

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Pró-reitora de pesquisa e Pós-Graduação
Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel
Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água



Tese

**Impacto do fenômeno ENOS na demanda e deficiência hídrica do milho em
terras baixas do RS**

Thayse do Amaral Aires

Pelotas, 2025

Thayse do Amaral Aires

**Impacto do fenômeno ENOS na demanda e deficiência hídrica do milho
em terras baixas do RS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Ciências (área do conhecimento: Manejo e Conservação do Solo e da Água).

Orientador: Lizete Stumpf

Coorientadores: José Maria Barbat Parfitt

Letícia Burkert Mélo

Pelotas, 2025

Thayse do Amaral Aires

Impacto do fenômeno ENOS na demanda e deficiência hídrica do milho em terras
baixas do RS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Ciências (área do conhecimento: Manejo e Conservação do Solo e da Água).

Data da Tese: 28/07/2025

Banca examinadora:

.....
Profa. Dra. Lizete Stumpf (Orientadora)
Doutora em Agronomia pela Universidade Federal de Pelotas.

.....
Profa. Dra. Maria Cândida Moitinho Nunes
Doutora em Agronomia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

.....
Dr. Marcos Valle Bueno
Doutor em Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Pelotas.

.....
Dra. Juliana Brito Da Silva
Doutora em Agronomia pela Universidade Federal de Pelotas.

Dedico esta tese em memória da minha avó, Maria Zeni Peres do Amaral, cuja sabedoria, amor incondicional e força inspiraram minha caminhada. Que seu legado siga florescendo em cada semente de conhecimento que eu plantar.

Agradecimentos

A Deus, soberano e fiel, meu eterno sustento. Toda honra e toda glória sejam dadas a Ele, que realizou milagres visíveis e invisíveis em minha vida, que me levantou quando as forças faltaram e que nunca me deixou desistir. Cada passo nesta trajetória foi guiado por Suas mãos. Minha gratidão é imensurável por tudo o que Ele já fez e pelo que ainda fará. Que Ele continue a caminhar ao meu lado e ao lado da minha família, iluminando nossos caminhos e fortalecendo nossa fé.

Aos meus pais, Claudete e Rubens, verdadeiros alicerces da minha vida. Obrigada por cada sacrifício silencioso, por cada palavra de incentivo e, sobretudo, por acreditarem em mim mesmo quando eu mesma duvidei. Esta conquista é também de vocês.

À minha filha Louise, que mesmo tão pequena, já compreende o valor do esforço e da dedicação. Teus olhinhos atentos, teus abraços sinceros e tua presença doce foram meu maior combustível.

Ao meu marido, Eduardo, pelo apoio constante e por caminhar ao meu lado com paciência, amor e compreensão.

Às minhas fiéis companheiras de quatro patas, Kowalsque e Pétala Margarida, por encherem meus dias de carinho, leveza e afeto.

À minha avó Maria (in memoriam), que sempre se orgulhou de mim e apoiou cada um dos meus passos. Sua memória e seu amor seguem comigo, eternamente vivos.

Ao meu comitê de orientação e grupo de pesquisa, minha sincera gratidão. Em especial, ao pesquisador Parfitt, à professora Lizete, e às doutoras Letícia e Marília, por cada ensinamento, incentivo, escuta e contribuição para o amadurecimento deste trabalho e para minha formação.

À Universidade Federal de Pelotas (UFPel), ao Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água (MACSA), à Embrapa e à CAPES, pelo suporte institucional e pelas oportunidades de crescimento científico e pessoal. Encerrar este ciclo é também abrir caminho para novos recomeços. Sigo em frente com gratidão no coração, fé renovada e coragem no olhar.

Resumo

AIRES, Thayse do Amaral. **Impacto do fenômeno ENOS na demanda e deficiência hídrica do milho em terras baixas do RS**. Orientadora: Lizete Stumpf. 2025. 77 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Programa de Pós Graduação em Manejo e Conservação do solo e da Água, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2025.

Esta tese teve como objetivo analisar os impactos dos fenômenos El Niño e La Niña sobre o comportamento hídrico da cultura do milho em terras baixas do Rio Grande do Sul, com foco em duas abordagens complementares: a estimativa da demanda hídrica e a avaliação da deficiência hídrica da cultura. Para tanto, foram conduzidos dois estudos com base em séries históricas de dados climáticos (2000–2024), simulações fenológicas da cultivar P3016VYHR, cálculos de evapotranspiração da cultura (ET_c), e balanço hídrico do solo fundamentado nos modelos de Thornthwaite & Mather (1955) e CN-SCS. A análise considerou diferentes datas de semeadura, respeitando as restrições térmicas regionais. Os resultados evidenciaram que a demanda hídrica variou entre 600 e 1000 mm, com valores mais elevados em anos de La Niña, especialmente em municípios como Bagé e Santana do Livramento. Paralelamente, observou-se maior deficiência hídrica nesses mesmos municípios e anos, com destaque para a fase reprodutiva da cultura. Em contrapartida, os anos de El Niño apresentaram menor demanda e deficiência hídrica, sobretudo para semeaduras tardias. A integração entre os resultados de demanda e deficiência hídrica reforça a necessidade de estratégias de manejo hídrico adaptadas ao regime climático e às janelas de semeadura, visando maior eficiência no uso da água e resiliência dos sistemas agrícolas, frente à variabilidade interanual do clima.

Palavras-chave: ENOS; *Zea mays*; Irrigação; Balanço hídrico; Zoneamento agroclimático.

Abstract

AIRES, Thayse do Amaral. **Impact of the ENOS phenomenon on the demand and water deficiency of corn in the lowlands of RS.** Advisor: Lizete Stumpf. 77 f. Thesis (Doctorate in Science) – Postgraduate Program in Soil and Water Management and Conservation, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2025.

This thesis aimed to analyze the impacts of El Niño and La Niña phenomena on the water behavior of maize in the lowlands of Rio Grande do Sul, Brazil, focusing on two complementary approaches: estimating crop water demand and evaluating crop water deficit. Two studies were conducted using historical climate data (2000–2024), phenological simulations of the P3016VYHR cultivar, crop evapotranspiration (ET_c) calculations, and soil water balance based on the Thornthwaite & Mather (1955) and CN-SCS models. The analyses considered different sowing dates, respecting regional thermal constraints. The results showed that crop water demand ranged from 600 to 1000 mm, with the highest values observed during La Niña years, especially in municipalities such as Bagé and Santana do Livramento. These years also exhibited the highest water deficits, particularly during the reproductive phase. Conversely, El Niño years showed lower water demand and deficits, especially for late sowing dates. The integration of crop water demand and deficit results highlights the need for water management strategies adapted to climate patterns and sowing windows, aiming for greater efficiency in water use and increased resilience of agricultural systems in the face of interannual climate variability.

Keywords: ENSO; *Zea mays*; Irrigation; Water balance; Agroclicmatic zoning.

Sumário

1. Introdução	9
2. Revisão de Literatura.....	11
2.1. Terras Baixas.....	11
2.2. Novas tecnologias: Drenagem, Sistematização/Suavização e Sulco-Camalhão	14
2.3. Sistemas Produtivos nas Terras Baixas: Arroz, Soja e Milho.....	17
2.4. A cultura do milho: resultados de pesquisas	19
2.5. Fenômenos El niño e La niña	23
3. Projeto de Pesquisa	26
4. Relatório do trabalho de campo.....	39
5. Artigo 1	41
6. Artigo 2	53
Considerações finais	66
Referências.....	67

1. Introdução

A produção agrícola nas terras baixas do Rio Grande do Sul (RS) enfrenta sérios desafios relacionados à disponibilidade hídrica e à variabilidade climática, intensificada por eventos extremos como El Niño e La Niña. Esses fenômenos alteram significativamente o regime de chuvas, promovendo déficits hídricos ou excesso de precipitação, afetando diretamente o desenvolvimento das culturas (Carmona *et al.*, 2018). Entre as culturas de sequeiro em expansão na região, o milho tem ganhado destaque pelo seu alto potencial produtivo e eficiência no uso da água (Matzenauer *et al.*, 2002; Mayz; Girasol, 2019).

A deficiência hídrica nas fases críticas do milho, particularmente entre o pendoamento e o enchimento de grãos, pode reduzir drasticamente a produtividade, com perdas superiores a 50% quando o déficit ocorre na floração (Carvalho *et al.*, 2000; Bergamaschi *et al.*, 2006). Diante disso, torna-se essencial compreender a demanda hídrica da cultura em diferentes épocas de semeadura e sob distintos contextos climáticos, a fim de adotar estratégias de manejo irrigado mais eficientes. O balanço hídrico é uma ferramenta robusta para estimar a deficiência hídrica e o número de irrigações necessárias ao longo do ciclo fenológico. No presente estudo, foi utilizado o modelo proposto por Thornthwaite e Mather (1955), com simplificação de Pereira *et al.* (1997), adaptado por Mélo-Araujo (2023) para lavouras de milho em terras baixas. Esse modelo permite quantificar a variação do armazenamento de água no solo (ΔARM), utilizando dados de precipitação efetiva (calculada pelo método CN-SCS) e evapotranspiração da cultura (ET_c), além de considerar critérios específicos para simulação de irrigação.

Diversos autores apontam que a demanda hídrica do milho varia em função da época de semeadura, do ciclo da cultivar e do regime climático (Allen *et al.*, 1998; Kiniry *et al.*, 1991). Os riscos associados à deficiência hídrica são mais expressivos na metade sul do RS, especialmente em anos sob influência de La Niña, nos quais o déficit hídrico é mais frequente durante a fase reprodutiva do milho (Leivas; Berlato; Fontana, 2006; Wrege *et al.*, 2018).

Assim, esta tese integra o modelo de balanço hídrico à análise dos efeitos dos fenômenos ENOS sobre a deficiência e a demanda hídrica do milho em terras baixas, contribuindo com subsídios técnicos para o planejamento agrícola e a sustentabilidade produção regional.

1.1. Objetivo Geral

Avaliar a influência dos fenômenos El Niño e La Niña sobre a demanda e a deficiência hídrica do milho cultivado em terras baixas do Rio Grande do Sul, com base na aplicação do balanço hídrico do solo, considerando diferentes datas de semeadura, em municípios de terras baixas do Rio Grande do Sul.

1.2. Objetivos Específicos

- I. Identificar os períodos críticos de semeadura nos municípios estudados, com base na temperatura mínima do ar e nas exigências térmicas da cultura do milho.
- II. Simular a demanda hídrica de uma cultivar de milho, ao longo de diferentes épocas de semeadura, em municípios representativos das terras baixas do Rio Grande do Sul.
- III. Estimar a deficiência hídrica ao longo do ciclo da cultura do milho, utilizando o balanço hídrico diário como ferramenta principal.

1.3. Hipóteses

- I. Os períodos críticos inviáveis à semeadura ocorrem com maior frequência em municípios de maior latitude e altitude, e sua identificação permite delimitar janelas seguras de plantio com menor risco de falhas na emergência.
- II. A demanda hídrica do milho varia significativamente conforme a época de semeadura, sendo maior em plantios realizados no final do inverno/início da primavera e menor nas semeaduras tardias, devido às diferenças na temperatura e na evapotranspiração durante o ciclo da cultura.
- III. A deficiência hídrica do milho é mais acentuada nos municípios do interior do estado, principalmente durante os anos de La Niña, exigindo maior número de irrigações complementares, em comparação aos anos de El Niño e Neutros.

2. Revisão de Literatura

2.1. Terras Baixas

As terras baixas do Rio Grande do Sul ocupam extensas áreas com relevo variando de plano a suavemente ondulado, sendo encontrados nas regiões do Litoral Sul, Planície Costeira Interna e Externa, Depressão Central, Campanha e Fronteira Oeste, ocorrendo, em geral, em baixas altitudes (0-200 m) (Pinto *et al.*, 2017). O agroecossistema das terras baixas possui características específicas. Além disso, apresentam fertilidade natural variando de baixa a média e uma capacidade de drenagem restrita. As terras baixas desempenham um papel fundamental na produção de arroz irrigado, contribuindo significativamente para a produção de carne, leite, soja e, em menor escala, milho (Emygdio *et al.*, 2017).

