irrigação foram obtidas pela variação do tempo de aplicação de água, sendo que o tempo de irrigação foi determinado pela Eq. 1.

$$T_i = \frac{L_n}{L_r \cdot E_f} 100 \quad (1)$$

onde T_i - tempo de irrigação (h); L_n - lâmina necessária (mm); L_r - lâmina de referência (mm h^{-1}); E_f - eficiência de aplicação (%).

Para a determinação da produtividade das culturas foram coletadas as plantas de uma área útil 5 lineares e, posteriormente, trilhadas, limpas, pesadas e realizada a correção da umidade para 13%. A produtividade de etanol de cada tratamento foi obtida pelo produto da produtividade de grãos e rendimento médio de etanol. Assim, foi adotado o rendimento médio de etanol de 390 L ton^{-1} (KUMAR et al., 2020).

Para determinar a produtividade de água foi empregada uma metodologia que consiste em relacionar o volume total de água aplicada (precipitação efetiva + lâmina de água) com a produção total de grãos Eq. 2.

$$PA = \frac{Y}{W} \quad (2)$$

onde PA - produtividade da água, ($\text{L.ha}^{-1}.\text{mm}^{-1}$); Y - produtividade da cultura em litros de etanol, (L.ha^{-1}) e W - lâmina total de água aplicada durante o ciclo da cultura, (mm).

Além disso, foi determinada a produtividade econômica da água por meio da Eq. 3.

$$PEA = \frac{p \cdot Y}{W} \quad (3)$$

onde PEA - produtividade econômica da água ($R\$.ha^{-1}.mm^{-1}$) e p - preço médio do litro de etanol ($R\$.L^{-1}$).

Para o preço de comercialização do etanol foi obtido o valor médio de comercialização para o período de $R\$ 3,00 L^{-1}$ disponibilizado pelo Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada - CEPEA.

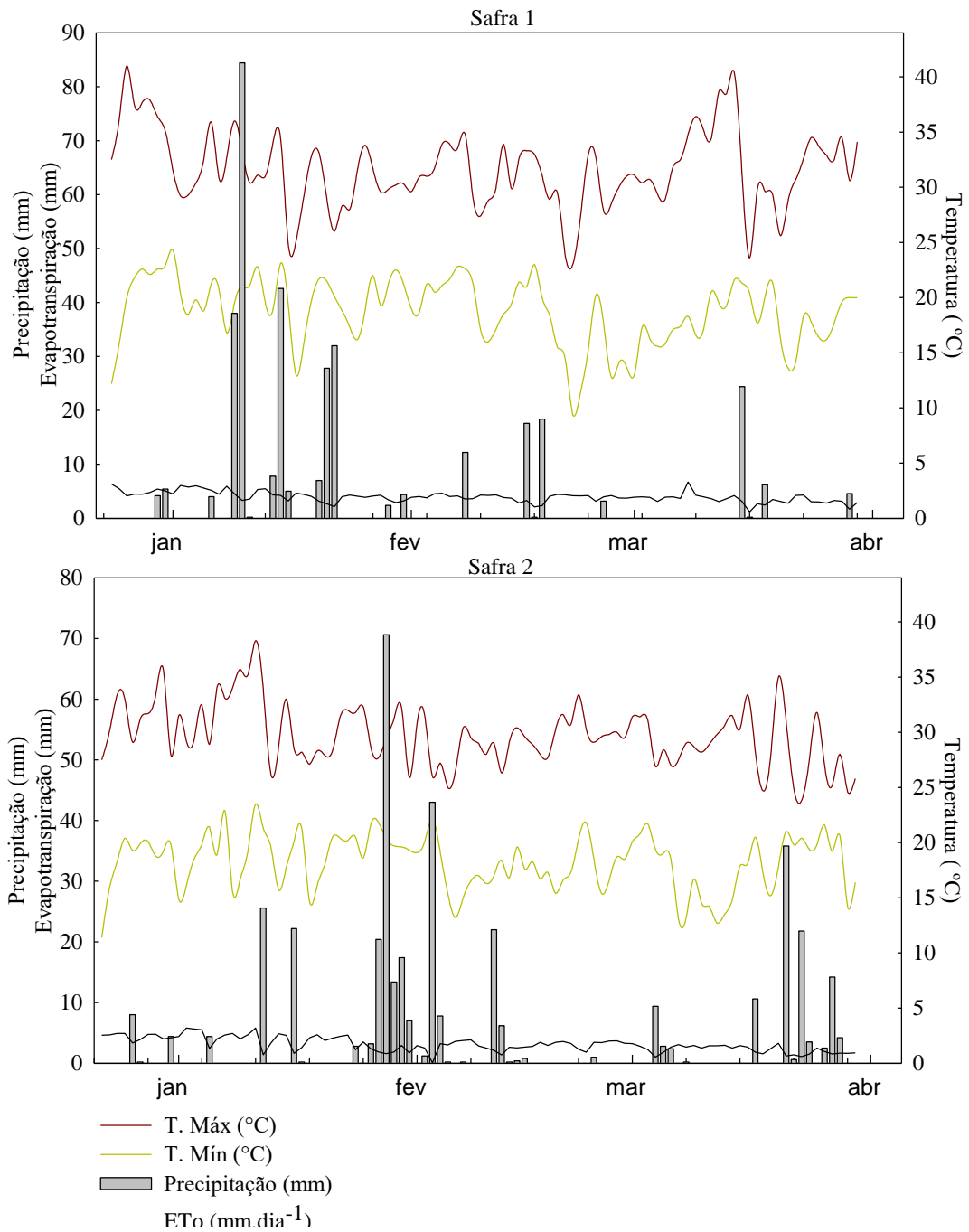
Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) a nível de 5% de probabilidade de erro com auxílio do programa Sisvar 5.6. Havendo interação entre os fatores culturas e lâminas de irrigação, foi realizada análise de regressão e a máxima eficiência técnica e não apresentando interação entre os fatores, realizou-se a comparação de médias pelo teste de Tukey a nível de 5% de probabilidade de erro.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados meteorológicos de temperaturas máximas e mínimas, evapotranspiração e precipitação para as duas safras, podem ser observados na Figura 2.

*Artigo submetido na Revista Irriga em 24/01/2022.

Figura 2. Evapotranspiração (mm), precipitação (mm), temperatura máxima (°C) e temperatura mínima (°C) para as duas safras avaliadas.



Avaliando os dados meteorológicos para as duas safras, é possível verificar que a média das temperaturas máximas e mínimas foi de 30,65 e 18,75 °C, para a primeira safra e de 29,75 e 18,22°C para a segunda, respectivamente. A temperatura ideal para o desenvolvimento do

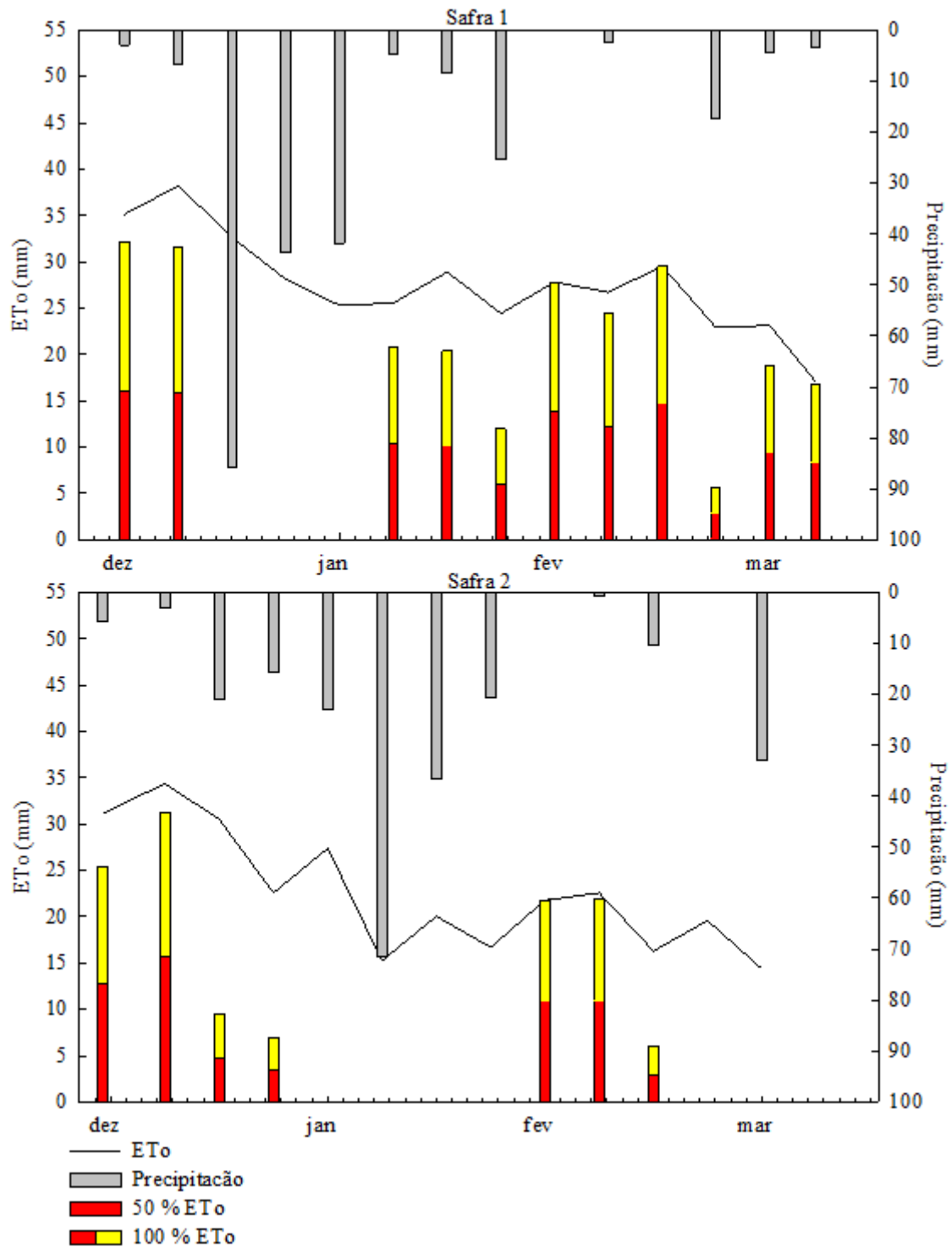
milho está entre 10 e 32°C (RENATO et al., 2013). Já para a cultura do sorgo granífero, temperaturas abaixo de 19°C e acima de 32,5°C reduzem o rendimento da cultura (HOFFMAN et al., 2020). Estes estudos estão de acordo com as temperaturas observadas em ambas as safras.

A evapotranspiração acumulada foi de 388,43 mm e 304,60 mm nas safras 1 e 2, respectivamente. Valores superiores aos encontrados nas duas safras foram observados por Niaghi et al. (2019), que em quatro anos de avaliações obtiveram uma evapotranspiração para a cultura do milho de 460 mm a 550 mm. Araya et al. (2019), corroborando com o presente estudo, verificaram uma evapotranspiração da cultura do sorgo granífero que variou entre 336 mm e 469 mm.

A precipitação apresentou valores com pequena variação para os anos de experimento, onde na safra 1 foi de 334,2 mm e na safra 2 de 377,8 mm, sendo que os eventos com maior volume de precipitações ocorreram de forma acumulada, no período inicial do desenvolvimento das culturas e com uma distribuição irregular ao longo do ciclo, necessitando, nestas condições, de um aporte de irrigação para garantir a produção.

Na primeira safra, foram necessárias onze irrigações ao longo do desenvolvimento das culturas, onde o total de água aplicada foi de 228,10 mm e 114,05 mm para os tratamentos com 100% e 50% de reposição de água, respectivamente. Na segunda safra, foram realizadas sete irrigações com uma lâmina total de água aplicada de 136,40 mm e 68,20 mm para os tratamentos com 100% e 50% de reposição de água, respectivamente, conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3. Valores acumulados a cada sete dias de precipitação efetiva (mm), evapotranspiração (mm) e lâminas de irrigação (mm) para as duas safras.



Nas condições dos dois anos do presente estudo, as necessidades de irrigação estiveram de acordo com estudos já realizados. Araya et al. (2017) recomendam uma irrigação suplementar para a cultura do milho de 150 mm, 300 mm e 450 mm dependendo do regime hídrico de cada ano, chuvoso, normal e seco, respectivamente. Para a cultura do sorgo granífero, Araya et al. (2019) consideram que um volume de irrigação suplementar de 100 a 250 mm é ideal para o rendimento da cultura.

Com a análise da variância foi possível verificar que não houve interação entre os fatores lâminas de irrigação e culturas produtoras de etanol à nível de 5% de significância. No entanto, houve diferença significativa entre as culturas para a produtividade de etanol, produtividade da água e produtividade econômica da água nas duas safras avaliadas, conforme Tabela 1.

Tabela 1. Produtividade de etanol (PE, L.ha⁻¹), produtividade da água (PA, L.ha⁻¹.mm⁻¹) e produtividade econômica da água (PEA, R\$.ha⁻¹.mm⁻¹) para as culturas do milho e sorgo granífero nas safras 1 e 2.

Culturas	SAFRA 1			SAFRA 2		
	PE	PA	PEA	PE	PA	PEA
Milho DKB 345	5.114,28a*	14,86a	44,59a	4.320,75a	12,78a	38,34a
Milho DKB 230	4.960,19a	14,35a	43,07a	4.137,31a	12,44a	37,33a
Sorgo BM 737	2.003,05b	5,59b	16,77b	3.071,36b	9,15b	27,46b
**CV (%)	11,18	11,49	11,50	13,09	13,84	13,83

*Médias seguidas de letras minúsculas na vertical diferem-se significativamente entre si à nível de 5% de probabilidade de erro. **CV = coeficiente de variação.

A cultivar BM 737 de sorgo granífero apresentou resultados estatisticamente inferiores quando comparada às duas cultivares de milho nos dois anos avaliados. Não havendo diferença

significativa entre as variedades de milho. O milho apresentou um incremento de 60,23% e 27,37% na produtividade de etanol, 61,72% e 27,44% para a produtividade da água e 62,17% e 27,42% para a produtividade econômica da água, nas duas safras, respectivamente.

De acordo com o presente estudo, Zhang et al. (2018) observaram, em duas safras, que não houve diferença significativa no rendimento de etanol para as duas cultivares de milho avaliadas. Os resultados para as duas variedades de milho foram iguais estatisticamente, havendo diferença somente entre as culturas. Estando de acordo com Khalaf et al. (2019), que observaram, para duas variedades de sorgo forrageiro, valores de produtividade da água semelhantes.

Bhattarai et al. (2020), ao avaliarem a produtividade da água na produção de sorgo, milheto e milho para silagem, observaram maiores valores para o sorgo, seguidas do milheto e do milho, sob condições limitadas de irrigação. No presente estudo, o qual objetivou a produção de etanol, o comportamento entre as culturas foi diferente, com o milho apresentando a melhor produtividade da água.

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos para a produtividade do etanol, produtividade da água e produtividade econômica da água de acordo com as diferentes lâminas de irrigação utilizadas.

Tabela 2. Produtividade de etanol (PE, L.ha⁻¹), produtividade da água (PA, L.ha⁻¹.mm⁻¹) e produtividade econômica da água (PEA, R\$.ha⁻¹.mm⁻¹) para 100%, 50% e 0% de reposição hídrica nas safras 1 e 2.

Lâminas (%ETo)	SAFRA 1			SAFRA 2		
	PE	PA	PEA	PE	PA	PEA
0	2.586,24a	11,06b	33,20b	2.713,41c	10,28b	30,85b
50	4.493,82b	12,92a	38,77a	4.024,41b	12,12a	36,36a
100	4.997,46c	10,82b	32,46b	4.791,59a	11,97a	35,91a
CV (%)	11,18	11,49	11,50	13,09	13,84	13,83

*Médias seguidas de letras minúsculas na vertical diferem-se significativamente entre si à nível de 5% de probabilidade de erro. **CV = coeficiente de variação.

Na primeira safra o uso da irrigação apresentou diferença significativa entre os tratamentos testados, e o uso de 100% da reposição de água resultou em um incremento de 48,25% e 10,08% para a produtividade do etanol quando comparada com a testemunha e 50% de reposição de água, respectivamente. Para a PA e a PEA, o melhor resultado foi obtido na lâmina de 50%. Para a PA, o incremento foi de 14,40% e 16,25%, e para a PEA foi de 14,36% e 16,27%, quando comparadas a testemunha e a lâmina de 100% de reposição de água, respectivamente.

Na segunda safra, a produtividade de etanol apresentou o mesmo comportamento da primeira, com incremento de produtividade de 45,42% e 16,02% quando comparada a testemunha e a lâmina de 50% de reposição de água. No entanto, para PA e PEA, a diferença ocorreu entre o uso da irrigação e a condição de sequeiro, com valores próximos entre os tratamentos irrigados. O aumento na PA foi de 14,69% e de 14,64% para PEA, quando comparado o tratamento sem irrigação com os irrigados.

*Artigo submetido na Revista Irriga em 24/01/2022.

Corroborando com os resultados encontrados de incremento na produtividade de etanol, Aydinsakir et al. (2021) ao compararem tratamentos de irrigação plena e não irrigado, observaram um aumento na produção de etanol de 56,70% no primeiro ano e 37,53% no segundo ano de experimento. Pang et al. (2018) e Zhang et al. (2018) também observaram acréscimo na produtividade de etanol conforme o aumento da frequência de irrigação para as culturas de sorgo granífero e milho, respectivamente.

Os tratamentos com suplementação hídrica, apresentaram os melhores resultados para PA, com a irrigação intermediária obtendo os maiores valores. Esses resultados são semelhantes aos encontrados por Bell et al. (2018), que trabalhando com sorgo granífero obtiveram produtividade máxima da água em tratamentos com 75% e 100% da irrigação plena. Assim como no estudo conduzido, em duas safras, por Zou et al. (2021) que as maiores produtividades da água foram de aproximadamente 66% e 77% da necessidade hídrica e as menores no tratamento com irrigação plena.

O maior rendimento foi obtido na lâmina com 100% de reposição de água, no entanto a maior PA foi na lâmina de 50% com uma redução de 10% no rendimento, estando de acordo com Kothari et al. (2020), ao relatarem que a irrigação com déficit de 20% da irrigação plena, apresentou os maiores resultados para produtividade da água, mesmo com uma queda de 11% no rendimento de grãos.

Diferindo-se dos resultados encontrados no presente estudo, Chico et al. (2015) trabalhando com produção de etanol da cana-de-açúcar, observaram maiores valores de produtividade econômica da água nos tratamentos de irrigação completa, por outro lado os menores valores estão em concordância com o presente estudo que foram para o tratamento não irrigado.

*Artigo submetido na Revista Irriga em 24/01/2022.

6 CONCLUSÃO

A lâmina de irrigação de 100% de reposição de água proporcionou um incremento de 46,8% na produtividade de etanol para as culturas. A suplementação hídrica é necessária para uma maior produtividade de etanol. A lâmina de 50%, de reposição de água apresentou resultados 15,3% superiores às demais lâminas para a produtividade da água e produtividade econômica da água. Esses indicadores podem auxiliar na utilização de uma irrigação eficiente que reduza a quantidade de água utilizada e garanta um retorno econômico

A cultura do milho obteve o melhor desempenho para a produtividade de etanol, produtividade da água e produtividade econômica da água, quando comparada com a cultura do sorgo granífero.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

7 REFERÊNCIAS

ARAYA, A.; KISEKKA, I.; PRASAD, P.V.; GOWDA, P. H. Evaluating Optimum Limited Irrigation Management Strategies for Corn Production in the Ogallala Aquifer Region. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering** , v. 143, n. 10, pág. 04017041, 2017. DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001228.

*Artigo submetido na Revista Irriga em 24/01/2022.

ARAYA, A.; GOWDA, P.H.; GOLDEN, B.; FOSTER, A.J.; AGUILAR, J.; CURRIE, R.; CIAMPITTI, I.A.; PRASAD, P.V.V. Economic value and water productivity of major irrigated crops in the Ogallala aquifer region. **Agricultural Water Management**, v. 214, p. 55-63, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.11.015>

AYDINSAKIR, K.; BUYUKTAS, D.; DINÇ, N.; ERDURMUS, C.; BAYRAM, E.; YEGIN, A. B. Yield and bioethanol productivity of sorghum under surface and subsurface drip irrigation. **Agricultural Water Management**, v. 243, p. 106452, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106452>

BELL, J. M.; SCHWARTZ, R.; MCINNES, K. J.; HOWELL, T.; MORGAN, C. L. Deficit irrigation effects on yield and yield components of grain sorghum. **Agricultural water management**, v. 203, p. 289-296, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.03.002>

BHATTARAI, B.; SINGH, S.; WEST, C. P.; RITCHIE, G. L.; TROSTLE, C. L. Water depletion pattern and water use efficiency of forage sorghum, pearl millet, and corn under water limiting condition. **Agricultural Water Management**, v. 238, p. 106206, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106206>

CETIN, O.; AKINCI, C. Water and economic productivity using different planting and irrigation methods under dry and wet seasons for wheat. **International Journal of Agricultural Sustainability**, p. 1-13, 2021. <https://doi.org/10.1080/14735903.2021.1999682>

CETIN, O.; KARA, A. Assessment of water productivity using different drip irrigation systems for cotton. **Agricultural Water Management**, v. 223, p. 105693, 2019. [doi:https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105693](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105693)

CHICO, D.; SANTIAGO, A. D.; GARRIDO, A. Increasing efficiency in ethanol production: Water footprint and economic productivity of sugarcane ethanol under nine different water regimes in north-eastern Brazil. **Spanish journal of agricultural research**, v. 13, n. 2, p. 7, 2015. <http://dx.doi.org/10.5424/sjar/2015132-6057>

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar – v.8, n.3 (2021) – Brasília : Conab, 2021- Terceiro levantamento, p. 1-63

DAR, R. A.; DAR, E. A.; KAUR, A.; PHUTELA, U. G. Sweet sorghum-a promising alternative feedstock for biofuel production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 4070-4090, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.066>

ECKERT, C. T.; FRIGO, E. P.; ALBRECHT, L. P.; ALBRECHT, A. J. P.; CHRIST, D.; SANTOS, W. G.; BERKEMBROCK, E.; EGEWARTH, V. A. Maize ethanol production in Brazil: Characteristics and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 3907-3912, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.082>

EMBRAPA - Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306 p.

GAJIĆ, B.; KRESOVIĆ, B.; TAPANAROVA, A.; ŽIVOTIĆ, L.; TODOROVIĆ, M. Effect of irrigation regime on yield, harvest index and water productivity of soybean grown under different precipitation conditions in a temperate environment. **Agricultural Water Management**, v. 210, p. 224–231, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.08.002>

HAN, X.; WEI, Z.; ZHANG, B.; HAN, C.; SONG, J. Effects of crop planting structure adjustment on water use efficiency in the irrigation area of Hei River Basin. **Water (Switzerland)**, v. 10, n. 10, 2018. <https://doi.org/10.3390/w10101305>

HOFFMAN, A. L.; KEMANIAN, A. R.; FOREST, C. E. The response of maize, sorghum, and soybean yield to growing-phase climate revealed with machine learning. **Environmental Research Letters**, v. 15, n. 9, p. 094013, 2020. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab7b22>.

IBIDHI, R.; SALEM, H. B. Water footprint and economic water productivity assessment of eight dairy cattle farms based on field measurement. **animal**, v. 14, n. 1, p. 180-189, 2020. <https://doi.org/10.1017/S1751731119001526>.

*Artigo submetido na Revista Irriga em 24/01/2022.

KHALAF, A. A.; ISSAZADEH, L.; ABDULLAH, Z. A.; HASSANPOUR, J. Growth and Yield Assessment of Two Types of Sorghum-Sudangrass Hybrids as Affected by Deficit Irrigation. **International Journal of Agricultural and Biosystems. Engineering**, v. 13, n. 7, p. 214-218, 2019.

KOTHARI, K.; ALE, S.; BORDOVSKY, J. P.; MUNSTER, C. L. Assessing the climate change impacts on grain sorghum yield and irrigation water use under full and deficit irrigation strategies. **Transactions of the ASABE**, v. 63, n. 1, p. 81-94, 2020. <https://doi.org/10.13031/trans.13465>.

KUMAR, S. P. J.; KUMAR, N. S. S; CHINTAGUNTA, A. D. Bioethanol production from cereal crops and lignocelluloses rich agro-residues: prospects and challenges. **SN Applied Sciences**, v. 2, n. 10, p. 1-11, 2020. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03471-x>.

MACEDO, A. A.; MEDEIROS, R. G.; SILVÉRIO, T. A. B.; NELSON, D. L.; OLIVEIRA, D. C. S.; DOS REIS, A. B. Possibilities and Prospects Regarding Ethanol Production from Saccharin Sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. **SN Applied Sciences**, v. 2, n. 12, p. 1-12, 2020. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03912-7>.

MILLAR, A. A. Drenagem de terras agrícolas: bases agronômicas. Bib. Orton IICA/CATIE, 1978.

MORENO, J. A. Clima do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura, 1961. 42 p.

PANG, B.; ZHANG, K.; KISEKKA, I.; BEAN, S.; ZHANG, M.; WANG, D. Evaluating effects of deficit irrigation strategies on grain sorghum attributes and biofuel production. **Journal of cereal science**, v. 79, p. 13-20, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2017.09.002>.

RENATO, N. S.; SILVA, J. B. L.; SEDIYAMA, G. C.; PEREIRA, E. G. Influência dos métodos para cálculo de graus-dia em condições de aumento de temperatura para as culturas de milho e feijão. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 28, n. 4, p. 382-388, 2013. DOI: 10.1590/S0102-77862013000400004.

ZHANG, J.; SONG, Y.; WANG, B.; ZHANG, X.; TAN, T. Biomass to bio-ethanol: The evaluation of hybrid Pennisetum used as raw material for bio-ethanol production compared with corn stalk by steam explosion joint use of mild chemicals. **Renewable energy**, v. 88, p. 164-170, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.11.034>.

ZHANG, K.; PANG, B.; KISEKKA, I.; ZHANG, M.; ROGERS, D.; WANG, D. Effect of irrigation on physicochemical properties and bioethanol yield of drought tolerant and conventional corn. **Irrigation science**, v. 36, n. 2, p. 75-85, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00271-017-0563-7>.

ZOU, Y.; SADDIQUE, Q.; ALI, A.; XU, J.; KHAN, M. I.; QING, M.; AZMAT, M; CAI, H.; SIDDIQUE, K. H. Deficit irrigation improves maize yield and water use efficiency in a semi-arid environment. **Agricultural Water Management**, v. 243, p. 106483, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106483>.

6 ARTIGO 2 – ECONOMIC INDICATORS FOR ETHANOL PRODUCTION FROM STARCH CROPS UNDER DIFFERENT IRRIGATION MANAGERMENTS

HIGHLIGHTS:

The market value of ethanol influences its production viability.

Full irrigation (100% of ETo) reduces the unit cost of ethanol production.

The scenarios are favorable for maize and grain sorghum in ethanol production, with selling prices above R\$ 2.50 L⁻¹.

ABSTRACT: The state of Rio Grande do Sul has an ethanol production of less than 1% of its demand; this is due to the fact that sugarcane, the main raw material used in Brazil, does not adapt well to the state's climate. The study aims to quantify the production costs of maize and sorghum crops under rainfed and irrigated conditions for the generation of ethanol and to evaluate the economic feasibility in different scenarios of product marketing price. Two experiments were carried out in the years 2019/20 and 2020/21, in an experimental area located at the Federal University of Santa Maria, Santa Maria, RS, Brazil. The experiment was in strip plots, in a randomized block design and four replicates. Two irrigation depths, 50 and 100% of the reference evapotranspiration (ETo), and the control without irrigation were evaluated as first factor, and two maize cultivars and one grain sorghum cultivar were evaluated as second factor. Different scenarios with the two raw materials, five market values of ethanol and use of irrigation were considered. The use of full irrigation (100% of ETo) reduces the production costs of the liter of ethanol by 15 and 17.89% and increases ethanol production by 44.18 and 48.25% for maize and grain sorghum crops, respectively. For the market price of R\$ 2.00 L⁻¹, the grain sorghum crop does not show good performance, with negative net present value (NPV) and internal rate of return (IRR). In the other scenarios the crop had positive results for

*Artigo publicado na Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental em 13/05/2022

all indicators. The sale price of R\$ 4.00 L⁻¹ and full irrigation is the best economic scenario, with values of NPV of R\$ 90,356.93, IRR of 33.83%, benefit/cost ratio (B/C) of 2.28, profitability index (PI) of 3.99 and payback of three years. Maize crop is economically viable for ethanol production in all scenarios, with positive results for all indicators. Full irrigation and market price of R\$ 4.00 L⁻¹ represent the best economic scenario, with mean values for NPV of R\$ 204,381.68, IRR of 63.35%, B/C of 2.96, PI of 8.67 and payback of 1.58 years, among the cultivars.