O estado do Rio Grande do Sul é responsável por 70% da produção nacional de arroz, que varia entre 11 e 13 milhões de toneladas em grão (Reunião, 2018), demonstrando que as terras baixas são excepcionalmente adequadas para o cultivo de arroz irrigado, devido às suas características. A adoção de novas tecnologias em diversas áreas, especialmente em irrigação e drenagem, tem promovido avanços significativos para o cultivo de outras espécies.

Com o aumento da intensificação das atividades agrícolas, há o risco de que os recursos hídricos nas terras baixas se tornem mais escassos no futuro. Embora essa região se destaque pela abundância de recursos essenciais para a agricultura, essa disponibilidade não dispensa a necessidade de uma gestão eficiente da água, crucial para garantir a sustentabilidade dessas áreas. No ambiente das terras baixas, sobressaem-se anomalias climáticas extremas associadas às fases quente e fria do fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS), caracterizadas por excesso de precipitação pluvial durante o El Niño e por períodos de estiagem no La Niña, especialmente na primavera e no início do verão (Carmona *et al.*, 2018).

Para otimizar o sistema produtivo em ecossistemas de terras baixas, a gestão eficiente da água é essencial, dado que, em um mesmo ano ou até mesmo em uma mesma safra, podem ocorrer tanto excessos quanto deficiências hídricas. O clima da região é marcado por verões secos, com eventos de precipitação intensa concentrados em períodos específicos, o que gera estresses hídricos, tanto por déficit quanto por excesso, em culturas como soja e milho. Esse agroecossistema também abrange a região litorânea de Santa Catarina, parte do Uruguai, as províncias

argentinas de Entre Rios e Corrientes, e o sul do Paraguai, onde o cultivo de arroz irrigado por inundação também é praticado.

O principal desafio para a adoção da produção integrada nas terras baixas está, provavelmente, na transição da gestão tradicional do cultivo de arroz para um modelo de produção mais multifacetado e sofisticado. Essa transformação não se limita apenas à visão e postura do gestor, proprietário ou responsável, mas abrange todos os envolvidos no processo produtivo. É crucial entender a necessidade de investir de forma constante e estruturada no planejamento, no desenvolvimento de competências e na motivação para a mudança. Para que a integração entre agricultura e pecuária seja eficaz, ambas as atividades devem receber atenção igual, o que requer decisões rápidas e bem fundamentadas (Reunião, 2022).

A diversificação de fontes de renda, pela rotação com culturas comerciais ou pela integração de animais no sistema de produção nas terras baixas, além de proporcionar benefícios à qualidade estrutural e funcional do solo, é essencial para a sustentabilidade do agronegócio. No entanto, esse ambiente apresenta limitações de diferentes intensidades, tanto para a introdução de cultivos de sequeiro quanto para a produção animal, devido à sua localização geográfica, à posição e declividade do terreno, bem como às condições físicas e de fertilidade do solo. As terras baixas do Rio Grande do Sul são caracterizadas por um relevo predominantemente plano, solos rasos e a presença de uma camada de impedimento localizada entre 30 cm e 50 cm de profundidade, além de uma baixa capacidade de retenção de água (Parfitt *et al.*, 2022).

De acordo com Carmona *et al.* (2018), as terras baixas são caracterizadas pela baixa altitude e declividade. Elas ocupam uma área de 60.650 km² (22,6% do território estadual) e englobam solos de várias classes: Planossolos (56%), Chernossolos (16%), Neossolos (12%), Gleissolos (7%), Plintossolos (7%) e Vertissolos (1,4%). Ainda de acordo com os autores, apesar do grande número de classes, esses solos têm como características comuns: baixa capacidade de drenagem, textura arenosa, presença de horizonte B textural e presença de camada subsuperficial compactada. Além disso, um levantamento realizado pelo IRGA (Instituto Rio Grandense do Arroz), apresentou cerca de 80% dos solos com pH abaixo do requerido (<5,5), 70% com matéria orgânica (MO) baixa (<2,5%), 50% com deficiência em fósforo (P) e 55% e com deficiência de potássio (K).

Devido à grande heterogeneidade do material de origem e aos variados graus de hidromorfismo, esses solos apresentam uma ampla diversidade nas suas características morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas. Essa diversidade faz com que os solos de terras baixas sejam agrupados em diferentes classes, cada uma com suas próprias limitações e aptidões quanto ao uso agrícola. Em função dessas variações, certos tipos de solos não são adequados ao cultivo de arroz irrigado, o que exige uma análise criteriosa para determinar sua aptidão. Nos patamares mais elevados da região, podem ser encontrados solos que não apresentam hidromorfismo, mas cuja drenagem varia de imperfeita a moderada e, em alguns casos, boa. Esses solos são classificados como Argissolos, Alissolos e Luvisolos, que, apesar de apresentarem condições de drenagem melhores, ainda possuem suas próprias particularidades que devem ser consideradas para o manejo adequado (Embrapa, 2004).

O hidromorfismo, principal característica desses solos, é normalmente motivada pelo relevo predominantemente plano, frequentemente associado a um perfil com camada superficial pouco profunda e subsuperficial mais impermeável. Pinto *et al.* (2017) afirmam que esta característica é identificada, em sua intensidade máxima, através da cor cinzenta ou gleizada e, numa intensidade menos acentuada, por manchas avermelhadas e/ou amareladas (mosqueados) em uma cor de fundo cinzenta. Na paisagem, esse caráter se manifesta de forma menos acentuada nos solos situados em patamares mais elevados, podendo até mesmo estar ausente no caso de solos arenosos. Estes solos, na sua maioria, desenvolveram-se a partir de sedimentos fluviolacustres, lagunares e marinhos das planícies costeiras e de sedimentos aluvionares, oriundos de rochas sedimentares, ígneas e metamórficas das depressões, planaltos e serras do Estado do Rio Grande Sul, portanto, de materiais de origem muito distintos.

O excesso de água no solo pode reduzir significativamente a disponibilidade de oxigênio na zona radicular das plantas de milho, o que compromete de maneira substancial seu crescimento, desenvolvimento e, conseqüentemente, sua produtividade. Esse problema é especialmente crítico em solos com drenagem inadequada, onde o acúmulo de água resulta em condições anaeróbicas que dificultam a absorção de nutrientes essenciais e o metabolismo das raízes, afetando diretamente a saúde da planta e sua capacidade de produzir grãos (Zaidi *et al.*, 2010).

As características intrínsecas desses solos, como a elevada densidade natural e a relação significativamente alta entre micro e macroporos, aliadas à dificuldade de drenagem devido à presença de uma camada subsuperficial quase impermeável, tornam seu manejo desafiador (Pena *et al.*, 1993). As propriedades dos solos dessa região se intensificam quando o preparo do solo é realizado em condições de umidade excessiva. Embora esse cenário possa ser favorável ao cultivo de arroz irrigado, ao reduzir perdas de água e nutrientes, ele se torna restritivo para o desenvolvimento do sistema radicular das culturas de sequeiro. Em situações extremas de compactação, tais condições podem até prejudicar a própria produção de arroz irrigado.

As terras baixas têm grande potencial para a produção agrícola em escala global, quando adequadamente manejadas. No Rio Grande do Sul, essas áreas são predominantemente usadas para o cultivo de arroz irrigado, mas também oferecem condições para o cultivo de milho e outras culturas voltadas à produção de alimentos, fibras e energia.

2.2. Novas tecnologias: Drenagem, Sistematização/Suavização e Sulco-Camalhão

As inovações tecnológicas têm se mostrado cada vez mais essenciais para o setor agrícola, especialmente em regiões com desafios específicos, como as terras baixas do Rio Grande do Sul. Nessas áreas, as características dos solos, exigem soluções práticas que atendam às necessidades locais, melhorando a produtividade e a sustentabilidade. A Embrapa Clima Temperado, em colaboração com empresas privadas, tem sido uma das principais responsáveis por promover avanços tecnológicos capazes de otimizar o uso de recursos naturais e aumentar a eficiência das práticas agrícolas.

Essas inovações englobam desde novos métodos de manejo do solo até tecnologias de irrigação que garantem o uso mais racional da água, solo e energia. O objetivo é aumentar a produtividade, reduzir o impacto ambiental e proporcionar uma agricultura mais adaptada aos desafios impostos pelas mudanças climáticas e escassez de recursos naturais. Nos últimos anos, a integração de pesquisa científica com tecnologias avançadas tem impulsionado a evolução das práticas agrícolas, proporcionando uma agricultura mais eficiente e responsável. O futuro desse setor depende diretamente do contínuo aprimoramento dessas soluções tecnológicas.

Uma das inovações mais notáveis na agricultura moderna é o uso da tecnologia GNSS-RTK (Sistema Global de Navegação por Satélite - Cinemática em Tempo Real), que tem revolucionado o manejo do solo e a gestão da drenagem. São inúmeras as aplicações das tecnologias, e o sistema mais utilizado é o *Global Positioning System* (GPS), desenvolvido nos Estados Unidos (Machado *et al.*, 2010). O GNSS-RTK permite realizar ajustes de precisão na agricultura, proporcionando um controle detalhado das operações no campo, o que é essencial em solos propensos ao encharcamento. A precisão geoespacial do sistema facilita a correção de problemas de drenagem e a gestão do solo, evitando alagamentos e danos às raízes das plantas, típicos de solos argilosos e de difícil escoamento (Kim; Kim, 2022). Além disso, essa tecnologia tem sido aplicada na suavização do terreno, otimizando o uso da água das chuvas e prevenindo a erosão, o que é particularmente importante em solos de baixa profundidade, como os encontrados nas terras baixas do Rio Grande do Sul.

A suavização do solo, ao ajustar a superfície sem grandes movimentações de terra, também contribui para um manejo mais eficiente. Com a suavização, é possível otimizar a drenagem e reduzir os custos e impactos ambientais das operações, tornando-as mais rápidas e econômicas. Esse método tem se mostrado altamente eficaz para áreas com solos pouco profundos, como nas terras baixas, garantindo um manejo eficiente e sustentável do solo (Bueno *et al.*, 2020). Além disso, ao ser combinado com o uso de politubos, sistemas de irrigação de baixo custo e fácil manuseio, a irrigação se torna mais eficiente, melhorando a gestão dos recursos hídricos e promovendo a sustentabilidade.

A suavização do terreno, que constitui um tipo de sistematização com declividade variada, é uma técnica utilizada para adaptar melhor a área ao sistema produtivo. Esse método ajusta o terreno de forma mais natural, eliminando depressões e, se necessário, as coroas. Ao contrário da sistematização clássica, que é plana, a suavização busca otimizar tanto a drenagem quanto a irrigação. Em projetos voltados para drenagem, a suavização foca na eliminação das depressões e na redução de taipas, com a movimentação de solo variando entre 50 e 80 m³ por hectare. Já para irrigação, a suavização pode envolver a remoção de coroas, com a movimentação de solo entre 100 e 140 m³ por hectare (Parfitt *et al.*, 2020).

Nos projetos de suavização do Projeto Sulco (Projeto público-privado com coordenação da Embrapa), que englobou 27 áreas em diferentes municípios do RS, a declividade mínima foi um fator crucial. Foi adotada a declividade mínima de 0,055%

sempre que possível. Esse valor influencia diretamente o movimento de solo e a prevenção de encharcamento. A escolha da declividade mínima deve equilibrar a necessidade de drenagem com o controle da movimentação de solo, pois uma declividade muito baixa pode gerar zonas de saturação, enquanto uma muito alta exige um movimento de solo excessivo (Parfitt *et al.*, 2022).

Esses projetos de suavização são altamente eficazes em termos de drenagem e são particularmente recomendados para sistemas em que há a necessidade de irrigar culturas de sequeiro. O projeto de drenagem superficial interna, desenvolvido a partir da suavização do terreno, é um exemplo de como as técnicas de manejo do solo podem otimizar a produtividade agrícola.

Outro grande avanço no manejo do solo nas áreas de terras baixas é o uso da técnica sulco-camalhão. Essa técnica consiste na criação de sulcos para permitir o escoamento eficiente do excesso da água, e ao mesmo tempo permite a irrigação em tempos de déficit hídrico. O sistema sulco-camalhão é ideal para terrenos com baixa declividade e solo com baixa taxa de infiltração, ajudando na gestão de águas durante períodos de seca e de chuvas excessivas (Hirakuri *et al.*, 2021). O uso dessa técnica permite aos agricultores otimizar a irrigação e controlar melhor as condições climáticas adversas, garantindo uma lavoura mais resiliente e produtiva.

A irrigação é outro componente essencial na agricultura, especialmente em regiões que enfrentam períodos de seca prolongados. O uso de politubos tem se destacado como uma solução prática e de baixo custo para irrigação, oferecendo maior controle sobre a quantidade de água utilizada, o que contribui para a sustentabilidade e eficiência do sistema de irrigação. Esses tubos flexíveis permitem uma distribuição mais precisa da água, evitando o desperdício e o alagamento das lavouras, o que é crucial em áreas com desafios hídricos (Reunião, 2018).

O sistema sulco-camalhão, que tem sido amplamente utilizado nas práticas agrícolas, sempre demonstrou benefícios consideráveis para o desenvolvimento das culturas e o aumento da produtividade, mesmo quando as condições climáticas durante a safra variam. Este sistema se destaca pela sua capacidade de otimizar o uso da água e melhorar a eficiência do solo, o que contribui diretamente para o crescimento das plantas, independentemente das flutuações climáticas que podem afetar o desempenho da produção.

Sua adoção e implementação de maneira mais ampla ocorreram de forma mais recente, com um aumento significativo na popularização dessa tecnologia entre os

produtores. A principal razão para sua expansão está ligada à sua eficácia em lavouras suavizadas, tornando o cultivo mais eficiente e sustentável. Além disso, a irrigação por manga de politubos, tem sido um fator importante para a implementação desse sistema no Brasil. O uso dessa tecnologia tem sido promovido de forma crescente no mercado nacional, mostrando-se uma solução viável e inovadora, que beneficia tanto a agricultura em grandes propriedades como em pequenas áreas, otimizando o uso dos recursos naturais e garantindo uma produção mais estável e de maior qualidade (Campos *et al.*, 2021).

Essas tecnologias não só melhoram a produtividade das lavouras, mas também contribuem para a preservação dos recursos naturais e para a construção de um futuro mais sustentável. As inovações, portanto, desempenham um papel crucial na evolução do setor agrícola, assegurando que ele esteja preparado para os desafios do presente e do futuro.

2.3. Sistemas Produtivos nas Terras Baixas: Arroz, Soja e Milho

Nas terras baixas, a atividade agropecuária sempre se caracterizou pela predominância de duas práticas principais: a cultura de arroz irrigado e a pecuária extensiva de corte. Essas atividades têm sido os pilares da produção nessas regiões, mas, nas últimas décadas, houve uma transformação significativa nesse cenário. A soja, que antes tinha uma presença limitada, tem se tornado cada vez mais importante, expandindo sua área de cultivo e ocupando, atualmente, cerca de 50% da área destinada ao cultivo de arroz (Emater/RS-Ascar, 2024). Essa transição reflete uma mudança nos padrões produtivos e está fortemente ligada à necessidade de diversificar e intensificar os sistemas de produção, com o objetivo de garantir maior estabilidade econômica para os produtores.

A introdução de novas tecnologias no cultivo de soja foi um fator determinante para essa transformação. Essas inovações não apenas facilitaram o cultivo dessa oleaginosa, mas também possibilitaram a expansão de outras culturas, como milho, sorgo e trigo. Como resultado, o sistema produtivo nas terras baixas se tornou mais dinâmico e sustentável, com maiores perspectivas de rentabilidade. Essa diversificação permite que os produtores ajustem suas lavouras às demandas do mercado e também às variações climáticas, proporcionando uma maior flexibilidade no planejamento da produção.

Atualmente, o sistema produtivo nas terras baixas do Rio Grande do Sul é composto por aproximadamente 900 mil hectares dedicados ao arroz irrigado, 500 mil hectares para o cultivo de soja, cerca de 10 mil hectares destinados ao milho, e algumas áreas experimentais de trigo, que não devem ultrapassar mil hectares (Emater/RS-Ascar, 2024). Esse panorama revela uma tendência crescente das culturas de sequeiro, especialmente da soja, cuja área cultivada tem se expandido significativamente. A soja, além de ser rentável, oferece benefícios importantes para a rotação com o arroz, contribuindo para o controle de pragas e doenças e garantindo uma maior sustentabilidade ao sistema produtivo. Em alguns anos, a área dedicada à soja pode até ultrapassar a do arroz, consolidando-se tão importante como o arroz para a região.

O cultivo de arroz, é feito com diferentes sistemas de preparo de solo, sendo o mais utilizado o "cultivo mínimo". Esse sistema envolve o preparo antecipado do solo, que geralmente é feito no outono, com o uso de técnicas como o entaipamento e a introdução de azevém ou a manutenção do campo em estado natural para o uso com a pecuária. Aproximadamente 30 dias antes da semeadura do arroz, que tradicionalmente ocorre na segunda quinzena de setembro, realiza-se a dessecação da vegetação com herbicidas. Em áreas com o sistema convencional, o preparo do solo é mais intensivo, sendo realizado antes da semeadura. Já o sistema pré-germinado ocupa uma pequena, cerca de 10%, e é utilizado para garantir uma germinação mais uniforme representando cerca de 90 mil há (Wielewicky & Barros, 2002).

Normalmente, o arroz é cultivado na mesma área, no máximo por um ou dois anos consecutivos. Essa prática é necessária devido a problemas com ervas invasoras e doenças que afetam a cultura. O cultivo pode retornar após um intervalo de três a quatro anos. Esse modelo de cultivo demonstra que as áreas estruturas para o cultivo de arroz irrigado são maiores que a área cultivada com arroz anualmente. Assim não é difícil concluir que essa área está em aproximadamente 3 milhões de hectares. Isso permite que outras culturas, como a soja e o milho, sejam cultivadas dentro do mesmo sistema produtivo, aproveitando os recursos hídricos e a estrutura de manejo do solo.

2.4. A cultura do milho: resultados de pesquisas

A cultura do milho tem apresentado excelentes resultados em diversos experimentos conduzidos em áreas de terras baixas, a diferença em relação a soja é que, após a colheita, os grãos são principalmente exportados, o milho é insumo de outras cadeias produtivas como por exemplo a avicultura, leiteira e suinocultura e ainda pode gerar energia para produção de etanol.

O milho é uma cultura extremamente eficiente no uso da água, especialmente quando se considera sua capacidade de converter essa água em matéria seca. Como o cereal com maior potencial de rendimento de grãos, o milho consegue produzir grandes quantidades de grãos com uma quantidade relativamente controlada de água. Conforme nota técnica ao longo de seu ciclo de cultivo, que dura cerca de 130 dias, o milho consome entre 500 e 800 mm de água, dependendo das condições climáticas e do solo (Mayz & Girasol, 2019). Sua eficiência no uso da água é uma característica marcante, com uma conversão de 0,8 a 1,6 kg de grãos por metro cúbico de água consumido. Essa alta eficiência é um dos motivos pelos quais o milho é uma das culturas mais produtivas no contexto agrícola mundial.

Durante uma pesquisa realizada na Estação Experimental de Taquarí, no Rio Grande do Sul, Matzenauer *et al.* (2002), ao longo de vários anos, fornecem dados sobre a evapotranspiração da cultura do milho. A evapotranspiração máxima registrada ao longo do ciclo da cultura foi de 571, 577 e 544 mm, para semeaduras realizadas em setembro, outubro e novembro, respectivamente. Esses dados indicam que a demanda por água pode variar dependendo da época de plantio, refletindo as condições climáticas e a duração do ciclo de cultivo, que pode ser mais curto ou mais longo, dependendo da data de semeadura e das condições meteorológicas ao longo da estação de crescimento. Esse tipo de dado é fundamental para o manejo eficiente da água na irrigação e para o planejamento do cultivo em diferentes regiões do Brasil, onde a disponibilidade hídrica pode variar consideravelmente.

Embora o milho seja relativamente tolerante ao déficit hídrico durante o período vegetativo e de maturação, é no estágio de floração que a falta de água pode ter um impacto mais significativo na produtividade. Durante a floração, que inclui a formação da inflorescência, o desenvolvimento dos estigmas e o processo de polinização, a planta é especialmente sensível à deficiência hídrica. A falta de água nesse estágio pode reduzir significativamente o número de grãos por espiga, ocasionando perdas

de até 50% na produção (Carvalho *et al.*, 2000). Esse efeito é ainda mais dramático quando o déficit hídrico ocorre nas fases críticas da formação dos estigmas e da polinização, onde a dessecação dos estigmas pode resultar na falha completa da polinização e, conseqüentemente, na perda total ou parcial da produção de grãos. Além disso, durante a fase de enchimento dos grãos, a falta de água pode reduzir o tamanho dos grãos formados, o que compromete diretamente a produtividade e a qualidade da colheita.

Entre 1976 e 2005, foi realizada a análise da distribuição espacial da diferença entre a precipitação (P) e a evapotranspiração potencial (ETp) no Rio Grande do Sul, especialmente entre os meses de dezembro e fevereiro, revelando um padrão claro de déficit hídrico em grande parte da região (Wrege *et al.*, 2018). Nesse período, a evapotranspiração potencial supera a precipitação bruta no Litoral Sul e na Fronteira Oeste, indicando que a quantidade de água que as plantas demandam para sua evaporação e transpiração é maior do que a quantidade de chuva recebida. Esse desequilíbrio hídrico é um fator crítico, especialmente para a agricultura da região, que depende de um regime hídrico favorável para o sucesso das culturas.

Ao se considerar a evapotranspiração das culturas, que é calculada pela multiplicação da evapotranspiração potencial pelo coeficiente de cultura (K_c), o cenário de deficiência hídrica se torna ainda mais alarmante. De acordo com Mélo-Araújo (2023), para as principais culturas agrícolas da região, como a soja e o milho, o coeficiente de cultura (K_c) na fase reprodutiva (R1-R4) é superior a 1, o que significa que a evapotranspiração da cultura (ETc) nessas fases é maior do que a evapotranspiração potencial (ETp). Isso implica que as culturas têm uma demanda hídrica ainda mais elevada durante seu período de crescimento crítico, aumentando a discrepância entre a água disponível e a necessária para a manutenção do crescimento saudável das plantas.

Em mais de 50% dos anos, esse cenário de déficit hídrico é observado especialmente na metade sul do estado, onde é evidente a necessidade de irrigação suplementar para garantir que as culturas de soja e milho alcancem seu pleno potencial produtivo. Esse período coincide com a fase reprodutiva das plantas, quando a demanda por água é extremamente alta e a sensibilidade das culturas à escassez hídrica é acentuada. Durante esse estágio crítico, qualquer falha no fornecimento de água pode comprometer significativamente a produtividade das lavouras, impactando não apenas a quantidade, mas também a qualidade da produção.

Portanto, a análise reforça a importância da gestão eficiente da água, especialmente no que tange à irrigação, para mitigar os efeitos da escassez de água no campo. A irrigação suplementar torna-se não apenas uma estratégia necessária, mas essencial para garantir a sustentabilidade e a produtividade agrícola no Rio Grande do Sul, onde o clima e as variações sazonais podem tornar as condições para o cultivo desafiadoras, especialmente em anos mais secos. A capacidade de adaptação e o planejamento das práticas de manejo hídrico são fundamentais para otimizar a produção e reduzir os impactos negativos da deficiência hídrica nas principais culturas agrícolas da região.

Os autores Leivas, Berlato & Fontana (2006) apresentam em seu trabalho resultados sobre os riscos de déficit hídrico para a metade sul do Estado, em consonância com os achados de (Matzenauer *et al.*, 2002). Esses autores investigaram o risco de ocorrência de deficiência hídrica nos períodos críticos das culturas de soja e milho em algumas localidades da região sul do Estado do Rio Grande do Sul.