Key words: grain sorghum, maize, economic viability, water management, biofuel

Indicadores econômicos para produção de etanol proveniente de culturas amiláceas sob diferentes manejos de irrigação

RESUMO: O Estado do Rio Grande do Sul tem uma produção de etanol inferior a 1% de sua demanda; isso se deve ao fato da cana-de-açúcar, principal matéria-prima utilizada no Brasil, não se adaptar bem ao clima do Estado. O estudo visa quantificar os custos de produção das culturas de milho e sorgo em condições de sequeiro e irrigado para a geração de etanol, e avaliar a viabilidade econômica em diferentes cenários de preço de comercialização do produto. Foram realizados dois experimentos nos anos de 2019/20 e 2020/21, em área experimental localizada na Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS. O delineamento experimental foi em faixas, com blocos ao acaso e quatro repetições. Foram avaliadas duas lâminas de irrigação: 50 e 100% da evapotranspiração de referência (ET_o) e a testemunha sem irrigação como o primeiro fator, e duas cultivares de milho e uma de sorgo granífero como o segundo fator. Sendo utilizados diferentes cenários com as duas matérias-primas, cinco valores de comercialização do etanol e uso da irrigação. O uso da irrigação plena (100% de ET_o) reduz os custos de

produção do litro de etanol em 15 e 17,89% e aumenta a produção de etanol em 44,18 e 48,25% para as culturas de milho e sorgo, respectivamente. Para o preço de mercado de R\$ 2,00 L⁻¹, a cultura do sorgo granífero não apresenta bom desempenho, com valor presente líquido (NPV) e taxa interna de retorno (IRR) negativos, nos demais cenários a cultura apresentou os resultados positivos para todos os indicadores. O preço de venda de R\$ 4,00 L⁻¹ e irrigação plena é o melhor cenário econômico, com valores de NPV de R\$ 90.356,93, IRR de 33,83%, relação benefício/custo (B/C) de 2,28, índice de rentabilidade (PI) de 3,99 e payback de três anos. A cultura do milho é economicamente viável para a produção de etanol em todos os cenários, com resultados positivos para todos os indicadores, sendo a irrigação plena e preço de comercialização de R\$ 4,00 L⁻¹, o que apresentou o melhor cenário econômico, com valores médios para o NPV de R\$ 204.381,68, IRR de 63,35%, B/C de 2,96, IR 8,67 e payback de 1,58 anos, entre as cultivares.

Palavras-chave: sorgo granífero, milho, viabilidade econômica, manejo de água, biocombustível

INTRODUCTION

Currently, ethanol is the main alternative to replace fossil fuels (Persson et al., 2020), and in Brazil sugarcane is the main raw material used. However, alternative crops have been gaining space, especially maize (Szambelan et al., 2018). The use of grain sorghum for ethanol production in Brazil is still limited, but the production process is similar to that of maize (Menezes et al., 2021). And due to its performance under water restrictions, sorghum is on the rise in other regions (Kothari et al., 2019).

Irrigated agriculture is the main consumer of water in the world. However, without the use of this technology, the demands for food and biofuels would hardly be achieved due to the

*Artigo publicado na Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental em 13/05/2022

impact of climate change on production (Asseng et al., 2018; Davarpanah & Ahmadi, 2021; Ding et al., 2021). Water requirement for maize and sorghum crops is 660 mm (Zhang et al., 2019) and 460 mm (Araya et al., 2018), respectively. In localities where effective rainfall is lower, the use of irrigation is important to meet crop water demand (Comas et al., 2019).

Furlaneto & Esperancini (2010) highlight that to estimate the production costs of an agricultural activity, it is necessary to use some economic indicators, the main ones being net revenue, profitability index, net operating revenue and rate of return. For Sesmero et al. (2012), the economic viability of maize ethanol production involves the technical and financial efficiency of industries, prices of raw material, ethanol and public policies. Stamenković et al. (2020) highlight the various possibilities of obtaining sorghum ethanol and emphasize the importance of further research to improve processes.

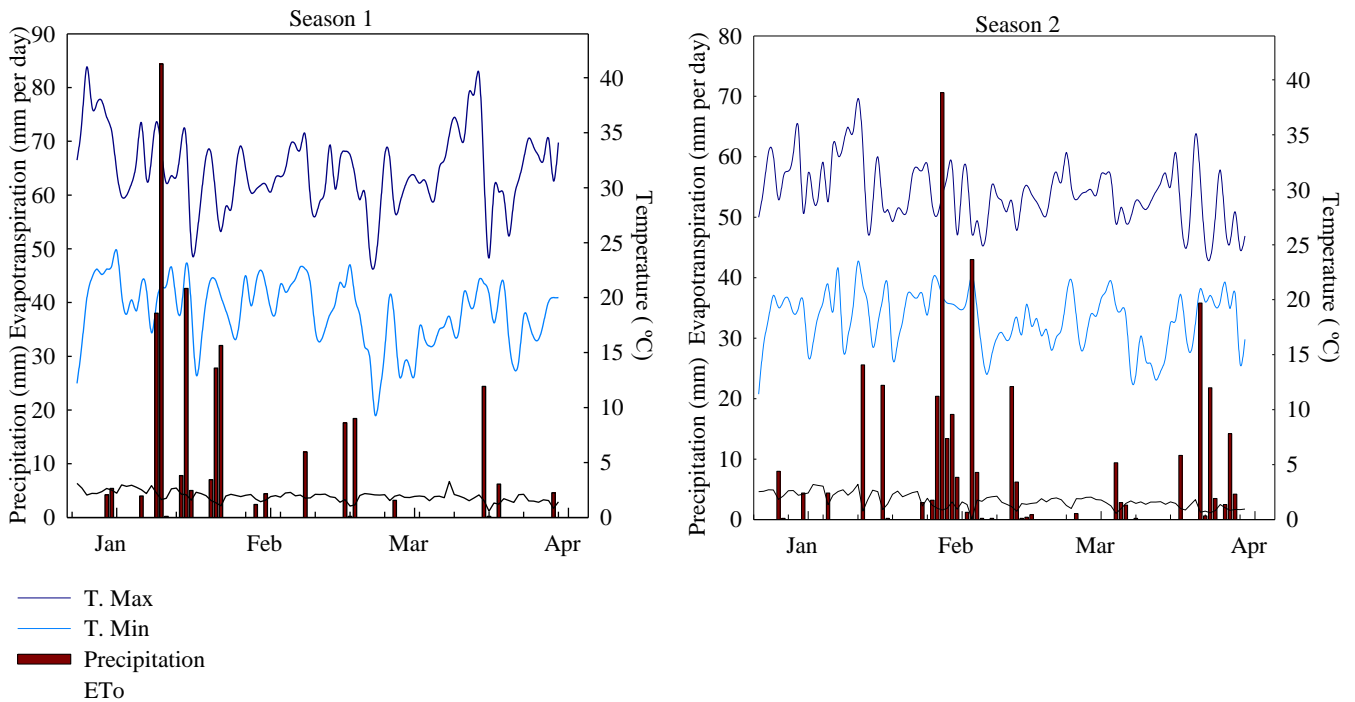
The study aims to quantify the production costs of maize and sorghum crops under rainfed and irrigated conditions for the generation of ethanol and to evaluate the economic feasibility in different scenarios of product marketing price.

MATERIAL AND METHODS

The present study was conducted in 2019/20 (crop season 1) and 2020/21 (crop season 2), with sowing carried out on December 15, 2019, and on December 17, 2020. The maize cultivars DKB345 IPRO3 RR and DKB230 IPRO3, and the sorghum cultivar biomatrix BM 737 were cultivated with sowing densities of 90,000 and 180,000 plants ha⁻¹, respectively.

The experimental area, with 3000 m², is located in the Polytechnic School of UFSM, in the physiographic region of the Central Depression of Rio Grande do Sul state, RS, Brazil, at 29° 42' 55.20" S latitude, 53° 44' 22.60" W longitude and altitude of 120 m. The soil is classified as Ultisol.

The climate of the region, according to the classification of Köppen (Moreno, 1961) is Cfa – humid subtropical, without dry season and with average temperatures of 16.1 °C in the winter and 22.5 °C in the summer, with average annual rainfall of 1,688 mm distributed throughout the year. Figure 1 shows the average maximum and minimum temperatures, effective precipitation, and daily evapotranspiration for crop seasons 1 and 2.



Season 1 - 2019/20; Season 2 - 2020/21

Figure 1. Maximum (T.Max) and minimum (T.Min) temperature, precipitation, and evapotranspiration (ETo) data for both analyzed crop seasons

The experiment was arranged in strip plots, in a randomized block design and four replicates. The influence of two irrigation depths (50 and 100% of the reference evapotranspiration - ETo) and the control without irrigation were evaluated as first factor and the responses of maize and grain sorghum cultivars were evaluated as second factor. The experimental plots were 4 m wide and 4 m long, totaling an area of 16 m² and were irrigated by four sprinklers with 100% overlap

within the plot for better uniformity of water application. Each experimental plot was spaced 4 m apart to avoid interference between treatments.

Soil water infiltration rate was determined by the double-ring infiltrometer method and was equal to 15 mm h^{-1} . The limits of field capacity and permanent wilting point of the soil were 0.30 and $0.16 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectively. Soil chemical analysis showed the following results: pH of 5.6, $8.1 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ of Ca, $3.3 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ of Mg, $0.0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ of Al, effective CEC of $11.7 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, CEC at pH 7 of $15.2 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, base saturation of 77%, SMP index of 6.2, 2.3% organic matter, 28% clay, 9.7 mg dm^{-3} of P (Mehlich) and 96 mg dm^{-3} of K (Mehlich).

Fertilization for the crops was carried out in the recommended amount after chemical analysis, according to the Fertilization and Liming Manual for RS and SC (CQFS-RS/SC 2016). Basal fertilization was 380 kg ha^{-1} with a formulation of 5-20-20 NPK with two applications of 200 kg ha^{-1} of urea. During the development of the crops, three applications of insecticide and two applications herbicide were carried out to control weeds.

Irrigation management was carried out based on the water balance, through the monitoring of meteorological variables. The data were obtained through the National Institute of Meteorology's automatic meteorological station, located at UFSM, situated approximately 2 km from the area. The data collected daily were maximum and minimum temperatures ($^{\circ}\text{C}$), relative air humidity (%), wind speed (m s^{-1}), solar radiation (kJ m^{-2}), and precipitation (mm). The reference evapotranspiration (ET_o) was calculated using the Penman-Monteith method (Allen et al., 1998). In the occurrence of rainfall during this interval, the methodology proposed by Millar (1978) was used to obtain the effective rainfall. The irrigation interval adopted was fixed to seven days, and when there was no effective rainfall to meet the water demand, irrigation was performed with the sum of the ET_o of the period.

By performing a sprinkle irrigation test, an application rate of 13 mm h^{-1} and a Christiansen uniformity coefficient (CUC) of 93.50% were determined. The different irrigation depths were

obtained by varying the time of water application in order to obtain the 50 and 100% ETo treatments, and the irrigation time was determined by Eq. 1:

$$T_i = \frac{D_{rq}}{D_{rf} \times CUC} \cdot 100 \quad (1)$$

where:

T_i - irrigation time (h);

D_{rq} - required depth (mm);

D_{rf} - reference depth (mm h^{-1}); and,

CUC - Christiansen uniformity coefficient (%).

Ethanol production was obtained by the product between grain yield and average ethanol yield for each crop in the different irrigation treatments, according to Eq. 2. The average ethanol yield adopted was 390 L t^{-1} (Kumar et al., 2020).

$$P_{\text{ethanol}} = P_{\text{grain}} \times Y_{\text{ethanol}} \quad (2)$$

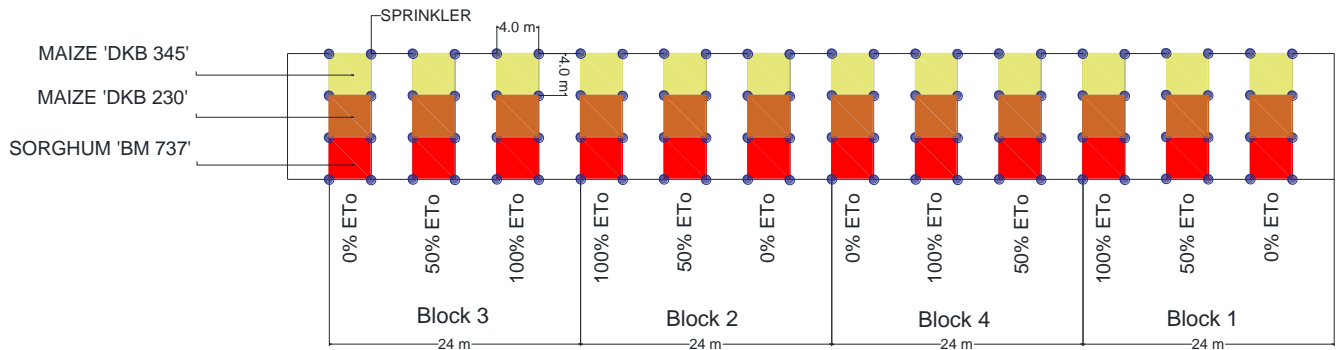
where:

P_{ethanol} – ethanol production (L);

P_{grain} – grain yield (ton); and,

Y_{ethanol} – ethanol yield (L t^{-1}).

The study of production costs was carried out based on the methodology proposed by CONAB (2010). Installation and maintenance costs were elaborated according to a standard irrigation system adapted from Torres et al. (2019). Figure 2 shows the sketch of the experimental area, with the arrangement of crops and sprinklers.



ETo – Reference evapotranspiration

Figure 2. Sketch of the experimental area

The costs of inputs not related to irrigation were quantified and adjusted to R\$ ha⁻¹. The fixed costs of irrigation were related to the acquisition and installation of the sprinkle irrigation system, with the initial value diluted throughout its useful life, and this value was fixed regardless of the system being triggered or not. Fixed costs related to irrigation were calculated using Eq. 3, according to CONAB (2010).

$$FCRI = DC + JC + IN \quad (3)$$

where:

FCRI - fixed cost related to irrigation (R\$ ha⁻¹);

DC - cost with depreciation of irrigation system components (R\$ ha⁻¹);

JC - cost with interest on invested capital (R\$ ha⁻¹); and,

IN - cost with insurance of irrigation system components (R\$ ha⁻¹).

For the calculation of irrigation system depreciation (Eq. 4), the residual value of the asset was considered to be 20% of that of the new equipment (CONAB, 2010).

$$DC = \left(\frac{VN - VR}{ULh} \right) \times HsWr \quad (4)$$

where:

DC - depreciation of the irrigation system component (R\$);

VN - acquisition value of the new irrigation system component (R\$);

VR - residual value of the irrigation system component (R\$);

ULh - useful life of the irrigation system component (h); and,

HsWr - total hours worked per hectare.