De acordo com a pesquisa de Matzenauer *et al.* (2002), os índices de risco de deficiência hídrica para a soja, com valores do índice ETR/ETm abaixo de 0,6, variaram entre 30%, 35%, 38% e 44%, respectivamente, para as localidades de Encruzilhada do Sul, Taquari, Rio Grande e São Gabriel. Esses números demonstram que, durante os períodos críticos de necessidade hídrica para a soja, o risco de déficit é substancial em diversas regiões, sendo mais acentuado na área de São Gabriel.

Os autores de 2002 destacaram a região de São Gabriel como uma das mais vulneráveis a déficits hídricos, o que pode impactar negativamente a produtividade das lavouras de soja e milho. Esses resultados comprovam a importância de estratégias de manejo da água, como a irrigação suplementar, para garantir a viabilidade da produção agrícola, especialmente em anos de condições climáticas desfavoráveis. Tanto os achados de Matzenauer *et al.* (2002), quanto os resultados Leivas, Berlato & Fontana (2006), sublinham que a gestão eficiente dos recursos hídricos é fundamental para otimizar a produtividade agrícola na metade sul do Estado, particularmente nos períodos críticos de desenvolvimento das culturas.

O sistema de sulco-camalhão, amplamente adotado em lavouras comerciais no Rio Grande do Sul, tem demonstrado bons resultados, embora ainda haja espaço para melhorias. O sulco é a área destinada ao escoamento da água, enquanto o camalhão é utilizado para o cultivo (Parfitt *et al.*, 2023). Para torná-lo mais eficiente e

conservacionista, seria indicado que o sulco também funcionasse como a via de trânsito das máquinas. Além disso, as camalhoneiras, implementos responsáveis pela formação dos camalhões, poderiam ser projetadas para reestruturar adequadamente os sulcos.

Conforme Parfitt *et al.* (2023), embora o sistema tenha sido utilizado com sucesso, as falhas no passado geralmente ocorreram devido ao uso isolado da técnica, sem a devida suavização do solo. Nos últimos anos, duas inovações tecnológicas essenciais foram introduzidas para otimizar a implementação do sistema sulco-camalhão: a geotecnologia, que permite uma sistematização/suavização mais precisa do solo, e os politubos, que são empregados na irrigação das culturas. A suavização do solo resultou em uma adaptação mais eficiente da superfície das lavouras, reduzindo a necessidade de movimentação excessiva de terra, o que diminui tanto o tempo de execução quanto os custos operacionais. Por outro lado, a utilização dos politubos, em combinação com um bom manejo da água, garante uma irrigação mais prática, eficiente e econômica.

Diversas pesquisas vêm sendo realizadas e continuam a ser conduzidas em áreas de terras baixas, com o objetivo de aprimorar e refinar os resultados do sistema sulco-camalhão. Esse sistema tem sido constantemente estudado para avaliar aspectos como o desempenho de novas cultivares, a largura dos camalhões, o número de linhas de cultivo, entre outros fatores, sempre com a intenção de otimizar a produção agrícola. O milho e a soja têm sido as culturas mais utilizadas nesses estudos e, mais recentemente, a cultura do trigo também passou a ser analisada. As condições climáticas e a variabilidade dos solos são fatores cruciais que impactam os resultados dessas pesquisas, especialmente em regiões como o Rio Grande do Sul, que apresenta grande diversidade de condições.

Em trabalho realizado no município de Capão do Leão, em áreas sistematizadas tanto com declive quanto sem declive (Planossolo Háplico), foram testados diferentes formatos de camalhões

O estudo de Silva *et al.* (2006) avaliou o impacto de diferentes larguras de camalhões (0,80 m com uma linha de milho e 1,60 m com três linhas) comparadas ao cultivo convencional (sem camalhões), sob condições irrigadas e não irrigadas. Na safra 2004/2005, a irrigação foi o principal fator de aumento da produtividade, com ganhos de 103% (área com declive) e 75% (sem declive) em relação ao cultivo sem

irrigação. Destacou-se que, em área sem declive, camalhões de 0,80 m irrigados por sulco superaram o sistema por inundação, indicando melhor manejo hídrico

Na safra 2005/2006, o efeito da irrigação foi ainda mais expressivo, com aumentos de rendimento de 214% (com declive) e 81% (sem declive). Os maiores rendimentos foram observados com camalhões de 1,60 m e 0,80 m (10.253 e 10.210 kg ha⁻¹, respectivamente), especialmente em áreas com melhor distribuição de umidade e manejo do solo. A drenagem adequada também foi apontada como essencial, especialmente em terrenos declivosos, para evitar prejuízos por excesso hídrico.

A escolha da largura dos camalhões foi estratégica, considerando eficiência operacional e resposta agronômica, sendo fundamentais para garantir boa irrigação, nutrição e mecanização eficiente das lavouras. Um estudo recente, conduzido pela equipe do IRGA (Ramão *et al.*, 2024), testou diferentes cultivares de milho irrigado no sistema sulco-camalhão em várias regiões do Rio Grande do Sul, como Cachoeirinha, Santa Vitória do Palmar e Cachoeira do Sul e obteve resultados muito promissores. A pesquisa destacou o grande potencial produtivo do milho em terras baixas, com rendimentos superiores a 15.000 kg ha⁻¹ em várias cultivares, o que demonstra a eficácia do sistema sulco-camalhão quando as condições técnicas necessárias são atendidas.

Esses resultados confirmam o grande potencial desse sistema, especialmente quando combinado com a irrigação, para o cultivo do milho em terras baixas. Mesmo com as variáveis condições climáticas do Rio Grande do Sul, o sistema sulco-camalhão tem mostrado ser uma alternativa viável e eficiente para aumentar a produtividade da cultura. O Estado, portanto, não só tem a capacidade de atender à demanda interna de milho, tanto para alimentação quanto para energia, como também pode se tornar um exportador significativo dessa importante cultura. O uso dessa tecnologia oferece uma solução sustentável para otimizar a produção agrícola e garantir maior segurança alimentar e energética para a região.

2.5. Fenômenos El niño e La niña

O fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS) é reconhecido como o principal responsável pela variabilidade climática interanual em diversas regiões do globo. Caracteriza-se pela interação entre o oceano Pacífico e a atmosfera, apresentando

duas fases principais: o El Niño (fase quente) e a La Niña (fase fria). Essas fases provocam alterações significativas nos padrões de temperatura e precipitação, com impactos relevantes sobre os sistemas naturais e produtivos (Cunha, 2001; Araújo *et al.*, 2005).

O El Niño é associado ao aquecimento anômalo das águas superficiais do Pacífico equatorial central e oriental, enquanto a La Niña está relacionada ao resfriamento dessas mesmas águas. Tais alterações provocam mudanças nos campos de pressão atmosférica e nos padrões de circulação, desencadeando anomalias climáticas que duram de seis a dezoito meses (Cunha, 2001). Em escala global, esses eventos influenciam diretamente o regime de chuvas e temperaturas em mais de 20 regiões, incluindo o Brasil.

No território brasileiro, os efeitos do ENOS variam conforme a região. Segundo Araújo *et al.* (2005), a fase El Niño promove aumento das chuvas na Região Sul, ao passo que reduz a precipitação nas Regiões Norte e Nordeste. Em anos de La Niña, verifica-se o efeito oposto: chuvas acima da média no Norte e Nordeste, e estiagens mais frequentes no Sul do país. Esse comportamento tem reflexos diretos na produtividade agrícola, dada a elevada dependência do setor em relação às condições meteorológicas.

Diversos estudos destacam os impactos do ENOS sobre a agricultura no Rio Grande do Sul, onde predomina o cultivo de sequeiro. Berlato *et al.* (2005) demonstraram que há uma tendência de o El Niño favorecer a cultura do milho, elevando a produtividade, especialmente quando o evento ocorre de forma intensa e coincide com a primavera e o início do verão, fases críticas do ciclo da cultura. A precipitação acumulada entre outubro e março está diretamente associada ao rendimento do milho, evidenciando a importância do monitoramento climático para o planejamento agrícola. Cunha (2001) reforça essa observação ao indicar que, durante eventos de El Niño, as culturas de primavera-verão, como soja e milho, tendem a ser beneficiadas pela maior disponibilidade hídrica. Por outro lado, em anos de La Niña, ocorrem déficits hídricos significativos, afetando negativamente o rendimento de grãos, especialmente nas regiões do Planalto Médio e da Campanha Gaúcha.

Contudo, nem todos os estudos apontam impactos significativos do ENOS sobre a produtividade. Matzenauer *et al.* (2018), ao analisarem séries históricas de rendimento de grãos de soja e milho no período de 1974/75 a 2016/17, não observaram diferença estatisticamente significativa entre os rendimentos médios durante anos de El Niño,

La Niña e condições neutras. Esses resultados sugerem que fatores como manejo agrícola, características edafoclimáticas e tecnologias utilizadas também têm papel determinante na produção, e que os efeitos do ENOS podem ser modulados localmente.

Ainda assim, a influência do ENOS sobre a disponibilidade hídrica é evidente. Cordeiro *et al.* (2018), ao avaliarem o Índice Hídrico Sazonal (IH) no RS entre 1979 e 2009, observaram que os valores de IH foram sistematicamente mais altos durante eventos de El Niño, e mais baixos em anos de La Niña, especialmente na primavera e no verão. A metade sul do estado, por sua vez, apresentou elevada frequência de $IH \leq 0,6$ (indicativo de deficiência hídrica) em dezembro e janeiro, representando risco agrônômico considerável para culturas não irrigadas.

Complementarmente, Pilau *et al.* (2022) demonstraram que os maiores volumes de chuva na fase reprodutiva da soja (acima de 800 mm) ocorreram apenas durante eventos de El Niño. A La Niña esteve associada aos maiores déficits hídricos e aos menores rendimentos em diversas localidades analisadas no estado. Isso reforça a importância de incorporar as previsões de ENOS no planejamento da produção agrícola, especialmente nas regiões com baixa capacidade de retenção de água no solo.

Por fim, a possibilidade de prever eventos de El Niño e La Niña com meses de antecedência constitui uma oportunidade para agricultores e gestores ajustarem o calendário agrícola, escolherem cultivares mais adaptadas e adotarem práticas de manejo hídrico preventivo. Como mostrado por Berlato & Fontana (2003) e por Podestá *et al.* (2002), o uso dessas previsões pode aumentar significativamente a eficiência dos sistemas produtivos e reduzir os riscos associados à variabilidade climática, contribuindo para a sustentabilidade da agricultura no Sul do Brasil.

3. Projeto de Pesquisa

Introdução

O estado do Rio Grande do Sul possui grande potencial agropecuário. Com ampla diversificação de cultivos, como soja, arroz, milho e trigo. Já a pecuária envolve a criação e venda de animais, tendo como principal objetivo a produção de carne de qualidade para o consumo humano. Para que esse potencial seja atingido, é necessário que os animais possuam uma alimentação equilibrada, com uma produção agrícola suficiente para atender a demanda alimentar, servindo como componente para elaboração das rações, o que demonstra a importância destas atividades andarem juntas.

Para o sustento dos animais, principalmente as aves, suínos e bovinos, é necessária a produção de matéria-prima para elaboração de alimentos nutricionalmente equilibrados que variam conforme espécie e fase de desenvolvimento. Sabe-se que o milho é um dos principais cereais utilizados para compor as rações, justificado por ser atóxico e possuir nutrientes favoráveis ao adequado crescimento e desenvolvimento. Além de compor as rações junto com outras fontes nutricionais desejáveis, ele pode ser oferecido nas formas in natura, moído ou seco. O que confirma a importância do cereal na agropecuária.

No Brasil, a principal matéria-prima para produção de bioetanol é a cana-de-açúcar, entretanto, apesar de não ser tão difundido nacionalmente, o milho também é utilizado como base para a produção do combustível. Este combustível tem tomado maior proporção por possuir baixa emissão de gases de efeito estufa (GEE), ser de origem natural e com custo de produção reduzido. Demonstrando a importância econômica da produção de milho para o estado.

O Rio Grande do Sul apresenta diversas áreas de terras baixas, principalmente com o cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.) irrigado, justificando a deficiência de drenagem dos solos, entretanto, apresenta limitações de cultivo milho. Conhecendo as limitações destas regiões com excessos hídricos, deficiências hídricas e irregularidade de chuvas somadas à alta intensidade de evapotranspiração da cultura em épocas de alta temperatura, observa-se a necessidade de irrigação suplementar. Com isso, percebe-se a importância da implantação de novas técnicas, do conhecimento do

balanço hídrico e das melhores épocas de semeadura nas regiões de terras baixas do Rio Grande do Sul.

O sistema sulco-camalhão, oferece alta produção e se trata de uma tecnologia de construção de uma zona com profundidade de solo sem haver compactação, o que se torna excelente para o desenvolvimento das raízes. Entre os camalhões, são formados sulcos, objetivando uma irrigação e drenagem adequadas que disponibilizem água de forma eficiente às plantas, além disso, é utilizado para o tráfego das máquinas, evitando assim, a compactação em zona radicular.

A demanda do milho para ração animal e consumo humano no estado do Rio Grande do Sul supera a sua produção, trazendo a necessidade da compra de milho de outras regiões fora do estado. Neste sentido, é necessário aumentar a produção local para atender o consumo, assim contribuindo para a economia do estado e visando um melhor aproveitamento das áreas com aptidão, resultando em aumento de rentabilidade produtiva e redução de risco.

Sabe-se que as terras baixas apresentam potencial para produção, entretanto, não se conhece o balanço hídrico e as melhores épocas de semeadura destas áreas para o cultivo do milho utilizando a tecnologia sulco-camalhão. Neste contexto, percebe-se a necessidade de mapear a disponibilidade hídrica para cultivo do milho nas áreas de terras baixas do RS.

Com isso, será possível dar suporte aos produtores do projeto Duas Safras, que engloba a EMBRAPA, Sistema Farsul e Associação Brasileira de Proteína Animal (ABPA) que firmaram parceria para fins de desenvolvimento agropecuário do Rio Grande do Sul a partir de 2021, objetivando o desenvolvimento socioeconômico do estado pela intensificação sustentável da produção agropecuária em duas safras. Sendo possível integrar a produção agrícola com a produção pecuária, indicando as áreas de menor risco e as melhores datas de semeadura do milho em terras baixas do estado.

Revisão de literatura

***Zea mays*: Botânica, Fenologia e morfologia**

O milho (*Zea mays*) é considerado um cereal de grande valor energético e nutricionalmente importante para saúde humana e alimentação dos animais, sendo um dos principais cultivos a nível mundial e nacional (Mapa, 2018). O cultivo do milho

é difundido pelo mundo, sendo uma importante cultura (Kandil *et al.*, 2020). Um fator de desta que é sua fonte de proteínas, amidos, carboidratos, fibras, vitaminas do complexo A e B, ferro, sais minerais, potássio, óleo, cálcio, fosfato, gordura, açúcares, celulose e calorias (Abimilho, 2019). Além de sua importância para alimentação animal, principalmente para aves e suínos. O cultivo de milho demonstra grande capacidade na produção de bioetanol (Lopes; Santos; Batistote, 2022).

Conforme Hanashiro *et al.* (2015) o milho é pertencente a ordem Poales da família Poaceae (graminea), sua sub-família é a Panicoideae, de gênero *Zea* e espécie *Zea mays*. A espécie *Zea mays* se caracteriza por apresentar florações unissexuais, distribuídas na mesma planta, ou seja, monóica com flores femininas, as espigas e flores masculinas, as panículas (Toledo, 1980).

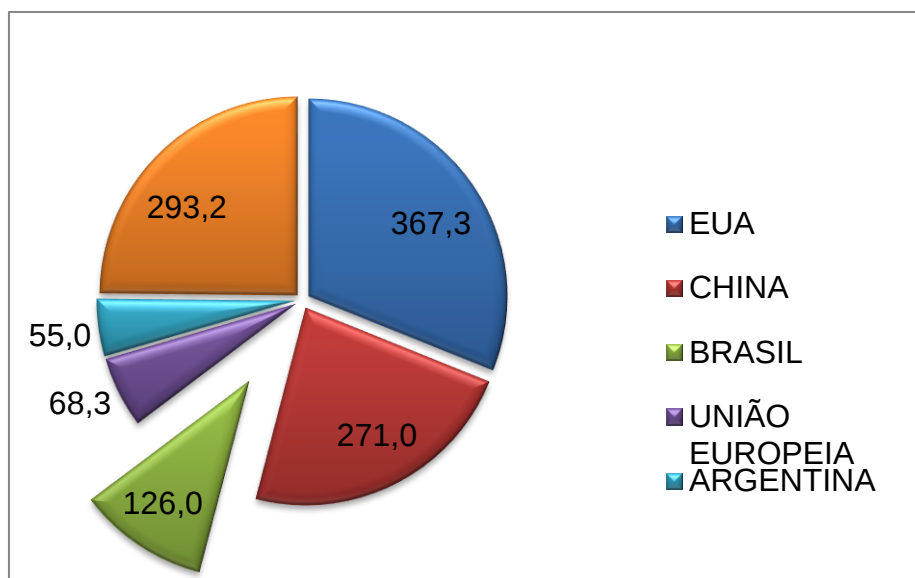
De acordo com Silva *et al.* (2021) o milho apresenta estágio vegetativo, que compreende subdivisões, iniciando na emergência (VE) e a partir da primeira folha (V1), sendo contabilizadas até a última folha emitida antecedente ao pendoamento (VT). Ainda de acordo com o estudo, as subdivisões dos estádios reprodutivos são o florescimento (R1), grão pastoso (R3), grão farináceo duro (R4) e a maturidade (R6). Nas fases vegetativas e reprodutivas, a cultura demonstra tolerância à deficiência hídrica, entretanto, quando submetidas a estresse hídrico na floração, apresentam menor rendimento de grãos, podendo chegar a 50%, provocando dessecação de estigma (Campos *et al.*, 2021).

De 12 até 36 horas após ocorrência de polinização, ocorre o processo de fertilização do milho, sendo que após 60 dias, o desenvolvimento do grão é completado (Silva *et al.*, 2021). Segundo Bresolin e Pons (1983) 5% do grão é composto pela camada externa, o pericarpo, 10% do grão é composto por embrião e os 85% restantes pelo endosperma, onde se localizam os grânulos de amido.

Produção de milho

A China lidera o ranking de importação desde a safra 2020, ficando como segundo maior produtor e consumidor de milho mundial, sendo aproximadamente 80% destinado à alimentação animal. Já em exportação, o Estados Unidos lidera, seguido do Brasil e Argentina (Coêlho, 2021). De acordo com a USDA (2022), a expectativa para safra mundial 2022/23 é de 310,45 milhões de toneladas, destes, 126 milhões de toneladas produzidas no Brasil, o que corresponde a 11% de participação (Figura 1).

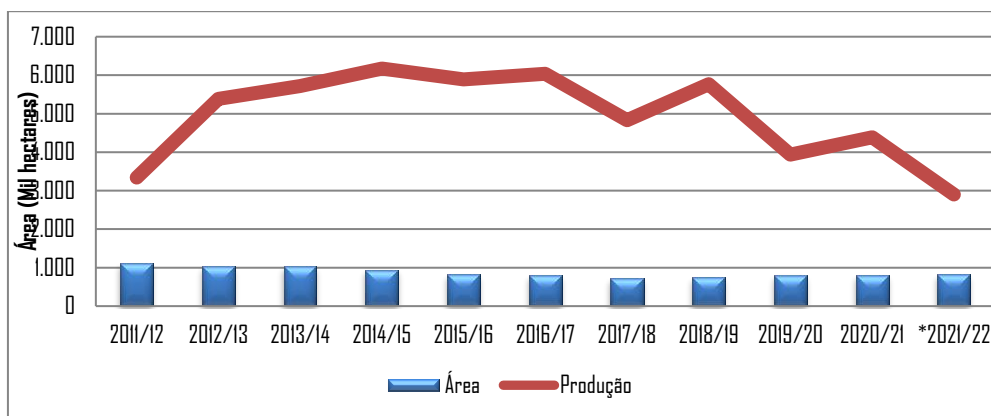
Figura 1. Expectativa da safra de milho 2022/23 pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos em milhões de toneladas por hectare. Fonte: USDA, 2022.



O Brasil é o terceiro produtor mundial de milho (Usda, 2021). Os principais estados produtores são o Mato Grosso, Paraná e Mato Grosso do Sul (Conab, 2022). Ainda de acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento, a estimativa da produtividade nas diferentes regiões brasileiras, na safra de 2020/21, apresentou variação de 2.461 a 5.697 kg por hectare. Essa variação é explicada pela redução da produtividade em decorrência do vasto cultivo de milho em distintas regiões do país, diferentes épocas, deficiência de nutrientes e suscetibilidade às doenças (Rios; Santos; Buso).

No Rio Grande do Sul a safra 2021/22 demonstrou um aumento de 2,8% em área de produção quando comparada com a safra anterior, entretanto, a produção caiu 32% em decorrência da seca ocorrida no estado (Conab, 2022). Conforme os dados consultados, a produção no estado vem apresentando uma tendência de queda, enquanto a área demonstra discreto crescimento (Figura 2).

Figura 2. Área e produção histórica de milho plantada em hectares no estado do Rio Grande do Sul de 2010/11 a 2020/21.Fonte: CONAB.



Apesar das reduções na produção que o milho vem apresentando nos últimos anos, o mesmo demonstra tendência de expansão de cultivo, em decorrência do aumento na demanda de milho para alimentação animal e produção de combustível etanol (Campos *et al.*, 2021). Para que isso ocorra, é necessária a adequação de manejos tecnológicos de produção para solucionar as problemáticas do cultivo do milho, que é uma cultura de sequeiro.

Solos de terras baixas e o consumo hídrico do milho

Se estima que as terras baixas do Rio Grande do Sul possuem uma área próximo a 4 milhões de hectares, sendo estas, com relevo predominantemente plano, com pouca profundidade de solo devido a uma camada adensada situada entre 30 cm e 50 cm de profundidade. Conforme Pinto, Miguel e Pauletto (2017) os solos de terras baixas são classificados em Organossolos (0,9%), Vertissolos (1,3%), Argissolos (3,9%), Gleissolos (7,3%), Chernossolos (15,1%), Neossolos (17,2%) e os Planossolos, que inclui Gleissolos associados e são de maior proporção (54,3%).

Além disso, o clima das regiões de terras baixas apresenta verões secos, entretanto, períodos de grande intensidade de chuva, proporcionando às plantas estresses pela deficiência e pelo excesso de água (Campos *et al.*, 2021).

Por apresentarem solos rasos com baixa capacidade de armazenar água,

deficientes em drenar a água da chuva, produtores procuram alternativas para cultivos nas regiões de terras baixas (Centeno; Parfitt, 2022). O milho é muito eficiente quanto ao uso da água para produzir matéria seca, consumindo em torno de 500 mm a 800 mm de água em período de cultivo (aproximadamente 130 dias) com evapotranspiração máxima de 571 mm quando semeados em setembro, 577 mm quando semeado em outubro e 544 mm quando semeados em novembro, ao decorrer do ciclo total (Campos *et al.*, 2021).

Sistema sulco-camalhão

Conforme Centeno e Parfitt (2022) o sistema sulco-camalhão consiste na construção de camalhão, uma zona de cultivo com maior profundidade sem a presença de compactação que permite um desenvolvimento radicular adequado, e junto ao camalhão o sulco que é utilizado na irrigação, auxilia na drenagem e permite o tráfego controlado de máquinas.

Está técnica já vem sendo utilizada há alguns anos no Rio Grande do Sul, algumas vezes não obtendo sucesso, motivado por não ser associada à suavização dos relevos das áreas de plantio (Campos *et al.*, 2021). Para utilizar este sistema é necessária a adoção de operações com uma excelente execução, assim obtendo sucesso na lavoura, sendo a suavização uma das práticas mais importantes, afinal, é o primeiro passo, que consiste na sistematização com declividade variada, que quando comparada com a sistematização convencional, se sobrepõe por uma menor movimentação da quantidade de solo, conseqüentemente, menor degradação do perfil, sendo uma operação rápida e econômica (Centeno; Parfitt, 2022).