Opportunity cost was calculated according to the interest rate on the invested capital, adopting an annual rate of 2.8% (based on the 2020 Selic rate) according to Eq. 5.

$$JC = AIR \times VN \quad (5)$$

where:

JC - interest rate on invested capital (R\$);

AIR - annual interest rate (%); and,

VN - acquisition value of the irrigation system new component (R\$).

Investment insurance was determined by CONAB (2010) (Eq. 6) as 0.35% of the average value of the investment.

$$IN = \frac{VN}{2} \times 0.0035 \quad (6)$$

where:

IN - cost of insurance (R\$); and,

VN - acquisition value of the new irrigation system component (R\$).

Eq. 7 was used to determine the variable costs related to irrigation:

$$VCRI = VCE + VCL + VCM \quad (7)$$

where:

VCRI - variable cost related to irrigation (R\$);

VCE - variable cost with electricity (R\$);

VCL - cost of labor used in irrigation (R\$); and,

VCM - cost with equipment maintenance (R\$).

The variable cost of electricity was determined according to the power of the motor-pump set and the time for application of the irrigation depth (Eq. 8). The cost of electricity was obtained according to the price of electricity practiced by the concessionaire of the region, considering the green tariff, which allows the use for 21 hours a day.

$$VCE = P_w \times E \times T \times D \quad (8)$$

where:

VCE - variable cost with electricity (R\$);

P_w - power of the motor-pump set (kW);

E - price of electricity (R\$ kWh⁻¹);

T - time for applying one millimeter of water (h mm⁻¹); and,

D - irrigation depth (mm).

The value of the hour worked was determined based on the methodology of CONAB (2010), with the hourly value equivalent to the rural minimum wage (Eq. 9).

$$VCL = N_i \times N_s \times 0.5 \times \frac{V_{MinW}}{220} \quad (9)$$

where:

VCL - cost of labor used in irrigation (R\$);

N_i - number of irrigation events;

N_s - number of sectors of the irrigation system; and,

V_{MinW} - value of rural minimum wage (R\$).

Maintenance costs were calculated considering the values relative to 1% of the value of the irrigation system and 10% of the value spent on electricity (Eq. 10).

$$VCM = VN \times 0.01 \times \frac{VCE}{10} \quad (10)$$

where:

VCM - cost with equipment maintenance (R\$);

VN - acquisition value of the new irrigation system component (R\$ ha⁻¹); and,

VCE - variable cost of electricity.

After surveying all costs present in the production system and obtaining ethanol productivity data, the economic analysis was performed with the following investment indicators: net present value (NPV), internal rate of return (IRR), benefit/cost ratio (B/C), profitability index (PI) and payback (PB).

NPV was calculated using Eq. 11:

$$NPV = \sum_{t=0}^N \frac{F_t}{(1+j)^t} \quad (11)$$

where:

NPV - net present value (R\$ ha⁻¹);

j - discount rate or minimum attractiveness rate (MAR);

N - project horizon (years);

t - project time (period) (years); and,

F_t - net cash flow each year (R\$ ha⁻¹).

The IRR of a project consists in determining the interest rate at which the NPV is null. It is at this rate that the sum of benefits becomes equal to the sum of costs, because the net present value is the algebraic sum, at instant zero, of the benefits and costs (Eq. 12).

$$\sum_{j=0}^N \frac{F_t}{(1+IRR)^t} = 0 \quad (12)$$

where:

IRR - internal rate of return, decimal; and,

j - discount rate or minimum attractiveness rate (MAR), decimal.

With B/C, it was verified under which condition of the project the benefits were greater than the updated expenses. This ratio was calculated using Eq. 13:

$$B/C = \frac{\sum_{t=0}^N B/(1+j)^t}{\sum_{t=0}^N C/(1+j)^t} \quad (13)$$

where:

B/C - benefit/cost ratio;

B - revenues (R\$ ha⁻¹); and,

C - expenses (R\$ ha⁻¹).

The payback (PB) was calculated with the quotient of the initial investment by the average cash flow of the period (20 years). The profitability index (PI) was calculated considering the NPV divided by the initial cost of the project.

For the economic viability analysis, scenarios were elaborated with the two conditions of raw material. Five ethanol market values (R\$ 2.00; R\$ 2.50; R\$ 3.00; R\$ 3.50; and R\$ 4.00 L⁻¹) were evaluated and, according to Center for Advanced Studies in Applied Economics (CEPEA), the average price for the period under study was R\$ 3.00 L⁻¹. The fixed cost of production for one liter of ethanol (both crops) was R\$ 0.40 L⁻¹, according to Silva et al. (2020). As a way of comparing the results obtained with the international literature, the dollar price of R\$ 5.60 was adopted. Forty five scenarios were created, as described below:

For the scenarios 1 to 30, maize was used as a source of raw material for ethanol production. The costs and yields were obtained from the two crop seasons for irrigated and rainfed conditions. The difference between the scenarios was the market value of ethanol. For the scenarios 31 to 45, grain sorghum was used as a source of raw material, with the same procedures as the previous scenarios.

RESULTS AND DISCUSSION

The fixed cost not related to irrigation (FCNRI) values found were R\$ 3,807.60 ha⁻¹ for maize crop and R\$ 2,862.30 ha⁻¹ for sorghum crop. The fixed cost related to irrigation (FCRI) values were R\$ 1,378.70 ha⁻¹, while the variable cost related to irrigation (VCRI) values were R\$ 294.80 and R\$ 179.95 ha⁻¹ for the 2019/20 and 2020/21 seasons, respectively.

*Artigo publicado na Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental em 13/05/2022

The costs for ethanol production in the grain sorghum crop in the 2019/20 and 2020/21 seasons ranged from R\$ 512.00 to R\$ 860.15, R\$ 933.90 to R\$ 1,294.80 and R\$ 1,121.10 to R\$ 1,530.68 ha⁻¹ in treatments without the use of irrigation, with 50% of the ETo and 100% of the ETo, respectively, representing an increase of 48.25% in costs, when comparing treatments with full irrigation and without irrigation.

In maize crop, the variation of costs in the two years was from R\$ 1,320.31 to R\$ 1,236.17 ha⁻¹, R\$ 2,181.36 to R\$ 1,811.56 ha⁻¹ and R\$ 2,425.90 to 2,302.30 ha⁻¹ in treatments without irrigation, with 50% of the ETo and with 100% of the ETo, respectively. The treatment with full irrigation increased the cost of ethanol production by 45.93% when compared to the non-irrigated treatment.

The use of irrigation increased grain production per hectare and, consequently, reduced the cost of production of the liter of ethanol. In maize crop, the calculated cost of ethanol was R\$ 1.60, R\$ 1.47 and R\$ 1.36 L⁻¹, for treatments without irrigation, with 50% of the ETo and 100% of the ETo, respectively, which imply a range of 15% this percentage represents the difference between treatments without irrigation and 100% of the ETo. This cost for the grain sorghum crop was slightly higher, with values of R\$ 2.18, R\$ 2.01 and R\$ 1.79 L⁻¹ for the same treatments, which represents a variation of 17.89%.

Somavat et al. (2018) worked with three varieties of maize for ethanol production and obtained a production cost of approximately R\$ 1.48 L⁻¹, which is consistent with the results obtained in the present study for maize crop and lower than that for grain sorghum.

Li et al. (2020) observed that the cost of ethanol production with maize grains was R\$ 2.98 L⁻¹. This value is 86.25% (without irrigation), 102.72% (50% of the ETo) and 119.11% (100% of the ETo) higher than those found for maize and 36.69% (without irrigation), 48.25% (50% of the ETo) and 66.48% (100% of the ETo) higher than those found for grain sorghum.

An ethanol productivity of 6,698 L ha⁻¹ per year with yield of 446 L t⁻¹ and production cost of R\$ 1.30 L⁻¹ were reported by Quintero et al. (2008). These values corroborate those obtained for maize in the present study, where the cost of production was R\$ 1.36 L⁻¹ with an average productivity of 5,685.00 L ha⁻¹ and ethanol yield of 390 L t⁻¹.

Figure 3 presents the results of the analysis of the economic indicators NPV and IRR in the different scenarios.

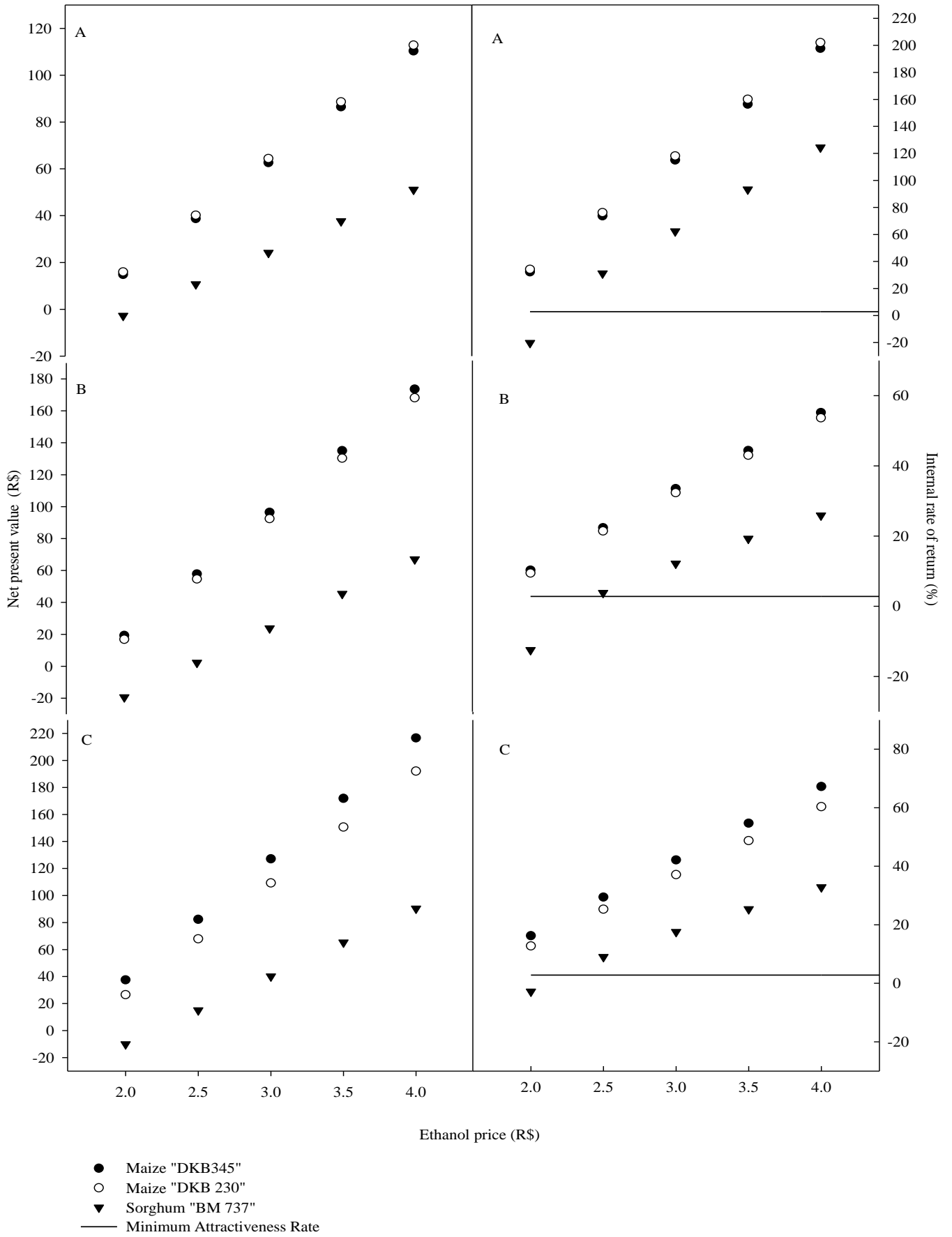


Figure 3. Net present value (NPV) and internal rate of return (IRR) values for the 45 scenarios analyzed, for treatments without irrigation - 0% of the ETo (A), with 50% of the ETo (B) and 100% of the ETo (C)

The NPV showed a negative value only for the grain sorghum crop when the remuneration for the liter of ethanol sold was R\$ 2.00 L⁻¹ for the three ETo conditions. From the value of R\$ 2.50 L⁻¹, the NPV was positive and increasing with the increment in the remuneration paid for the liter. For the two maize cultivars, the returns were positive and increasing in all evaluated scenarios.

The IRR showed a behavior similar to that of NPV, being lower than the minimum attractiveness rate (MAR) only for the scenario with a selling price of R\$ 2.00 L⁻¹ for the irrigation conditions tested. The IRR showed higher rates of return for treatments without the use of irrigation, which is due to its lower initial investment. However, NPV increased with the use of irrigation.

Evaluating ethanol productivity and profitability, Quintero et al. (2008) obtained IRR of 66.75% and NPV of R\$ 3,650.00 ha⁻¹ for the maize crop. The IRR value found by the authors is consistent with those found with the scenario of full irrigation and ethanol market value of R\$ 4.00 L⁻¹, and for the scenarios from R\$ 2.50 to R\$ 3.00 L⁻¹ when irrigation was not used for both crops.