Neste sistema procura-se a mínima declividade, normalmente ficando entre 0,05% e 0,1%. Sabendo que este manejo provoca a compactação do solo, observa-se a necessidade da escarificação ou preparo profundo de solo. Pensando em qualidade destes solos, é necessária a correção e fertilização para uma boa produtividade, à expectativa é que fique em torno de 12 toneladas por hectare para o milho semeado em setembro (Centeno & Parfitt, 2022). A utilização de politubos também tem sido uma prática positiva, pois permite uma eficiência de irrigação com baixo custo, tornando viável que esta cultura atinja elevada produtividade, eliminando quase completamente o estresse hídrico (Campos *et al.*, 2021).

Conhecendo a textura do solo e levantamento planialtimétrico, é possível utilizar softwares específicos para elaboração dos projetos que determinam a melhor vazão,

duração da irrigação, comprimento dos sulcos e diâmetro dos furos no politubo calculado a fim de uniformizar a taxa de infiltração, ou seja, que a água chegue ao final dos sulcos concomitantemente (Centeno & Parfitt, 2022). Ainda conforme autores, em estudo de diferentes regiões de terras baixas no Rio grande do Sul, o município de Dom Pedrito, na safra de 2021/22 atingiu o maior valor, de 170 sacas por hectare e a expectativa é chegar a 180 a 200 sacas por hectare nas áreas estudadas, mudando a realidade deste setor e podendo transformar o Rio Grande do Sul em um estado exportador de milho. A tecnologia sulco-camalhão associada à suavização, permite melhora nas condições de drenagem superficial, também possibilita a irrigação por superfície a baixo custo (Centeno & Parfitt, 2022).

Balanço Hídrico

O balanço hídrico é caracterizado pela soma das quantidades de águas que entram e que saem de um dado volume de solo em um determinado período, resultando na água que permanece no solo (Richard; Timm, 2012).

Para realizar o balanço, é necessário, portanto, registrar as entradas e saídas de água no solo, seja por precipitação pluvial ou irrigação, pela infiltração na superfície do solo, já as saídas, pela drenagem interna, evapotranspiração e o deflúvio superficial, em um dado volume de solo, baseando-se na constituição das raízes das plantas, em um período de tempo (Libardi, 1995). Ainda de acordo com o autor, o saldo é variável, pois, se a quantidade de água que entra em determinado período de tempo for maior que a quantidade que sai, durante este mesmo período, o saldo será positivo, entretanto, se a quantidade de água que entra for menor que a quantidade que sai, será negativo, os quais serão mensurados pela variação de armazenamento da água no perfil de solo no tempo estudado.

Para descrever o comportamento físico-hídrico dos solos, utiliza-se uma importante ferramenta, chamada curva de retenção de água (CRA). De acordo com Nascimento (2009) essa curva é muito importante na agricultura, isso porque, ela demonstra os limites da saturação, da umidade residual e do total de água disponível no solo. Este parâmetro, juntamente com outros atributos, permite a determinação do melhor momento e quantidade de água na irrigação.

Gava *et al.* (2016), citam que ao realizar projetos com o uso de irrigação, é necessária a utilização de componentes adequados para área em que a cultura é semeada, considerando a evapotranspiração, uma indispensável variável para

estimar a necessidade de água pela cultura.

O cultivo do milho demonstra uma considerável sensibilidade ao déficit hídrico, resultando em uma regressão do crescimento e desenvolvimento, por consequência, afetando a produtividade dos grãos (Silva *et al.*, 2019). De acordo com Bergamaschi *et al.* (2006) pode ocorrer redução de produtividade do milho mesmo em anos com climas ideais, isso porque, existem dois períodos de muita sensibilidade, sendo eles, o pendoamento e o espigamento. Neste sentido, buscam-se tecnologias de irrigação para impulsionar a produção e qualidade, contribuindo na redução dos riscos que a cultura é submetida, principalmente quando não ocorrem chuvas, ou sua distribuição é ineficiente para o suprimento da necessidade hídrica (Conceição *et al.*, 2021; Tesrezlaf, 2017).

Hipóteses

- I. Devido à baixa disponibilidade hídrica, em todas as regiões de terras baixas do Rio Grande do Sul o cultivo de milho deverá ser irrigado.
- II. A melhor época de semeadura do milho em terras baixas será variável conforme região.

Objetivos

Geral

Quantificar a necessidade hídrica do milho cultivado no sistema sulco-camalhão nas terras baixas do RS em função da época de semeadura.

Específicos

- I. Realizar o balanço hídrico para cultura do milho nas principais regiões de terras baixas do Rio Grande do Sul.
- II. Estimar os valores de evapotranspiração da cultura (ET_c) do milho para diferentes épocas de semeadura em regiões de terras baixas do Rio Grande do Sul.
- III. Avaliar os valores médios acumulados de precipitação pluvial para o ciclo do milho com diferentes épocas de semeadura.

Material e métodos

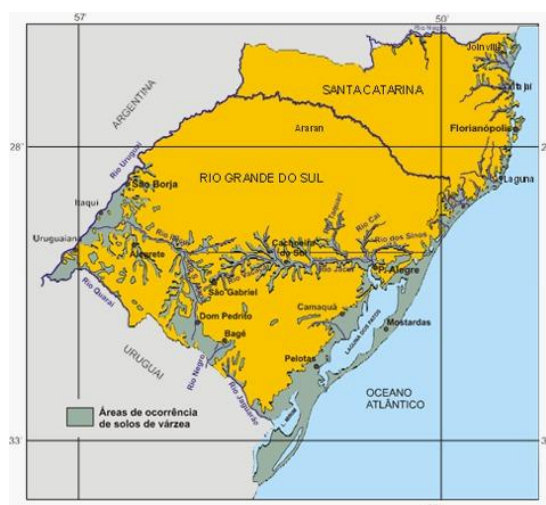
Serão realizados estudos de balanço hídrico em solos de terras baixas, distribuídos em diferentes regiões produtivas do estado. Para realização do balanço hídrico serão simuladas 10 datas de semeadura do milho, desde 15 de agosto até 30 de dezembro, de 2012 até 2022 nos principais solos dentro de cada região.

Os valores de CAD para os solos mais representativos de cada região serão determinados a partir dos dados já disponíveis na literatura por Beltrame e Louzada (1996). Se necessário complementar as informações, serão realizados amostragens e determinadas as curvas de retenção de água no solo no laboratório de Física do Solo da UFPel.

Os dados climáticos de precipitação pluvial (P) e evapotranspiração de referência (Eto) serão obtidos das estações climatológicas convencionais cujos dados estão disponíveis gratuitamente nos portais do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Serão utilizadas séries históricas de precipitação pluvial e evapotranspiração com no mínimo 10 anos de dados.

No intuito de representar as regiões de solos de terras baixas do RS (Figura 3), serão utilizadas as estações localizadas nos municípios: Bagé, Pelotas, Porto Alegre, Rio Grande, Santa Maria, Santana do Livramento, Santa Vitória do Palmar, São Luiz Gonzaga, Torres, Uruguaiana.

Figura 3. Solos de terras baixas no Rio Grande do Sul e Santa Catarina (adaptado de IBGE, 1986 e Santa Catarina, 1986). Fonte: Pinto; Laus Neto; Pauletto (2004).



A variação de armazenamento ΔARM segue o modelo de Thornthwaite e Mather (1955), simplificado por Pereira *et al.* (1997), levado em consideração os seguintes componentes do Balanço Hídrico (Equação 1).

$$\Delta ARM = P + I - Etc \quad (1)$$

Onde, ΔARM é variação do armazenamento de água no solo (mm); P é precipitação (mm); I é irrigação (mm) e Etc é evapotranspiração da cultura (mm dia⁻¹). O ARM inicial foi calculado a partir da capacidade de água disponível do solo (CAD) (Equação 2).

$$CAD = (\theta_{CC} - \theta_{PMP}) \times Z \quad (2)$$

Em que, CAD é a capacidade de água disponível do solo (mm); θ_{CC} é a umidade do solo na Capacidade de Campo (cm³.cm⁻³); θ_{PMP} é a umidade do solo no Ponto de Murcha Permanente (cm³.cm⁻³) e Z é a profundidade efetiva do sistema radicular (mm), neste caso, para solos de terras baixas, considerou-se 300 mm, conforme indicado (Parfitt; Pinto; Timm, 2014).

O ARM foi determinado a partir das seguintes premissas:

Se $ARM_{i-1} + \Delta ARM > CAD$; então $ARM = CAD$, pois neste caso haverá excesso de água, ocorrendo escoamento superficial, pois o solo não pode armazenar mais do que sua capacidade.

Se $ARM_{i-1} + \Delta ARM < 0$; então $ARM = 0$

Se $0 < ARM_{i-1} + \Delta ARM < CAD$; então $ARM = ARM_{i-1} + \Delta ARM$

Se $ARM_{i-1} + \Delta ARM < CAD_{10\%}$ e estágio Vegetativo; $ARM_{crítico}$

Se $ARM_{i-1} + \Delta ARM < CAD_{20\%}$ e estágio Reprodutivo; $ARM_{crítico}$

O Coeficiente de cultivo (Kc) será utilizado o encontrado na literatura regional, neste caso, o adaptado de Radin *et al.* (2003), obtido através de estudo realizado por quatro anos em Eldorado do Sul, RS. Para o cálculo de evapotranspiração da cultura (Etc), será utilizado o método proposto por Allen *et al.* (1998) conforme equação 3.

$$Etc = ETo \cdot Kc \quad (3)$$

Onde, Etc é a evapotranspiração da cultura (mm dia⁻¹); ETo é a evapotranspiração de referência (mm dia⁻¹) e Kc é o coeficiente da cultura.

$$Kc_{milho} = -0,000157DAS^2 + 0,0241DAS + 0,421$$

(4)

Onde, DAS é dias após a semeadura.

Para análise dos dados serão elaborados mapas com os valores de déficit hídrico para cultivo de milho em cada época de semeadura nas regiões de terras baixas do

RS. Os mapas serão obtidos por interpolação utilizando-se a metodologia do inverso do quadrado da distância e software QGIS.

Metas

- I. Zonear a necessidade hídrica da cultura do milho para distintas épocas de semeadura em diferentes regiões de terras baixas do Rio Grande do Sul.
- II. Indicar a evapotranspiração da cultura do milho semeado em diferentes épocas em região de terras baixas do Rio Grande do Sul.
- III. Indicar a disponibilidade de água para o cultivo de milho em distintas épocas de semeadura nas diferentes regiões de terras baixas do Rio Grande do Sul.
- IV. Produzir e submeter no mínimo dois artigos científicos em revistas com Qualis Capes igual ou superior à A3.
- V. Publicar trabalhos em eventos (congresso Nacional de Milho e Sorgo, Congresso Brasileiro de Ciência do Solo e Congresso Latino Americano de Ciência d Solo).

Impactos esperados

Impactos econômicos

O cultivo de milho é alternativo de renda para produtores das regiões de terras baixas do Rio Grande do Sul, objetivando o aumento produtivo do milho no estado para atender a demanda interna.

Impactos sociais

Disponibilizar informações referentes à necessidade de água para o cultivo de milho em terras baixas do Rio Grande do Sul, indicando a pesquisadores, técnicos e produtores regiões aptas ao cultivo, bem como a necessidade de irrigação para a cultura.

Impactos ambientais

Identificar as regiões de terras baixas do estado do Rio Grande do Sul onde a cultura do milho na tecnologia sulco-camalhão pode ser explorada com maior eficiência.

Orçamento Global

Rubrica	Valores totais
Material de consumo	R\$500.00
Passagens e diárias	R\$2.285.80
Material permanente	R\$2.969.10
Total Geral	R\$5.754.90

Divulgação dos resultados

Os resultados serão divulgados internamente na UFPel em formato de Tese de doutorado e externamente em resumos de congressos e artigos científicos em revistas com Qualis Capes igual ou superior à A3.