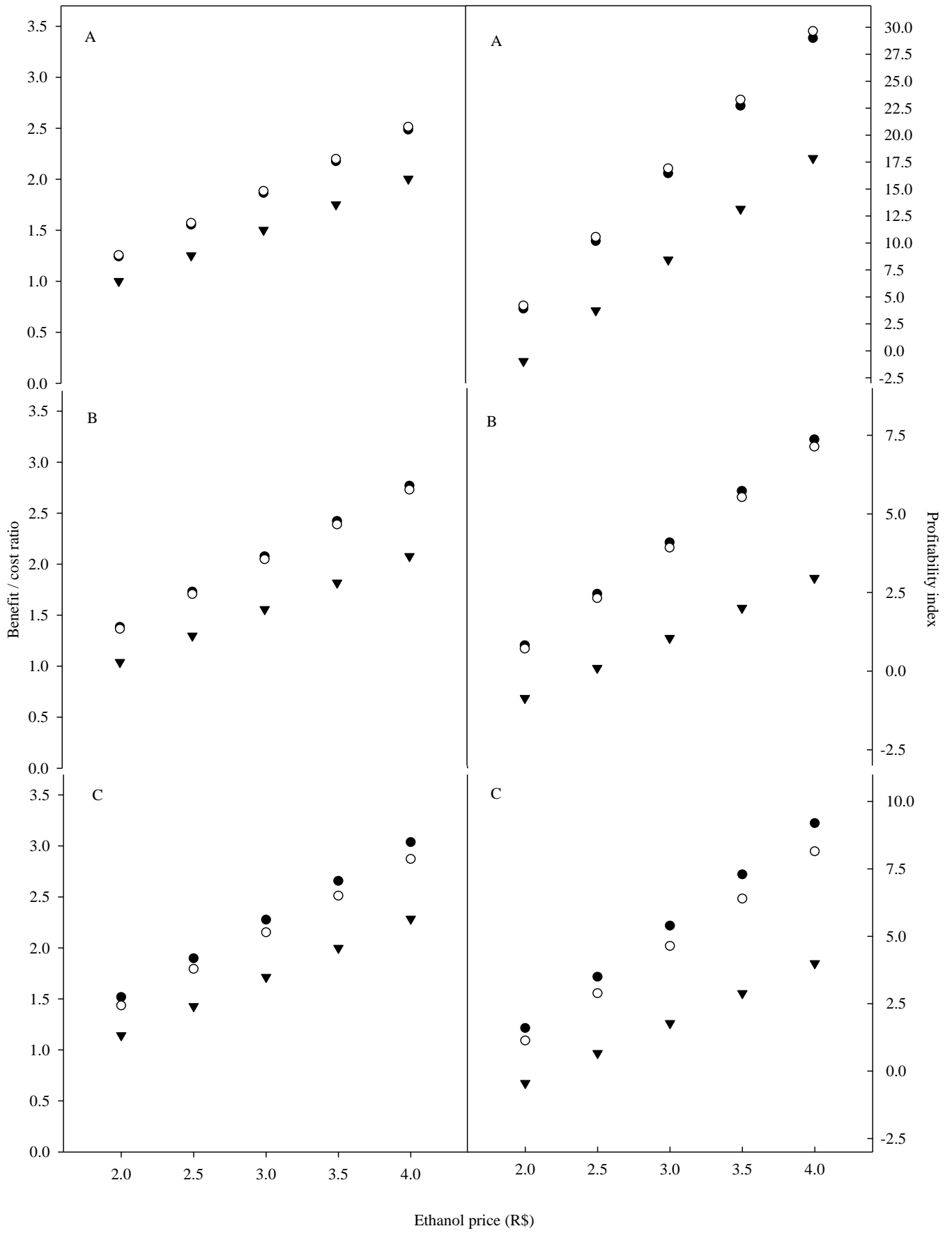
For ethanol production using sweet potato crop, Bernardi et al. (2021) found IRR values of 11.47%, similar to those observed for irrigated grain sorghum and lower than those found for maize, at a selling price of R\$ 3.00 L⁻¹.

A study with sweet sorghum in different conversion rate scenarios showed that, despite the increased prices of both raw material and liter of ethanol (R\$ 2.03 and R\$ 2.70 L⁻¹), the NPV remained negative (Basavaraj et al., 2013). In the case of grain sorghum, at a price of R\$ 2.00

L⁻¹, the NPV also remained negative for both irrigated and non-irrigated treatments, but becoming positive after the increase in remuneration to R\$ 2.50 L⁻¹.

According to Bernardi et al. (2021), in the ethanol production system the selling price is extremely important because the changes in this scenario will directly influence the economic viability of the enterprises. The authors also point out that the equilibrium price for a positive NPV is R\$ 3.00 L⁻¹. This is the value adopted as the average selling price in the present study.

Figure 4 shows the results obtained for the benefit/cost ratio (B/C) and profitability index (PI).



- Maize "DKB345"
- Maize "DKB 230 "
- ▼ Sorghum "BM 737"

Figure 4. Benefit/cost ratio (B/C) and profitability index (PI) values for the 45 scenarios analyzed, for treatments without irrigation - 0% of the ETo (A), with 50% of the ETo (B) and 100% of the ETo (C)

The benefit/cost ratio (B/C) did not show an attractive result only for the condition without irrigation, with a market value of R\$ 2.00 L⁻¹. A B/C of 2.00 was reached in the remuneration of R\$ 4.00 L⁻¹ for the grain sorghum crop. For maize, the B/C ranged from 1.24 to 2.51 at the selling prices of R\$ 2.00 and R\$ 4.00 L⁻¹, respectively, showing a small variation between the cultivars evaluated.

With the use of irrigation with 50% of the ETo, B/C values ranged from 1.04 to 2.08 for grain sorghum and from 1.36 to 2.77 for maize in the two cultivars tested for the selling prices of R\$ 2.00 and R\$ 4.00 L⁻¹. For the use of 100% of the ETo, the variation was from 1.14 to 2.28 and from 1.44 to 3.04 for the lowest and highest selling price with grain sorghum and maize crops, respectively.

Basavaraj et al. (2013) found a B/C of 0.89 for ethanol production with sweet sorghum. These values are lower than those observed for grain sorghum and maize, which were above 1.00 in all studied scenarios.

The PI in the remuneration of R\$ 2.00 L⁻¹ for grain sorghum did not obtain a positive return in the three irrigation managements. Although some values for the maize crop were low, as in the case of 50% of the ETo with a selling price of R\$ 2.00 L⁻¹, all were viable, showing a positive relationship according to the remuneration.

Table 1 presents the payback over time in years for the investment to generate economic return.

Table 1. Payback values for the 45 scenarios analyzed

Raw material	Payback (years)				
	Variation of selling price (R\$)				
	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00
	Without irrigation – 0% of the ETo				
Maize ‘DKB 345’	3.1	1.4	0.9	0.6	0.5
Maize ‘DKB 230’	2.9	1.3	0.8	0.6	0.5
Sorghum ‘BM 737’	451.8	3.2	1.6	1.1	0.8
	50% of the ETo				
Maize ‘DKB 345’	8.3	4.4	3.0	2.3	1.8
Maize ‘DKB 230’	8.8	4.6	3.1	2.3	1.9
Sorghum ‘BM 737’	106.7	14.2	7.4	5.0	3.8
	100% of the ETo				
Maize ‘DKB 345’	5.8	3.4	2.4	1.8	1.5
Maize ‘DKB 230’	7.1	3.9	2.7	2.1	1.7
Sorghum ‘BM 737’	27.4	9.1	5.5	3.9	3.0

ETo – Reference evapotranspiration

It is possible to verify that only three scenarios did not have economic return within the useful life of the production system. These scenarios combine the grain sorghum crop with the low remuneration of ethanol sales, thus showing a PB that ranged from 27.4 to 451.8 years, not being profitable for the project period. In the other scenarios evaluated, the economic return occurred within the expected period, and in some cases the investment was returned already in the first year.

The production of ethanol from maize and sugarcane in Colombia showed PB of 3.85 and 4.13 years for the two crops, respectively (Quintero et al., 2008). These results are in accordance with some scenarios analyzed in the present study, varying for maize and grain sorghum, with and without irrigation.

Bernardi et al. (2021), in a scenario of the sweet potato ethanol selling price of R\$ 3.00 L⁻¹, obtained a PB value of 9.85 years. This value is close to the results found in the present study in the scenarios with the use of irrigation and low remuneration for maize and grain sorghum.

CONCLUSIONS

1. The use of full irrigation (100% of ETo) reduces the production costs of the liter of ethanol by 15 and 17.89% and increases ethanol production by 44.18 and 48.25% for maize and grain sorghum crops, respectively.

2. For the market price of R\$ 2.00 L⁻¹, the grain sorghum crop does not show good performance, with negative net present value (NPV) and internal rate of return (IRR); in the other scenarios, the crop showed positive results for all indicators. The sale price of R\$ 4.00 L⁻¹ and full irrigation is the best economic scenario, with values of NPV of R\$ 90,356.93, IRR of 33.83%, benefit/cost ratio (B/C) of 2.28, profitability index (PI) of 3.99 and payback of three years.

3. Maize crop is economically viable for ethanol production in all scenarios, with positive results for all indicators. The full irrigation and market price of R\$ 4.00 L⁻¹ represent the best economic scenario, with mean values for NPV of R\$ 204,381.68, IRR of 63.35%, B/C of 2.96, PI of 8.67 and payback of 1.58 years, among the cultivars.

4. With the economic evaluations carried out, maize and grain sorghum crops are viable alternatives for the production of ethanol due to their adaptability to the climatic conditions of the study region, and the final product's sale price is an important factor in the economic viability of the activity.

ACKNOWLEDGMENTS

This study was carried out with support from the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq).

LITERATURE CITED

- Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D.; Smith, M. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Fao, Rome, v.300, p.D05109, 1998.
- Araya, A.; Kisekka, I.; Gowda, P. H.; Prasad, P. V. V. Grain sorghum production functions under different irrigation capacities. *Agricultural Water Management*, v.203, p.261-271, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.03.010>
- Asseng, S.; Kheir, A. M.; Kassie, B. T.; Hoogenboom, G.; Abdelaal, A. I.; Haman, D. Z.; Ruane, A. C. Can Egypt become self-sufficient in wheat? *Environmental Research Letters*, v.13, p.094012, 2018. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aada50>
- Basavaraj, G.; Rao, P. P.; Basu, K.; Reddy, C. R.; Kumar, A. A.; Rao, P. S.; Reddy, B. V. S. Assessing viability of bio-ethanol production from sweet sorghum in India. *Energy policy*, v.56, p.501-508, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.01.012>
- Bell, J. M.; Schwartz, R. C.; McInnes, K. J.; Howell, T. A.; Morgan, C. L. Effects of irrigation level and timing on profile soil water use by grain sorghum. *Agricultural Water Management*, v.232, p.106030, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106030>
- Bernardi, W. K.; Weirich Neto, P. H.; Gomes, J. A.; Charnobay, A. C. R.; Barreiros, R. F. Economic and financial viability of sweet potato ethanol production in microdistilleries *Organizações Rurais & Agroindustriais*, v.23, p.e1777, 2021. DOI: 10.48142/2320211777
- Comas, L. H.; Trout, T. J.; Dejonge, K. C.; Zhang, H.; Gleason, S. M. Water productivity under strategic growth stage-based deficit irrigation in maize. *Agricultural water management*, v.212, p.433-440, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.07.015>

- COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO-CQFS-RS/SC. Manual de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo-Núcleo Regional Sul, p. 376-376, 2016.
- CONAB - Companhia Nacional De Abastecimento. Conab. Custos de produção agrícola: a metodologia da Conab. 2010.
- Davarpanah, R.; Ahmadi, S. H. Modeling the effects of irrigation management scenarios on winter wheat yield and water use indicators in response to climate variations and water delivery systems. *Journal of Hydrology*, v.598, p.126269, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126269>
- Ding, Z.; Ali, E. F.; Elmahdy, A. M.; Ragab, K. E.; Seleiman, M. F.; Kheir, A. M. Modeling the combined impacts of deficit irrigation, rising temperature and compost application on wheat yield and water productivity. *Agricultural Water Management*, v.244, p.106626, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106626>
- Furlaneto, F. de P. B.; Esperancini, M. S. T. Custo de produção e indicadores de rentabilidade da cultura do milho safrinha. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v.40, p.297-303, 2010. <https://doi.org/10.5216/pat.v40i3.8609>
- Kothari, K.; Ale, S.; Bordovsky, J. P.; Thorp, K. R.; Porter, D. O.; Munster, C. L. Simulation of efficient irrigation management strategies for grain sorghum production over different climate variability classes. *Agricultural Systems*, v.170, p.49-62, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.12.011>
- Kumar, S. P. J.; Kumar, N. S. S.; Chintagunta, A. D. Bioethanol production from cereal crops and lignocelluloses rich agro-residues: prospects and challenges. *SN Applied Sciences*, v.2, p.1-11, 2020. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03471-x>
- Li, Y.; Kesharwani, R.; Sun, Z.; Qin, R.; Dagli, C.; Zhang, M.; Wang, D. Economic viability and environmental impact investigation for the biofuel supply chain using co-fermentation

- technology. *Applied Energy*, v.259, p.114235, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114235>
- Menezes, C. B. de; Fernandes, E. A.; Parrella, R. A. C.; Schaffert, R. E.; Rodrigues, J. A. S. Importância do sorgo para o abastecimento de grãos, forragem e bioenergia no Brasil. In: de Menezes, C. B. *Melhoramento genético de sorgo*. Brasília: Embrapa, 2021. Cap.1, p.13-58.
- Millar, A. A. *Drenagem de terras agrícolas: bases agronômicas*. Bib. Orton IICA/CATIE, 1978.
- Moreno, J. A. *Clima do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura, 1961. 42p.
- Persson, M.; Galbe, M.; Wallberg, O. A strategy for synergistic ethanol yield and improved production predictability through blending feedstocks. *Biotechnology for biofuels*, v.13, p.1-11, 2020. <https://doi.org/10.1186/s13068-020-01791-z>
- Quintero, J. A.; Montoya, M. I.; Sánchez, O. J.; Giraldo, O. H.; Cardona, C. A. Fuel ethanol production from sugarcane and corn: comparative analysis for a Colombian case. *Energy*, v.33, p.385-399, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2007.10.001>
- Sesmero, J. P.; Perrin, R. K.; Fulginiti, L. E. Environmental efficiency among corn ethanol plants. *Biomass and Bioenergy*, v.46, p.634-644, 2012.
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.06.033>
- Silva, H. J. T. da; Santos, P. F. A.; Nogueira Junior, E. C.; Vian, C. E. de F. Aspectos técnicos e econômicos da produção de etanol de milho no Brasil. *Revista de Política Agrícola*, v.29, p.142, 2020.
- Somavat, P.; Kumar, D.; Singh, V. Techno-economic feasibility analysis of blue and purple corn processing for anthocyanin extraction and ethanol production using modified dry grind process. *Industrial crops and products*, v.115, p.78-87, 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.02.015>

- Stamenković, O. S.; Siliveru, K.; Veljković, V. B.; Banković-Ilić, I. B.; Tasić, M. B.; Ciampitti, I. A.; Prasad, P. V. Production of biofuels from sorghum. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.124, p.109769, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109769>
- Szambelan, K.; Nowak, J.; Szwengiel, A.; Jeleń, H.; Łukaszewski, G. Separate hydrolysis and fermentation and simultaneous saccharification and fermentation methods in bioethanol production and formation of volatile by-products from selected corn cultivars. *Industrial Crops and Products*, v.118, p.355-361, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.03.059>
- Torres, R. R.; Robaina, A. D.; Peiter, M. X.; Ben, L. H. B.; Mezzomo, W.; Kirchner, J. H.; Pereira, T. dos S.; Buske, T. C.; Vivan, G. A.; Girardi, L. B. Economic of the irrigated production of forage millet. *Semina: Ciências Agrárias*, v.40, p.623, 2019. <http://dx.doi.org/10.5433/1679-0359.2019v40n2p623>
- Zhang, H.; Han, M.; Comas, L. H.; Dejonge, K. C.; Gleason, S. M.; Trout, T. J.; Ma, L. Response of maize yield components to growth stage-based deficit irrigation. *Agronomy Journal*, v.111, p.3244-3252, 2019. <https://doi.org/10.2134/agronj2019.03.0214>

7 DISCUSSÃO GERAL

Analisando os dados meteorológicos foi possível verificar que a média das temperaturas máximas e mínimas foi de 30,65°C e 18,75°C para a primeira safra, e de 29,75°C e 18,22°C para a segunda, respectivamente. A temperatura ideal para o desenvolvimento do milho está entre 10°C e 32°C (RENATO et al., 2013). Já para a cultura do sorgo granífero, temperaturas abaixo de 19°C e acima de 32,5°C reduzem o rendimento da cultura (HOFFMAN et al., 2020). Estes estudos estão de acordo com as temperaturas observadas em ambas as safras.

A evapotranspiração acumulada foi de 388,43 e 304,60 mm nas safras 1 e 2, respectivamente. Valores superiores aos encontrados nas duas safras foram observados por Niaghi et al. (2019), que em quatro anos de avaliações obtiveram uma evapotranspiração para a cultura do milho de 460 a 550 mm. Araya et al. (2019), corroborando com o presente estudo, verificaram uma evapotranspiração da cultura do sorgo granífero que variou entre 336 mm e 469 mm.

A precipitação apresentou valores com pequena variação para os anos de experimento, onde na safra 1 foi de 334,2 e na safra 2 de 377,8 mm, sendo que os eventos com maior volume de precipitações ocorreram de forma acumulada, no período inicial do desenvolvimento das culturas e com uma distribuição irregular ao longo do ciclo, necessitando, nestas condições, de um aporte de irrigação para garantir a produção.

Na primeira safra, foram realizadas 11 irrigações ao longo do desenvolvimento das culturas, com o total de água aplicada de 228,10 e 114,05 mm para os tratamentos com 100% e 50% de reposição de água, respectivamente. Na segunda safra, foram realizadas sete irrigações com uma lâmina total de água aplicada de 136,40 e 68,20 mm para os tratamentos com 100% e 50% de reposição de água, respectivamente.

Nas condições do presente estudo, as necessidades de irrigação foram semelhantes aos estudos conduzidos por Araya et al. (2017), que recomendam uma irrigação suplementar para a cultura do milho de 150, 300 e 450 mm dependendo do regime hídrico de cada ano, chuvoso, normal e seco, respectivamente. Assim como, para a cultura do sorgo granífero, Araya et al. (2019) consideram que um volume de irrigação suplementar de 100 a 250 mm é ideal para o rendimento da cultura.

Com a análise da variância foi possível verificar que não houve interação entre os fatores lâminas de irrigação e culturas produtoras de etanol à nível de 5% de significância. No entanto, houve diferença significativa entre as culturas e lâminas de irrigação para a produtividade de

grãos (PG), produtividade de etanol (PE), produtividade da água (PA) e produtividade econômica da água (PEA) nas duas safras avaliadas.

As duas cultivares de milho não apresentaram diferença estatística entre si, para a PG nos dois anos avaliados. Com produtividades de 12.718,45 para a DKB 230 e 13.113,55 kg.ha⁻¹ para a DKB 345 na primeira safra. Na segunda safra as produtividades foram de 10.608,50 e 11.078,55 kg.ha⁻¹ para as cultivares DKB 230 e DKB 345, respectivamente. A cultura do sorgo granífero apresentou produtividade inferior estatisticamente à do milho, com resultados de 5.136,00 e 7.872,25 kg.ha⁻¹ para as safras de 2019/2020 e 2020/2021, respectivamente.

O uso da irrigação influenciou positivamente a PG das culturas, obtendo a maior produtividade para a lâmina com 100% de reposição de água 12.814,00 kg.ha⁻¹ para a safra 1 e 12.286,15 kg.ha⁻¹ para a safra 2, representando um incremento médio de 12,98% para a lâmina de 50% de reposição de água e 45,86% para o tratamento não irrigado.

Bell et al. (2018) em estudos conduzidos com a cultura do sorgo também verificaram que o uso da irrigação plena melhora a produtividade de grãos com um incremento médio de aproximadamente 41%, semelhante ao obtido no presente estudo. Comparando o uso de irrigação plena e 50% de suprimento Comas et al. (2019) obtiveram um incremento médio de 25,40% quando a demanda hídrica da cultura do milho foi totalmente atendida, sendo esse valor um pouco superior ao encontrado neste estudo, o qual foi de 12,98%.

O milho DKB 345 obteve uma PE de 5.114,28 e 4.320,75 L.ha⁻¹, a PA foi de 14,86 e 12,78 L.ha⁻¹.mm⁻¹ e a PEA foi de 44,59 e 38,34 R\$.ha⁻¹.mm⁻¹ nas safras 1 e 2, respectivamente. Já para o DKB 230 a PE foi de 4.960,19 e 4.137,31 L.ha⁻¹, a PA foi de 14,35 e 12,44 L.ha⁻¹.mm⁻¹ e a PEA foi de 43,07 e 37,33 R\$.ha⁻¹.mm⁻¹ nas safras 1 e 2, respectivamente. E o sorgo obteve uma PE de 2.003,05 e 3.071,36 L.ha⁻¹, a PA foi de 5,59 e 9,15 L.ha⁻¹.mm⁻¹ e a PEA foi de 16,77 e 27,46 R\$.ha⁻¹.mm⁻¹ para ambas as safras, respectivamente.

O sorgo granífero apresentou resultados estatisticamente inferiores, quando comparado às duas cultivares de milho, nos dois anos avaliados. O milho apresentou um incremento de 60,23% e 27,37% na produtividade de etanol, 61,72% e 27,44% para a produtividade da água e 62,17% e 27,42% para a produtividade econômica da água, nas safras 1 e 2, respectivamente, não havendo diferença significativa entre as variedades de milho.

De acordo com o presente estudo, Zhang et al. (2018) observaram, que não houve diferença significativa no rendimento de etanol para as duas cultivares de milho. Os resultados para as duas variedades de milho foram iguais estatisticamente, havendo diferença somente entre as culturas de milho e sorgo granífero. Khalaf et al. (2019) ao trabalharem com cultivares

de sorgo, não obtiveram diferenças significativas para a produtividade de água, corroborando com o presente estudo.

Avaliando a produtividade da água na produção de sorgo, milho e milho para silagem, Bhattarai et al. (2020) observaram maiores valores para o sorgo, seguidas do milho e do milho, sob condições limitadas de irrigação. No presente estudo, o qual objetivou a produção de etanol, o comportamento entre as culturas foi diferente, com o milho apresentando a melhor produtividade da água.

Os resultados obtidos para a produtividade do etanol, produtividade da água e produtividade econômica da água de acordo com as diferentes lâminas de irrigação utilizadas, apresentaram diferença estatística a nível de 5% de significância.

O tratamento sem irrigação obteve uma PE de 2.586,24 e 2.713,41 L.ha⁻¹, uma PA de 11,06 e 10,28 L.ha⁻¹.mm⁻¹ e uma PEA de 33,20 e 30,85 R\$.ha⁻¹.mm⁻¹ nas safras 1 e 2, respectivamente. Já para o tratamento de 50% a PE foi de 4.493,82 e 4.024,41 L.ha⁻¹, a PA foi de 12,92 e 12,12 L.ha⁻¹.mm⁻¹ e a PEA foi de 38,77 e 36,36 R\$.ha⁻¹.mm⁻¹ nas safras 1 e 2, respectivamente. E o tratamento de 100% obteve uma PE de 4.997,46 e 4.791,59 L.ha⁻¹, a PA foi de 10,82 e 11,97 L.ha⁻¹.mm⁻¹ e a PEA foi de 32,46 e 35,91 R\$.ha⁻¹.mm⁻¹ para ambas as safras, respectivamente.

Em relação às diferentes lâminas aplicadas, na primeira safra o uso da irrigação apresentou diferença significativa entre os tratamentos testados, e 100% da reposição de água resultou em um incremento de 48,25% e 10,08% para a PE quando comparada com a testemunha e 50% de reposição de água, respectivamente. Para a PA e a PEA, o melhor resultado foi obtido na lâmina de 50%. Para a PA, o incremento foi de 14,40% e 16,25%, e para a PEA foi de 14,36% e 16,27%, quando comparadas a testemunha e a lâmina de 100% de reposição de água, respectivamente.

Na segunda safra, a PE apresentou o mesmo comportamento da primeira, com incremento de produtividade de 45,42% e 16,02% quando comparada a testemunha e a lâmina de 50% de reposição de água. No entanto, para PA e PEA, a diferença ocorreu entre o uso da irrigação e a condição de sequeiro, com valores próximos entre os tratamentos irrigados. O aumento na PA foi de 14,69% e de 14,64% para PEA, quando comparado o tratamento sem irrigação com os irrigados.

Corroborando com os resultados encontrados de incremento na produtividade de etanol, Aydinsakir et al. (2021) ao compararem tratamentos de irrigação plena e não irrigado, observaram um aumento na produção de etanol de 56,70% no primeiro ano e 37,53% no segundo ano de experimento. Pang et al. (2018) e Zhang et al. (2018), também observaram

acréscimo na produtividade de etanol conforme o aumento da frequência de irrigação para as culturas de sorgo granífero e milho, respectivamente.

Os tratamentos com suplementação hídrica, apresentaram os melhores resultados para PA, com a irrigação intermediária obtendo os maiores valores. Esses resultados são semelhantes aos encontrados por Bell et al. (2018), que trabalhando com sorgo granífero obtiveram produtividade máxima da água em tratamentos com 75% e 100% da irrigação plena. Assim como no estudo conduzido, em duas safras, por Zou et al. (2021) que as melhores produtividades da água foram de aproximadamente 66% e 77% da necessidade hídrica e as piores no tratamento com irrigação plena.

O melhor rendimento foi obtido na lâmina com 100% de reposição de água, no entanto a melhor PA foi na lâmina de 50% com uma redução de 10% no rendimento, estando de acordo com Kothari et al. (2020), que também observaram os melhores resultados para PA com uma redução de 20% da irrigação plena, mesmo com uma queda de 11% no rendimento de grãos.

Diferindo-se dos resultados encontrados no presente estudo, Chico et al. (2015) trabalhando com produção de etanol da cana-de-açúcar, observaram maiores valores de produtividade econômica da água nos tratamentos de irrigação completa, por outro lado os menores valores estão em concordância com o presente estudo que foram para o tratamento não irrigado.

Os custos fixos não relacionados a irrigação (CFNRI) encontrados foram de R\$ 3.807,60 ha⁻¹ para a cultura do milho e de R\$ 2.862,30 ha⁻¹ para a cultura do sorgo. Os CFRI foram de R\$ 1.378,70 ha⁻¹, já os CVRI foram de R\$ 294,80 e R\$ 179,95 ha⁻¹ para as safras de 2019/20 e 2020/21, respectivamente.

Os custos para a produção do etanol na cultura do sorgo granífero nas safras de 2019/20 e 2020/21 variaram de R\$ 512,00 a R\$ 860,15, R\$ 933,90 a R\$ 1.294,80 e R\$ 1.121,10 ha⁻¹ a R\$ 1.530,68 ha⁻¹ nos tratamentos sem o uso da irrigação, com 50% e 100% da reposição de água, respectivamente. Representando um aumento de 48,25%, ao comparar os tratamentos com irrigação plena e sem irrigação.

Na cultura do milho, a variação dos custos nos dois anos foi de R\$ 1.320,31 a R\$ 1.236,17 ha⁻¹, R\$ 2.181,36 a R\$ 1.811,56 ha⁻¹ e R\$ 2.425,90 a R\$ 2.302,30 ha⁻¹ nos tratamentos sem irrigação, com 50% e com 100% da reposição hídrica, respectivamente. O tratamento com irrigação plena, aumentou em 45,93% o custo de produção de etanol, quando comparado ao não irrigado.

O uso da irrigação aumentou a produção de grãos por hectare e, por consequência, reduziu o custo de produção do litro de etanol. Na cultura do milho, o custo calculado do etanol

foi de R\$ 1,60, R\$ 1,47 e R\$ 1,36 L⁻¹, para os tratamentos sem irrigação, com 50% e 100% de reposição de água, respectivamente, que implicam em amplitude de 15%. Este custo para a cultura do sorgo granífero foi um pouco maior, com valores de R\$ 2,18, R\$ 2,01 e R\$ 1,79 L⁻¹ para os mesmos tratamentos, o que representa uma variação de 17,89%.

Somavat et al. (2018), trabalharam com três variedades de milho para a produção de etanol, obtendo um custo de produção de, aproximadamente, R\$ 1,48 L⁻¹, que é coerente com os resultados obtidos no presente estudo para a cultura do milho e menor quando comparado ao sorgo granífero.

Li et al. (2020) observaram que o custo na produção de etanol, com grãos de milho, foi de R\$ 2,98 L⁻¹. Este valor é superior aos encontrados para as culturas de milho e sorgo granífero em 86,25% (sem irrigação), 102,72% (50% de reposição de água), 119,11% (100% de reposição de água), 36,69% (sem irrigação), 48,25% (50% de reposição de água) e 66,48% (100% de reposição de água), respectivamente.

Uma produtividade de etanol de 6.698 L ha⁻¹ ano⁻¹ com rendimento de 446 L ton⁻¹ e custo de produção de R\$ 1,30 L⁻¹ foram relatados por Quinteiro et al. (2008). Estes valores corroboram com os obtidos para a cultura do milho, neste estudo, onde o custo de produção foi de R\$ 1,36 L⁻¹ com uma produtividade média de 5.685,00 L ha⁻¹ e rendimento de etanol de 390 L ton⁻¹.

O VPL apresentou valor negativo apenas para a cultura do sorgo granífero quando a remuneração pelo litro de etanol comercializado foi de R\$ 2,00 L⁻¹ para as três condições de reposição de água. A partir do valor de R\$ 2,50 L⁻¹ o VPL foi positivo e crescente com o aumento da remuneração paga pelo litro. Para as duas cultivares de milho, os retornos foram positivos e crescentes em todos os cenários avaliados.

A TIR apresentou comportamento semelhante ao VPL, sendo inferior a TMA apenas para o cenário com valor de venda de R\$ 2,00 L⁻¹ para as condições de irrigação testadas. A TIR apresentou maiores taxas de retorno para os tratamentos sem o uso da irrigação, isso se deve ao seu menor investimento inicial. No entanto, o VPL aumentou com o uso da irrigação.

Avaliando a produtividade de etanol e sua lucratividade, Quintero et al. (2008) obteve para a cultura do milho TIR de 66,75% e VPL de R\$ 3.650,00 ha⁻¹. O valor da TIR encontrado pelos autores está de acordo com os encontrados com o cenário de uso da irrigação plena e valor de comercialização do etanol de R\$ 4,00 L⁻¹, e para os cenários de R\$ 2,50 a R\$ 3,00 L⁻¹ quando não houve o uso da irrigação para as duas culturas.