Cronograma de atividades

Atividades	Ano/Trimestre						
	2022/	2023/	2023/	2024/	2024/	2025/	2025/
	2	1	2	1	2	1	2
Disciplinas	X	X	X	X	X	X	
Elaboração do projeto	X						
Planejamento das coletas	X						
Defesa do Pré Projeto de pesquisa	X						
Levantamento de variáveis climatológicas	X	X	X				
Análise dos dados	X	X	X	X			
Resultados preliminares	X	X	X	X			
Qualificação						X	
Resultados finais				X	X	X	X
Elaboração da Tese					X	X	X
Elaboração e submissão de artigos científicos						X	X
Defesa da Tese							X

Equipe

Thayse do Amaral Aires, Engenheira Agrônoma. Doutoranda do programa de pós graduação de Manejo e Conservação do Solo e da Água na UFPel.

Lizete Stumpf, Engenheira Agrônoma, Docente e Doutora em Agronomia, área de concentração em solos pela Universidade Federal de Pelotas – UFPel.

José Maria Barbat Parfitt, Engenheiro Agrícola, Doutor em Agronomia na Universidade Federal de Pelotas – UFPel. Pesquisador da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA, estação Terras Baixas.

Marília Alves Brito Pinto, Engenheira Agrônoma. Doutora em Agronomia na Universidade Federal de Pelotas– UFPel. Pós- Doutoranda no PPG Recursos Hídricos UFPel.

Leticia Burkert Mélo-Araujo, Engenheira Agrícola, Doutoranda pelo programa de pós graduação em Recursos Hídricos na Universidade Federal de Pelotas– UFPel.

4. Relatório do trabalho de campo

Todo o trabalho de levantamento foi conduzido de forma remota, a partir da análise detalhada de dados disponíveis em bases oficiais e publicações científicas. O objetivo foi compreender a dinâmica da demanda e da deficiência hídrica do milho (*Zea mays*) nas terras baixas do Rio Grande do Sul, considerando diferentes épocas de semeadura e condições climáticas associadas ao ENOS (El Niño, La Niña e anos Neutros).

Objetivos do levantamento remoto

- I. Obter dados meteorológicos históricos (temperatura, precipitação, evapotranspiração de referência) para simulações de balanço hídrico;
- II. Identificar os períodos críticos para a semeadura de milho com base em séries históricas de temperatura mínima;
- III. Levantar informações sobre as características físicas dos solos das terras baixas;
- IV. Mapear espacialmente a demanda e deficiência hídrica simulada com apoio de softwares de geoprocessamento.

Fontes de dados

Os dados utilizados neste estudo foram obtidos exclusivamente de fontes públicas e literatura científica, entre elas:

- I. Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), para dados diários de temperatura máxima, mínima, precipitação e ETo, no período de 2000 a 2024;
- II. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), para classificação dos anos como El Niño, La Niña ou Neutros;
- III. Banco de dados de solos de publicações da EMBRAPA e IRGA;
- IV. Trabalhos científicos recentes sobre o cultivo de milho em terras baixas e manejo hídrico, incluindo estudos de Villa *et al.* (2023, 2024), Soares, Paço e Rolim (2023), entre outros;
- V. Modelos de balanço hídrico adaptados para condições de terras baixas, conforme Mélló-Araujo (2023) e Pereira *et al.* (1997).

Atividades desenvolvidas

- I. Download, organização e filtragem de dados meteorológicos diários de 10 municípios: Bagé, Pelotas, Porto Alegre, Rio Grande, Santa Maria, Santana do Livramento, Santa Vitória do Palmar, São Borja, Torres e Uruguaiana;
- II. Simulações da demanda hídrica com base em ETo e Kc variável, conforme Allen *et al.* (1998) e Radin *et al.* (2003);
- III. Simulações do balanço hídrico diário para cálculo da deficiência hídrica e número de irrigações, utilizando o modelo adaptado de Thornthwaite & Mather (1955);
- IV. Classificação dos períodos críticos de semeadura com base em séries de temperatura mínima e suavização por regressão Loess;
- V. Construção de gráficos e mapas temáticos com auxílio dos softwares R (versão 4.4.1) e QGIS, representando a distribuição espaço-temporal da demanda hídrica nas condições simuladas.

Considerações finais

O levantamento remoto realizado proporcionou uma visão abrangente e tecnicamente fundamentada sobre a dinâmica hídrica do milho nas terras baixas do Rio Grande do Sul. O uso de dados de qualidade, aliado a métodos robustos de simulação e análise estatística, garantiu confiabilidade aos resultados obtidos. Este processo demonstrou a viabilidade de estudos climáticos e hidrológicos sem a necessidade de deslocamento a campo, desde que amparados por dados consistentes e ferramentas adequadas de análise.

5. Artigo 1

El Niño, La Niña, and Water Demand of Corn Crops in Lowlands of Rio Grande do Sul – Part 1

ABSTRACT

This study aimed to determine the water demand of a medium-cycle maize cultivar grown in the lowlands of Rio Grande do Sul and to analyze the influence of El Niño and La Niña climatic phenomena on this demand, considering different sowing dates. The research was conducted in ten representative municipalities of the region, using historical climatic data series, reference evapotranspiration (ET_o), and crop coefficient (K_c) values that varied throughout the crop cycle. Based on climatic data and the growing degree unit (GDU) requirement of the maize cultivar used, the crop cycle was calculated for all sowing dates. Critical sowing periods were identified based on minimum air temperature. Statistical analyses using Loess regression with 95% confidence intervals were applied to interpret the influence of climatic year types (Neutral, El Niño, La Niña) on water demand. Results showed that the water demand of a medium-cycle maize cultivar varied according to both sowing dates and climatic events. Values ranged from approximately 600 mm to 1000 mm, with the highest observed during La Niña years in Bagé and Santana do Livramento, intermediate values in municipalities such as São Borja, Uruguaiana, Santa Maria, and Santa Vitória do Palmar, and the lowest in coastal regions. An exception was Santa Vitória do Palmar, which presented an intermediate value. El Niño and La Niña climatic phenomena influence maize water demand: El Niño years tend to have lower demand, while La Niña years result in higher demand, using Neutral years as reference. An exception to this pattern was observed in the municipality of Torres.

Keywords: Agroclicmatic zoning; ENSO; *Zea mays*.

1. Introduction

The importance of maize (*Zea mays* L.) in the productive matrix of Rio Grande do Sul, whether as food, animal feed or industrial input, underscores the need for a deeper understanding of the climatic factors that constrain its performance in edaphoclimatically limiting environments. The state's lowlands, which cover over 5 million hectares and include the coastal plains and the riverine plains of the Central Depression and Western Frontier, are

characterized by soils with low permeability, poor drainage, and high sensitivity to variations in the water regime (Petry et al., 2021). Maize, in turn, has a high water demand and is particularly sensitive to both water deficit and excess.

Recent studies, such as Villa et al. (2024), which investigated maize irrigation requirements based on soil water balance in different regions of Rio Grande do Sul, highlight the decisive influence of sowing date on irrigation demand. Although that study simulated only two sowing dates (October 5 and October 20), its results indicate the need for broader analyses encompassing a greater range of sowing dates, especially in lowland areas where water management is even more challenging.

In southern Brazil, interannual climate variability driven by large-scale phenomena such as El Niño and La Niña plays a central role in modulating hydrometeorological patterns. These events directly affect rainfall regimes, air temperature, relative humidity, and other climatic elements essential for crop development (Ropelewski & Halpert, 1987; Pilau et al., 2022).

During El Niño episodes, increased rainfall is observed in southern Brazil, especially in spring and summer, which can cause soil water saturation, root anoxia, nutrient leaching, and consequently hinder maize phenological development (Ropelewski & Halpert, 1987). In contrast, La Niña years are marked by a tendency towards reduced rainfall, coupled with increased solar radiation and temperatures, resulting in severe water deficits, particularly during critical growth stages such as flowering and grain filling. These adverse conditions directly impact soil water balance, crop water consumption, and ultimately agricultural productivity (Sah et al., 2020).

Additionally, water deficiency during critical development phases can compromise essential physiological processes, affecting transpiration, biomass accumulation, and final yield (Cui et al., 2024). Despite the relevance of this topic, regional assessments integrating agrometeorological data, water balance, and maize phenological behavior under different El Niño-Southern Oscillation (ENSO) regimes remain scarce.

This scientific gap compromises farmers' adaptive capacity to extreme climatic events, especially in lowland areas with high microclimatic variability. Considering that agriculture accounts for approximately 70% of global freshwater withdrawals and that demand for this resource is projected to increase by 2050 (Aslam et al., 2025), it is urgent to develop regional studies to support agricultural planning and the adoption of more resilient practices.

In this context, the present study aims to determine the water demand of a medium-cycle maize cultivar grown in the lowlands of Rio Grande do Sul, as well as to assess the influence

of El Niño and La Niña phenomena on this demand, considering its magnitude and sowing date. The goal is to provide technical and scientific support to improve water management and strengthen the resilience of production systems in the face of climatic adversities.

2. Material and Methods

This study was conducted in the lowland region of Rio Grande do Sul (Figure 1), which covers approximately 5.4 million hectares distributed across the state's coastal zone, Western Frontier, and the river basins of the Ibicuí, Jacuí, and Negro rivers (IBGE, 2013). The region has a humid subtropical climate, classified according to Köppen-Geiger as Cfa and Cfb, characterized by hot summers and cold winters, with well-distributed rainfall throughout the year. Climatic data were collected from 10 municipalities in this region that had historical series equal to or longer than 10 years.

For each municipality studied, sowing dates on the 1st and 15th of each month throughout the year were considered. However, dates falling within periods with unfavorable temperatures for germination were excluded; these intervals were defined as “critical sowing periods.”

The definition of critical periods was based on the minimum soil temperature required for maize germination, established at 10 °C by Barros & Calado (2014). Considering the strong correlation between soil temperature and minimum air temperature, and the absence of historical soil temperature data, it was assumed that when the minimum air temperature was below 10 °C, the soil temperature would also be below this threshold, preventing germination.

To identify the critical periods in each municipality, daily minimum air temperature time series data were used and smoothed by the Loess method (Cleveland & Devlin, 1988) in R 4.4.1 (R Core Team, 2023), with a 5% confidence interval. The beginning and end of the critical periods were defined as the points where the lower limit of the smoothed curve intersects the 10 °C line, determined analytically via R scripts.

Additionally, the period between sowing and maize emergence was considered to be six days (Barros & Calado, 2014). Thus, sowing dates resulting in minimum temperatures below 10 °C during these six days were excluded for being within the critical period. Sowing dates were also disregarded if the maize cycle extended into the next critical sowing period. Therefore, the end of the season was set to June 30 to prevent the end of one crop from interfering with the start of the next.

The classification of years as Neutral, El Niño, or La Niña was based on data from NOAA (2025), considering only events in which at least 30% of the reproductive phase coincided with the phenomenon. NOAA defines anomalies in the mean Pacific Ocean surface temperature relative to climatological reference values for each quarter. When this average remains above +0.5 °C for at least five consecutive quarters, it characterizes an El Niño event; values below -0.5 °C over the same period indicate La Niña; and anomalies between -0.5 °C and +0.5 °C are classified as neutral conditions. To confirm a typical El Niño event, the ASO (August, September, and October) quarter anomaly must consistently exceed +0.5 °C.

Reference evapotranspiration (ET_o) data were obtained from the National Institute of Meteorology (INMET) for the period 2000 to 2024. INMET calculates ET_o using the Penman-Monteith, and only years with complete meteorological data were considered.

In this study, the phenological cycle of the Pioneer® P3016VYHR cultivar (Pioneer, 2025) was used as representative of a medium-cycle maize hybrid. The cycle was simulated for all sowing dates based on Growing Degree Units (GDU), considering 1498 GDU from emergence to physiological maturity (Pioneer, 2025).

$GDU = (T_{max} + T_{min}) / 2 - T_{base}$, being $T_{base} = 10\text{ °C}$ (Kiniry, 1991).