Para produção de etanol utilizando a cultura da batata doce, Bernardi et al. (2021) encontraram valores de TIR de 11,47%, semelhantes aos observados para a cultura do sorgo granífero irrigado e inferiores à resposta do milho, a um preço de venda de R\$ 3,00 L⁻¹.

Um estudo com sorgo sacarino em diferentes cenários de taxa de conversão mostrou que apesar do aumento de preços tanto da matéria-prima quanto do litro do etanol (R\$ 2,03 e R\$ 2,70 L⁻¹), o VPL se manteve negativo (Basavaraj et al., 2013). No caso do sorgo granífero, a um preço de R\$ 2,00 L⁻¹ o VPL também se manteve negativo tanto para os tratamentos irrigados quanto para o não irrigado, porém tornando-se positivo após o aumento da remuneração para R\$ 2,50 L⁻¹.

Segundo Bernardi et al. (2021), no sistema produtivo do etanol o preço de venda é extremamente importante pois as mudanças neste cenário irão influenciar diretamente a viabilidade econômica dos empreendimentos. Os autores ainda destacam que o preço de equilíbrio para um VPL positivo é de R\$ 3,00 L⁻¹. Sendo esse o valor adotado como preço médio de comercialização no presente estudo.

A B/C não apresentou resultado atrativo apenas na condição sem irrigação, com valor de comercialização de R\$ 2,00 L⁻¹. Atingindo uma B/C de 2,00 na remuneração de R\$ 4,00 L⁻¹ para a cultura do sorgo granífero. O milho, variou de 1,24 até 2,51 nos valores de venda de R\$ 2,00 e R\$ 4,00 L⁻¹, respectivamente, apresentando uma pequena variação entre as cultivares avaliadas.

Com o uso da irrigação de 50% de reposição de água os valores da B/C variaram de 1,04 a 2,08 para a cultura do sorgo granífero e de 1,36 a 2,77 para a cultura do milho nas duas cultivares testadas para os valores de venda de R\$ 2,00 e R\$ 4,00 L⁻¹. Já para o uso de 100% de reposição de água a variação foi de 1,14 a 2,28 e de 1,44 a 3,04 para o menor e maior valor de venda nas culturas de sorgo granífero e milho, respectivamente.

Basavaraj et al. (2013), encontraram uma B/C de 0,89 para a produção de etanol com a cultura do sorgo sacarino. Esses valores são inferiores aos observados para a cultura do sorgo granífero e do milho que apresentaram valores acima de 1,00 em todos os cenários estudados.

O IR na remuneração de R\$ 2,00 L⁻¹ para o sorgo granífero, não obteve um retorno positivo nos três manejos de irrigação. Embora alguns valores na cultura do milho tenham sido baixos, como no caso da reposição hídrica de 50% com valor de venda de R\$ 2,00 L⁻¹, todos foram viáveis apresentando uma relação positiva de acordo com a remuneração.

A cultura do sorgo granífero, comercializada com valor de 2,00 R\$.L⁻¹ não apresentou payback rentável dentro do período de investimento analisado, desta forma, não sendo recomendado o investimento. No entanto, o menor período de retorno para a cultura foi de 0,8

anos para o preço de venda de 4,00 R\$.L⁻¹ sem o uso de irrigação e o maior foi o de 14,20 anos para a lâmina de 50% de reposição de água com valor de comercialização de 2,50 R\$.L⁻¹.

A cultura do milho obteve payback semelhante para as duas cultivares avaliadas, sendo o menor período para o preço de venda de 4,00 R\$.L⁻¹ sem o uso de irrigação foi de 0,5 anos e o maior foi o de 8,80 anos para a lâmina de 50% de reposição de água com valor de comercialização de 2,00 R\$.L⁻¹. Para ambas as culturas o payback para a lâmina de 100% de reposição de água obteve valores intermediários.

A produção de etanol de milho e cana-de-açúcar na Colômbia, apresentou um PB de 3,85 e 4,13 anos para as duas culturas, respectivamente (Quintero et al., 2008). Estes resultados estão de acordo com alguns cenários analisados neste estudo, variando para o milho e o sorgo granífero, com e sem irrigação.

Bernardi et al. (2021), em um cenário de preço de venda do etanol de batata doce de R\$ 3,00 L⁻¹, obtiveram um valor de PB de 9,85 anos. Este valor aproxima-se dos resultados encontrados neste estudo nos cenários com uso da irrigação e baixa remuneração para milho e sorgo granífero.

8 CONCLUSÃO

A lâmina de 100% de reposição de água, proporcionou o maior incremento na produtividade de grãos. E o melhor desempenho entre as culturas foi para o milho com um aumento de 45,25% na produtividade de grãos.

A lâmina de irrigação de 100% de reposição de água proporcionou um incremento de 46,8% na produtividade de etanol para as culturas. A suplementação hídrica é necessária para uma maior produtividade de etanol e a lâmina de 50% de reposição de água, apresentou resultados 15,3% superiores às demais lâminas para a produtividade da água e produtividade econômica da água. Esses indicadores podem auxiliar na utilização de uma irrigação eficiente que reduza a quantidade de água utilizada e garanta um retorno econômico.

A cultura do milho obteve o melhor desempenho para a produtividade de etanol, produtividade da água e produtividade econômica da água, quando comparada com a cultura do sorgo granífero.

A cultura do milho obteve os maiores custos de produção quando comparada com a cultura do sorgo granífero.

O uso da irrigação plena, reduz os custos de produção do litro de etanol em 15% e 17,89% e aumenta a produção do etanol em 44,18% e 48,25% para as culturas do milho e sorgo granífero, respectivamente.

Para o preço de comercialização de R\$ 2,00 L⁻¹, a cultura do sorgo granífero não demonstra bom desempenho, apresentando VPL e TIR negativos, ou seja não é viável economicamente. Por outro lado, a cultura do milho é economicamente viável para a produção de etanol em todos os cenários, com resultados positivos para todos os indicadores.

A cultura do milho com irrigação plena e preço de comercialização de R\$ 4,00 L⁻¹, representa o melhor cenário econômico, com maiores resultados em todos os indicadores.

9 REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, M. G. E., CONCAS, S., BENGTSSON, S., & REIS, M. A. M. Mixed culture polyhydroxyalkanoates production from sugar molasses: the use of a 2-stage CSTR system for culture selection. **Bioresource technology**, v. 101, n. 18, p. 7112-7122, 2010.
- ALI, S., JAN, A., SOHAIL, A., KHAN, A., KHAN, M. I., ZHANG, J., & DAUR, I. Soil amendments strategies to improve water-use efficiency and productivity of maize under different irrigation conditions. **Agricultural Water Management**, v. 210, p. 88-95, 2018.
- AMARAL, S. R.; LIRA, M. A.; TABOSA, J. N.; SANTOS, M. V. F. S.; MELLO, A. C. L. SANTOS, V. F. Comportamento de linhagens de sorgo forrageiro submetidas a déficit hídrico sob condição controlada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, p 973-979, 2003.
- AMUDHA, J.; BALASUBRAMANI, G. Recent molecular advances to combat abiotic stress tolerance in crop plants. **Biotechnology and Molecular Biology Reviews**, v. 6, n. 2, p. 31-58, 2011.
- APPIAH-NKANSAH, N. B., LI, J., ROONEY, W., & WANG, D. A review of sweet sorghum as a viable renewable bioenergy crop and its techno-economic analysis. **Renewable Energy**, v. 143, p. 1121-1132, 2019.
- ARAYA, A., KISEKKA, I., GOWDA, P. H., & PRASAD, P. V. V. Grain sorghum production functions under different irrigation capacities. **Agricultural Water Management**, v. 203, p. 261-271, 2018.
- ARAYA, A., KISEKKA, I., HOLMAN, J., Evaluating deficit irrigation management strategies for grain sorghum using AquaCrop. **Irrigation Science**. 2016 doi:10.1007/s00271-016-0515-7.
- ARAYA, A.; GOWDA, P.H.; GOLDEN,B.; FOSTER, A.J.; AGUILAR, J.; CURRIE,R.; CIAMPITTI, I.A.; PRASAD, P.V.V. Economic value and water productivity of major irrigated crops in the Ogallala aquifer region. **Agricultural Water Management**, v. 214, p. 55-63, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.11.015>
- ARAYA, A.; KISEKKA, I.; PRASAD, P.V.; GOWDA, P. H. Evaluating Optimum Limited Irrigation Management Strategies for Corn Production in the Ogallala Aquifer Region. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering** , v. 143, n. 10, pág. 04017041, 2017. DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001228.
- ARTUZO, F. D., FOGUESATTO, C. R., SOUZA, Â. R. L. D., & SILVA, L. X. D. Gestão de custos na produção de milho e soja. **Revista Brasileira de Gestão de Negócios**, v. 20, n. 2, p. 273-294, 2018.
- ASSENG, S., KHEIR, A. M., KASSIE, B. T., HOOGENBOOM, G., ABDELAAL, A. I., HAMAN, D. Z., & RUANE, A. C. Can Egypt become self-sufficient in wheat? **Environmental Research Letters**, v. 13, n. 9, p. 094012, 2018. . <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aada50>

AYDINSAKIR, K.; BUYUKTAS, D.; DINÇ, N.; ERDURMUS, C.; BAYRAM, E.; YEGIN, A. B. Yield and bioethanol productivity of sorghum under surface and subsurface drip irrigation. **Agricultural Water Management**, v. 243, p. 106452, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106452>

BASAVARAJ, G.; RAO, P. P.; BASU, K.; REDDY, C. R.; KUMAR, A. A.; RAO, P. S.; REDDY, B. V. S. Assessing viability of bio-ethanol production from sweet sorghum in India. **Energy policy**, v. 56, p. 501-508, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.01.012>

BATISTA, P. S. C., FERNANDES, J. S. C., PORTUGAL, A. F., CANGUSSÚ, L. V. D. S., JULIO, M. P. M., & DE MENEZES, C. B., Índices de seleção para identificar genótipos de sorgo granífero tolerantes ao estresse hídrico. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 18, n. 3, p. 379-395, 2019.

BELL, J. M., SCHWARTZ, R. C., MCINNES, K. J., HOWELL, T. A., & MORGAN, C. L. Effects of irrigation level and timing on profile soil water use by grain sorghum. **Agricultural Water Management** 232 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106030>

BELL, J. M., SCHWARTZ, R., MCINNES, K. J., HOWELL, T., & MORGAN, C. L. Deficit irrigation effects on yield and yield components of grain sorghum. **Agricultural Water Management**, v. 203, p. 289-296, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.03.002>

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. Déficit Hídrico e Produtividade na Cultura do Milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 2, p. 243-249, 2006.

BERNARDI, W. K.; NETO, P. H. W.; GOMES, J. A.; CHARNOBAY, A. C. R.; BARREIROS, R. F. Viabilidade econômica e financeira da produção de etanol de batata doce em microdestilarias. **Organizações Rurais & Agroindustriais**, v. 23, p. e1777, 2021. DOI: 10.48142/2320211777

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. Manual de Irrigação, atualizada e ampliada. **Viçosa, Editora UFV**, v. 625, 2009.

BHATTARAI, B.; SINGH, S.; WEST, C. P.; RITCHIE, G. L.; TROSTLE, C. L. Water depletion pattern and water use efficiency of forage sorghum, pearl millet, and corn under water limiting condition. **Agricultural Water Management**, v. 238, p. 106206, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106206>

CASTRO JUNIOR, W. L.; DE OLIVEIRA, R. A.; SILVEIRA, S. F. R.; ANDRADE JÚNIOR, A. S. Viabilidade econômica de tecnologias de manejo da irrigação na produção do feijão-caupi, na região dos cocais-ma. **Revista Engenharia Agrícola**, v.35, n. 3, p. 406-418, 2015.

CHICO, D.; SANTIAGO, A. D.; GARRIDO, A. Increasing efficiency in ethanol production: Water footprint and economic productivity of sugarcane ethanol under nine different water regimes in north-eastern Brazil. **Spanish journal of agricultural research**, v. 13, n. 2, p. 7, 2015. <http://dx.doi.org/10.5424/sjar/2015132-6057>

COMAS, L. H., TROUT, T. J., DEJONGE, K. C., ZHANG, H., & GLEASON, S. M. Water productivity under strategic growth stage-based deficit irrigation in maize. **Agricultural water management**, v. 212, p. 433-440, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.07.015>

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. País confirma recorde na produção de etanol: 35,6 bilhões de litros na safra 2019/20. Acesso em: 28 jan. 2022. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/3342-pais-confirma-recorde-historico-na-producao-de-etanol-35-6-bilhoes-de-litros-na-safra-2019-20>

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar – v.8, n.3 (2021) – Brasília : Conab, 2021- Terceiro levantamento, p. 1-63

CONAB - Companhia Nacional De Abastecimento. Conab. Custos de produção

CORTEZ, Luís Augusto Barbosa (Ed.). Proálcool 40 anos: Universidades e empresas: 40 anos de ciência e tecnologia para o etanol brasileiro. Editora Blucher, 2018.

DA ROCHA GOMES, L. R., Pereira, M. M. M., de Menezes, C. B., Simon, G. A., Tardin, F. D., & Cardoso, M. J. Performace agrônômica de híbridos de sorgo granífero estimada pelo método gge biplot. **Colloquium Agrariae. ISSN: 1809-8215**. p. 42-56 2019.

DA SILVA, K. D.; DA ROCHA, L. G.; DA SILVA, A. C.; DA SILVA ARAÚJO, M.; PEREIRA, V. L. G.; DE SOUZA, C. D. J. Estudo de viabilidade econômica dos cultivos de soja e milho segunda safra. **Revista Agrotecnologia**, Ipameri, v.10, n.2, p.36-46, 2019

DA SILVA, A. L., CASTAÑEDA-AYARZA, J. A. Macro-environment analysis of the corn ethanol fuel development in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 135, p. 110387, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110387>

DAHLBERG, J., The role of sorghum in renewables and biofuels. In: **Sorghum**. Humana Press, New York, NY, 2019. p. 269-277

DAVARPANA, R.; AHMADI, S. H. Modeling the effects of irrigation management scenarios on winter wheat yield and water use indicators in response to climate variations and water delivery systems. **Journal of Hydrology**, p. 126269, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126269>

DING, Z., ALI, E. F., ELMAHDY, A. M., RAGAB, K. E., SELEIMAN, M. F., & KHEIR, A. M. Modeling the combined impacts of deficit irrigation, rising temperature and compost application on wheat yield and water productivity. **Agricultural Water Management**, v. 244, p. 106626, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106626>

ELLISTON, A., COLLINS, S. R., WILSON, D. R., ROBERTS, I. N., & WALDRON, K. W. High concentrations of cellulosic ethanol achieved by fed batch semi simultaneous saccharification and fermentation of waste-paper." **Bioresource technology** 134 (2013): 117-126

EMBRAPA - Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306 p.

FAO: Food and Agriculture Organization of the United Nations. Coarse Grains. Disponível em: <http://www.fao.org/docrep/010/ai466e/ai466e04.htm>. Acessado em: 03 outubro 2021

FONSÊCA NETO, Joacy et al. Evapotranspiração, crescimento e produção do sorgo em cultivo irrigado na região do baixo açu-RN. 2013

FREITAS, S. M.; MIURA, M. Situação Atual e Perspectivas da Produção Brasileira de Etanol de Milho. **Análise e indicadores do Agronegócio** v. 13, n. 5, maio 2018.

FRIZZONE, J. A.; ANDRADE JUNIOR. **Análise de decisão econômica em irrigação**. Piracicaba: ESALQ/LER, 2005. 371p.

FURLANETO, F. P. B.; ESPERANCINI, M. S. T. Custo de produção e indicadores de rentabilidade da cultura do milho safrinha. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 40, n. 3, p. 297-303, 2010. <https://doi.org/10.5216/pat.v40i3.8609>

GALLAGHER, P. W., BRUBAKER, H., & SHAPOURI, H.HOSEIN. Plant size: capital cost relationships in the dry mill ethanol industry. **Biomass and Bioenergy**, v. 28, n. 6, p. 565-571, 2005.

GITMAN, J. L. **Princípios da Administração Financeira**. 12 ed.São Paulo: Pearson, 2010.

GITMAN, Lawrence J. **Princípios da administração financeira**. São Paulo: Habra, 2002.

GUIDUCCI, R., ALVES, E. D. A., DE LIMA FILHO, J. R., & MOTA, M. M.. Aspectos metodológicos da análise de viabilidade econômica de sistemas de produção. In: EMBRAPA. **Viabilidade econômica de sistemas de produção agropecuários: metodologia e estudos de casos**. Brasília, DF: Embrapa, 2012. cap. 1, p. 17-116.

GUIMARAES, D., LANDAU, E., de MENEZES, C. B., & TARDIN, F. Zoneamento agrícola de risco climático (Zarc) para o sorgo granífero no Brasil. **Embrapa Milho e Sorgo- Documentos** (INFOTECA-E), 2020.

GUMIENNA, M., SZWENGIEL, A., LASIK, M., SZAMBELAN, K., MAJCHRZYCKI, D., ADAMCZYK, J., NOWAK, J., CZARNECKI, Z. Effect of corn grain variety on the bioethanol production efficiency. **Fuel**, v. 164, p. 386-392, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.10.033>

GÓMEZ, E.O.; SOUZA, R.T.G.; ROCHA, G.J.M.; ALMEIDA, E.; CORTEZ, L.A.B. Em Bioetanol de Cana-de-Açúcar: P&D para Produtividade e Sustentabilidade; Cortez, L.A.B.; ed. Edgard Blücher Ltda. São Paulo, 2010, cap. 9.

HOFFMAN, A. L.; KEMANIAN, A. R.; FOREST, C. E. The response of maize, sorghum, and soybean yield to growing-phase climate revealed with machine learning. **Environmental Research Letters**, v. 15, n. 9, p. 094013, 2020. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab7b22>.

KHALAF, A. A.; ISSAZADEH, L.; ABDULLAH, Z. A.; HASSANPOUR, J. Growth and Yield Assessment of Two Types of Sorghum-Sudangrass Hybrids as Affected by Deficit

Irrigation. **International Journal of Agricultural and Biosystems. Engineering**, v. 13, n. 7, p. 214-218, 2019.

KISEKKA, I.; LAMM, F.; SCHLEGEL, A. Sorghum yield response to water supply and irrigation management. **Kansas Agricultural Experiment Station Research Reports**, v. 2, n. 7, p. 7, 2016

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

KOTHARI, K., ALE, S., BORDOVSKY, J. P., THORP, K. R., PORTER, D. O., & MUNSTER, C. L. Simulation of efficient irrigation management strategies for grain sorghum production over different climate variability classes. **Agricultural Systems**, v. 170, p. 49-62, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.12.011>

KOTHARI, K.; ALE, S.; BORDOVSKY, J. P.; MUNSTER, C. L. Assessing the climate change impacts on grain sorghum yield and irrigation water use under full and deficit irrigation strategies. **Transactions of the ASABE**, v. 63, n. 1, p. 81-94, 2020. <https://doi.org/10.13031/trans.13465>.

KUMAR, D.; JUNEJA, A.; SINGH, V. Fermentation technology to improve productivity in dry grind corn process for bioethanol production. **Fuel Processing Technology**, v. 173, p. 66-74, 2018.

KUMAR, S. P. J.; KUMAR, N. S. S; CHINTAGUNTA, A. D. Bioethanol production from cereal crops and lignocelluloses rich agro-residues: prospects and challenges. **SN Applied Sciences**, v. 2, n. 10, p. 1-11, 2020. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03471-x>.

KURAMBHATTI, C. V., KUMAR, D., RAUSCH, K. D., TUMBLESÓN, M. E., & SINGH, V. Increasing ethanol yield through fiber conversion in corn dry grind process. **Bioresource technology**, v. 270, p. 742-745, 2018.

LANDAU, E. C.; MOURA, L. **Evolução da produção de sorgo granífero (Sorghum bicolor, Poaceae)**. Embrapa Milho e Sorgo-Capítulo em livro científico (ALICE), 2020.

LI, Y.; KESHARWANI, R.; SUN, Z.; QIN, R.; DAGLI, C.; ZHANG, M.; WANG, D. Economic viability and environmental impact investigation for the biofuel supply chain using co-fermentation technology. **Appl. Energy**, 2020, 259, 114235. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114235>

LOPES, M. L., PAULILLO, S. C. D. L., GODOY, A., CHERUBIN, R. A., LORENZI, M. S., GIOMETTI, F. H. C., BERNARDINO, C. D., AMORIN NETO, H. B., AMORIM, H. V. D.. Ethanol production in Brazil: a bridge between science and industry. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 47, p. 64-76, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2016.10.003>

MADALENO, L. L., MINARI, G. D., DE ANNUNZIO, F. R., DE CARVALHO, M. R., JÚNIOR, G. R. B., SALES, D. C., & FRIGIERI, M. C. Use of antimicrobials for contamination control during ethanolic fermentation. **Científica**, v. 44, n. 2, p. 226-234, 2016. <http://cientifica.org.br/index.php/cientifica/article/view/760>

MAROUN, M. R., LA ROVERE, E. L.. Ethanol and food production by family smallholdings in rural Brazil: Economic and socio-environmental analysis of micro distilleries in the State of Rio Grande do Sul. **Biomass and Bioenergy**, v. 63, p. 140-155, 2014.
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.02.023>

MARTINS, J. D., CARLESSO, R., PETRY, M. T., RODRIGUES, G. C.. Viabilidade econômica da irrigação deficitária em milho irrigado por gotejamento. **Irriga**, v. 1, n. 1, p. 150-150, 2016.
<https://doi.org/10.15809/irriga.2016v1n1p150-165>

MILANEZ, A. Y., NYKO, D., VALENTE, M. S., XAVIER, C. E. O., KULAY, L. A., DONKE, A. C. G., MATSUURA, M. L. S. F., RAMOS, N. P., MORANDI, M. A. B., BONOMI, A. M. F.L. J., CAPITANI, D. H. D., CHAGAS, M. F., CAVALETT, O., GOUVÊIA, V.L.R. A produção de etanol pela integração do milho-safrinha às usinas de cana-de-açúcar: avaliação ambiental, econômica e sugestões de política. <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/1921>, 2014.

MILLAR, A. A., **Drenagem de terras agrícolas: bases agronômicas**. Bib. Orton IICA/CATIE, 1978.

MORENO, J. A. Clima do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura, 1961. 42 p.

NIAGHI, A. R., JIA, X., STEELE, D. D., SCHERER, T. F. Drainage water management effects on energy flux partitioning, evapotranspiration, and crop coefficients of corn. **Agricultural Water Management**, v. 225, p. 105760, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105760>

NOGUEIRA, H. M. C. de M., NOGUEIRA, C. U., FANTINEL, A. L., MÜLLER, I.,

HOFFMANN, R., & PADRÓN, R. A. R. Avaliação da produção e resistência à geada de cultivares de cana-de-açúcar. **Revista ESPACIOS**, Vol. 36 nº 24 , 2015.

OJEDA, K., ÁVILA, O., SUÁREZ, J., KAFAROV, V. Evaluation of technological alternatives for process integration of sugarcane bagasse for sustainable biofuels production—Part 1. **Chemical Engineering Research and Design** 89.3 (2011): 270-279).

PANG, B., ZHANG, K., KISEKKA, I., BEAN, S., ZHANG, M., & WANG, D., Evaluating effects of deficit irrigation strategies on grain sorghum attributes and biofuel production. **Journal of cereal science**, v. 79, p. 13-20, 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.jcs.2017.09.002>.

PERSSON, M., GALBE, M., WALLBERG, O. A strategy for synergistic ethanol yield and improved production predictability through blending feedstocks. **Biotechnology for biofuels**, v. 13, n. 1, p. 1-11, 2020. <https://doi.org/10.1186/s13068-020-01791-z>

PRAJAPATI, V.; TRIVEDI, U.; PATEL, K. C. Bioethanol production from the raw corn starch and food waste employing simultaneous saccharification and fermentation approach. **Waste and Biomass Valorization**, v. 6, n. 2, p. 191-200, 2015.

QUINTERO, J. A., MONTOYA, M. I., SÁNCHEZ, O. J., GIRALDO, O. H., CARDONA, C. A. Fuel ethanol production from sugarcane and corn: comparative analysis for a Colombian case. **Energy**, v. 33, n. 3, p. 385-399, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2007.10.001>

RENATO, N. S.; SILVA, J. B. L.; SEDIYAMA, G. C.; PEREIRA, E. G. Influência dos métodos para cálculo de graus-dia em condições de aumento de temperatura para as culturas de milho e feijão. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 28, n. 4, p. 382-388, 2013. DOI: 10.1590/S0102-77862013000400004.

REZENDE, M. L., RICHARDSON, J. W. Risk analysis of using sweet sorghum for ethanol production in southeastern Brazil. **Biomass and bioenergy**, v. 97, p. 100-107, 2017.

REZENDE, M. L., RICHARDSON, J. W. Economic feasibility of sugar and ethanol production in Brazil under alternative future prices outlook. **Agricultural Systems**, v. 138, p. 77-87, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.05.004>

SANCHEZ, O. J., CARDONA, C. A. Trends in biotechnological production of fuel ethanol from different feedstocks. **Bioresource technology**, v. 99, n. 13, p. 5270-5295, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.11.013>

SCHLEGEL, A. J.; ASSEFA, Y.; O'BRIEN, D. Productivity and profitability of four crop rotations under limited irrigation. **Applied Engineering in Agriculture**, p. 0, 2019.

SESMERO, J. P., PERRIN, R. K., & FULGINITI, L. E. Environmental efficiency among corn ethanol plants. **Biomass and Bioenergy**, v. 46, p. 634-644, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.06.033>

SILVA, G. P. D., ARAÚJO, E. F. D., SILVA, D. O., & GUIMARÃES, W. V. Ethanol fermentation of sucrose, sugarcane juice and molasses by *Escherichia coli* strain KO11 and *Klebsiella oxytoca* strain P2. *Brazilian Journal of Microbiology*, v. 36, n. 4, p. 395-404, 2005.

SIMAO, E. D. P., RESENDE, Á. V., NETO, M. M. G., BORGHI, E., & VANIN, À. Resposta do milho safrinha à adubação em duas épocas de semeadura. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 17, n. 1, p. 76-90, 2018.

SOMAVAT, P.; KUMAR, D.; SINGH, V. Techno-economic feasibility analysis of blue and purple corn processing for anthocyanin extraction and ethanol production using modified dry grind process. **Industrial crops and products**, v. 115, p. 78-87, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.02.015>

STAMENKOVIĆ, O. S., SILIVERU, K., VELJKOVIĆ, V. B., BANKOVIĆ-ILIĆ, I. B., TASIĆ, M. B., CIAMPITTI, I. A. & PRASAD, P. V. Production of biofuels from sorghum. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 124, p. 109769, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109769>

SZAMBELAN, K., NOWAK, J., SZWENGIEL, A., JELEŃ, H., & ŁUKASZEWSKI, G. Separate hydrolysis and fermentation and simultaneous saccharification and fermentation methods in bioethanol production and formation of volatile by-products from selected corn

cultivars. **Industrial Crops and Products**, v. 118, p. 355-361, 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.03.059>

TABORDA, L. W., MARIA, S., LOVATO, A., MARIA, S. Evaluation of the technical and economic feasibility of ethanol production in a pilot plant using sweet potatoes. **Custos e Agronegócio**, Recife, v. 96, p. 245-262, 2015.

TORRES, R. R.; ROBAINA, A. D.; PEITER, M. X.; BEN, L. H. B.; MEZZOMO, W.; KIRCHNER, J. H.; PEREIRA, T. S.; BUSKE, T. C.; VIVAN, G. A. ; GIRARDI, L. B. Economic of the irrigated production of forage millet. **SEMINA. CIÊNCIAS AGRÁRIAS (ONLINE)**, v. 40, p. 623, 2019. <http://dx.doi.org/10.5433/1679-0359.2019v40n2p623>

ZABED, H., SAHU, J. N., SUELY, A., BOYCE, A. N., & FARUQ, G. Bioethanol production from renewable sources: Current perspectives and technological progress. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 71, p. 475-501, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.076>

ZHANG, H., HAN, M., COMAS, L. H., DEJONGE, K. C., GLEASON, S. M., TROUT, T. J., & MA, L. Response of Maize Yield Components to Growth Stage-Based Deficit Irrigation. **Agronomy Journal**, v. 111, n. 6, p. 3244-3252, 2019

ZHANG, K.; PANG, B.; KISEKKA, I.; ZHANG, M.; ROGERS, D.; WANG, D. Effect of irrigation on physicochemical properties and bioethanol yield of drought tolerant and conventional corn. **Irrigation science**, v. 36, n. 2, p. 75-85, 2018.
<https://doi.org/10.1007/s00271-017-0563-7>.

ZOU, Y., SADDIQUE, Q., ALI, A., XU, J., KHAN, M. I., QING, M., AZAMAT, M. CAI, H. SIDDIQUE, K. H. Deficit irrigation improves maize yield and water use efficiency in a semi-arid environment. **Agricultural Water Management**, v. 243, p. 106483, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106483>.