The crop water demand, also referred to as crop evapotranspiration (ET_c), was estimated using the equation: $ET_c = ET_o \times K_c$ according to Allen et al. (1998), using crop coefficient (K_c) adapted by Radin et al. (2003):

$K_c = -0.000157 \times DAS^2 + 0.0241 \times DAS + 0.421$ being DAS the days after sowing.

Based on the daily water demand values, the total water demand was calculated for each municipality and sowing date. Subsequently, the data were categorized according to the type of year: Neutral, El Niño, or La Niña.

To evaluate the behavior of water demand in relation to the possible sowing dates for each municipality, a local regression (Loess) was applied with a 5% confidence interval. This method allowed for assessing whether El Niño or La Niña climatic events differed from Neutral years, from each other, or estimating the approximate percentage difference in cases where the confidence intervals partially or fully overlapped.

To visualize the spatial distribution of water demand for medium-cycle maize, maps were created using QGIS software, employing the IDW (*Inverse Distance Weighted*) interpolation method (Qgis development team, 2025).. The interpolation was based on data from ten weather stations located in the lowlands region.

3. Results and Discussion

3.1 Determination of the critical period

Figure 2 shows the curves of average minimum air temperatures for two of the ten analyzed municipalities in Rio Grande do Sul: Porto Alegre and Santa Vitória do Palmar. In Porto Alegre, the curve and confidence interval for minimum temperature remain above the 10 °C threshold throughout the year, indicating no thermal restrictions for maize germination. This allows sowing to be carried out at any time of the year, enabling a continuous cycle.

In contrast, in Santa Vitória do Palmar, the minimum temperature curve intersects the critical threshold of 10 °C between days 152 and 244 of the year, corresponding approximately to the period from June 1st to September 1st. This interval was defined as the “critical period” during which sowing is unfeasible due to insufficient thermal conditions for seed germination. The critical periods for the other municipalities included in this study are presented in Table 1.

Table 1. Critical periods and sowing dates for a medium-cycle maize cultivar in the lowland municipalities of Rio Grande do Sul.

Municipality	Critical period	Sowing dates
Torres	- -	01/07 - 01/02
Porto Alegre	- -	01/07 - 15/02
Pelotas	15/06 - 15/08	15/09 - 01/02
Rio Grande	- -	01/07 - 01/02
Santa Vitória do Palmar	01/06 - 01/09	15/09 - 15/01
Bagé	01/06 - 01/09	15/09 - 15/01
Santana do Livramento	01/06 - 01/09	15/09 - 01/02
Santa Maria	15/06 - 15/08	01/09 - 01/02
Uruguaiana	15/06 - 01/08	15/08 - 01/02
São Borja	- -	01/07 - 15/02

The comparison between these two municipalities illustrates how latitude and local climatic patterns directly influence safe sowing windows. In regions like Santa Vitória do Palmar, more careful agricultural planning becomes essential to avoid losses due to poor germination. These findings reinforce the importance of using historical temperature series combined with smoothing techniques as tools to support agroclimatic zoning.

According to Waqas et al. (2021), although maize originated in subtropical regions, its production has expanded into temperate areas. In these environments, farmers often adopt early sowing as a strategy to avoid thermal stress during the reproductive phase. However, such anticipation exposes seedlings to reduced soil temperatures, often below 10 °C, precisely during the critical establishment period. At this stage, soil temperature strongly influences leaf growth, as the apical meristem is close to the soil surface. Furthermore, according to the authors, mitigating the impacts of extreme temperatures on maize requires an integrated set of approaches, including adaptations in agronomic practices, advances in breeding for the selection of more tolerant cultivars, and deeper understanding of the genetic, physiological, and molecular responses to thermal extremes.

3.2 Water demand

Regarding the effect of El Niño-Southern Oscillation (ENSO) year types, which reflect both local climatic conditions and global climate phenomena, it was observed, as expected, that in La Niña years there is greater water demand, while in El Niño years the demand is lower. This pattern is explained by the fact that historical average temperatures tend to be higher during La Niña years (Ropelewski & Halpert, 1987).

However, in some municipalities this effect was not observed, with water demand showing similar magnitudes across Neutral, El Niño, and La Niña years, as seen in Rio Grande and Santa Maria. Neutral years generally present intermediate values between the two climatic extremes, but with significant variation depending on the municipality's location and sowing date. In Torres, this pattern is reversed, likely due to the strong maritime influence in the region.

According to Villa et al. (2024), in their sowing simulations, the lowest crop evapotranspiration (ET_c) value was recorded on October 20th in the coastal municipality of Torres, as 463 mm. This variation in ET_c reflects the influence of meteorological factors, soil properties, specific characteristics of each crop, and different plant phenological development stages.

It was also observed that, in general, water demand decreases as the sowing date approaches the end of the feasible period (Figure 3). This is because, for sowings in September and October, most of the crop cycle develops during the hottest months – December, January, and February – under Southern Brazil conditions. A study conducted from 1945 to 1975 in 43 locations in Rio Grande do Sul concluded that agroclimatic

suitability for maize, based on indices such as growing degree days and water deficiency, varies according to sowing dates and regions (Berlato et al., 1986).

Sowing at later dates (December to February) reduced water demand across all municipalities and ENSO year types. However, this reduction is accompanied by greater climatic uncertainties and agronomic risks, such as lower thermal accumulation, reduced yield, and potential risk of frost during late growth stages. Results from Tang et al. (2024), in the study *Assessment of the Influence of Planting Dates on Sustainable Maize Production under Water Stress Conditions*, indicate that earlier sowing dates lead to higher grain and biomass yields compared to later sowing dates.

The variation range (shaded areas in the graphs) was greater in São Borja, Uruguaiana, and Santa Maria, indicating higher interannual variability in water demand, meaning maize in these locations is more susceptible to year-to-year climatic fluctuations. Villa (2024) and Villa (2023) reported wide ranges of evapotranspiration and ETo deficit in regions such as Encosta do Nordeste and Serra do Sudeste. Conversely, municipalities like Santa Vitória do Palmar and Pelotas showed narrower variation ranges, suggesting lower interannual variability. Villa (2023) also indicated that the Litoral and Depressão Central regions have lower water requirements.

Figure 4 presents interpolated maps of water demand for the 10 municipalities studied in the lowlands of Rio Grande do Sul. Three sowing dates were selected, spaced 45 days apart, with water demand values available for all municipalities. These maps clearly show that water demand is more affected during La Niña years, while in Neutral years demand is slightly higher than in El Niño years, though the difference is small. This finding aligns with Berlato, Farenzena, and Fontana (2023), who analyzed historical maize yield and precipitation series in RS, identifying that La Niña years often result in low yields due to below-average rainfall, whereas El Niño years tend to favor maize cultivation, allowing higher productivity.

Considering the sowing dates of September 15, November 1, and December 15, average reductions in water demand during El Niño years relative to Neutral years were 2%, 7%, and 15%, respectively. This pattern agrees with Embrapa (2009), which reports greater regularity and volume of rainfall in southern Brazil during El Niño years, especially from spring to early summer, reducing the need for supplementary irrigation. For September 15, the greatest reductions occurred in Uruguaiana and Pelotas, remaining similar in Rio Grande, Santa Vitória do Palmar, Santa Maria, and São Borja. On November 1, the largest reductions were in Santana do Livramento, Uruguaiana, and Pelotas, with similar results in Rio Grande, Santa Vitória do Palmar, São Borja, and Porto Alegre. For December 15, Porto Alegre, Uruguaiana,

Santana do Livramento, and São Borja showed the greatest reductions, with similar values in Santa Vitória do Palmar, Bagé, and Santa Maria.

For these same dates, average increases in water demand during La Niña years relative to Neutral years were 34%, 33%, and 14%, respectively. On September 15, the largest increases occurred in São Borja, Santana do Livramento, and Bagé, remaining similar in Porto Alegre and Pelotas. On November 1, São Borja, Torres, Santana do Livramento, and Uruguaiana showed the greatest increases, with similar results in Porto Alegre, Rio Grande, and Pelotas. For December 15, Torres and São Borja had the largest increases, while Pelotas, Porto Alegre, and Rio Grande remained similar. During El Niño years, the higher frequency of rainfall and elevated relative humidity contribute to reduced evapotranspiration and maize water demand. This greater soil water availability can be assessed through the climatological water balance method by Thornthwaite & Mather (1955), which identifies situations where precipitation exceeds soil water storage capacity. The lower variation in water demand in some municipalities may be related to reduced local sensitivity to interannual climatic anomalies or to a balance between local meteorological and edaphic variables (Embrapa, 2009).

4. Conclusions

The results of this study demonstrate that the water demand of a medium-cycle maize cultivar grown in the lowlands of Rio Grande do Sul varies significantly depending on sowing date and ENSO climatic events. The highest demand was observed during La Niña years, particularly in more inland municipalities such as Bagé and Santana do Livramento, while lower values were recorded in coastal regions and during El Niño years.

These variations highlight the importance of considering both climatic seasonality and year type for sowing planning and irrigation management, especially in areas with edaphoclimatic limitations. The use of historical series and models such as Loess regression proved effective in identifying safe sowing windows and estimating water demand throughout the crop cycle.

It is recommended that future research integrate productivity data, soil characteristics, and irrigation technologies to improve agroclimatic zoning for maize under different climatic scenarios. Additionally, the use of predictive tools combined with ENSO event monitoring can contribute to more resilient agricultural practices and more efficient water resource use.

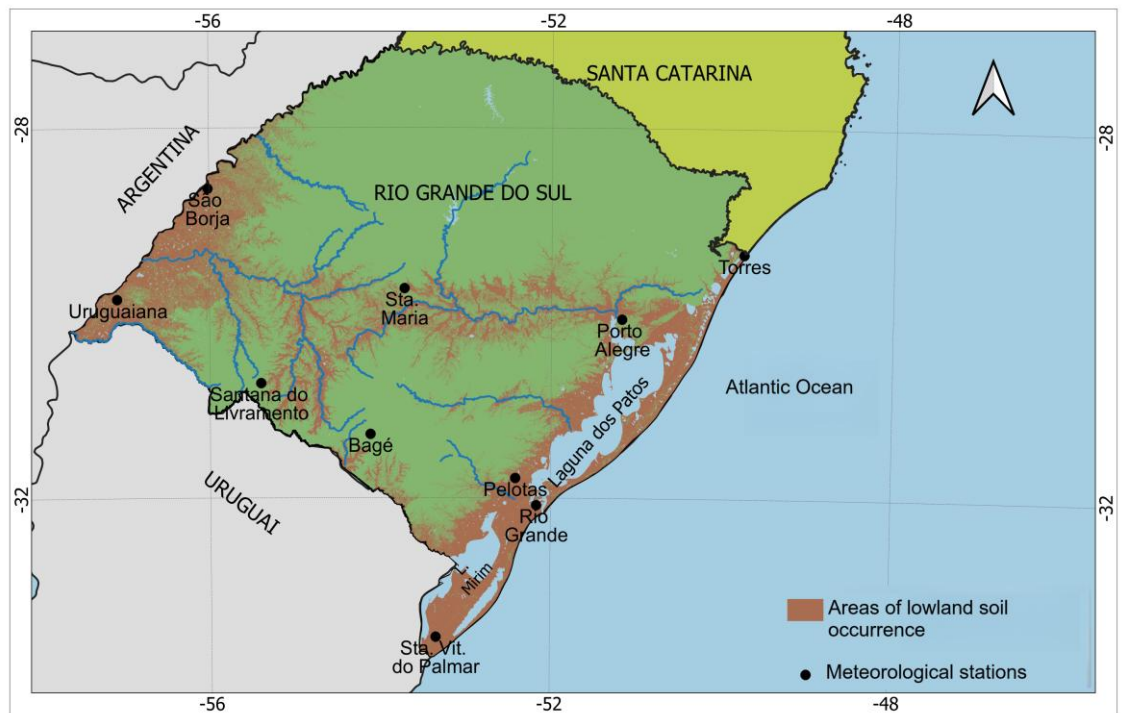


Figure 1. Spatial distribution of the lowlands in Rio Grande do Sul and location of the municipalities where the meteorological stations used are situated. Adapted from Miura et al. (2015).

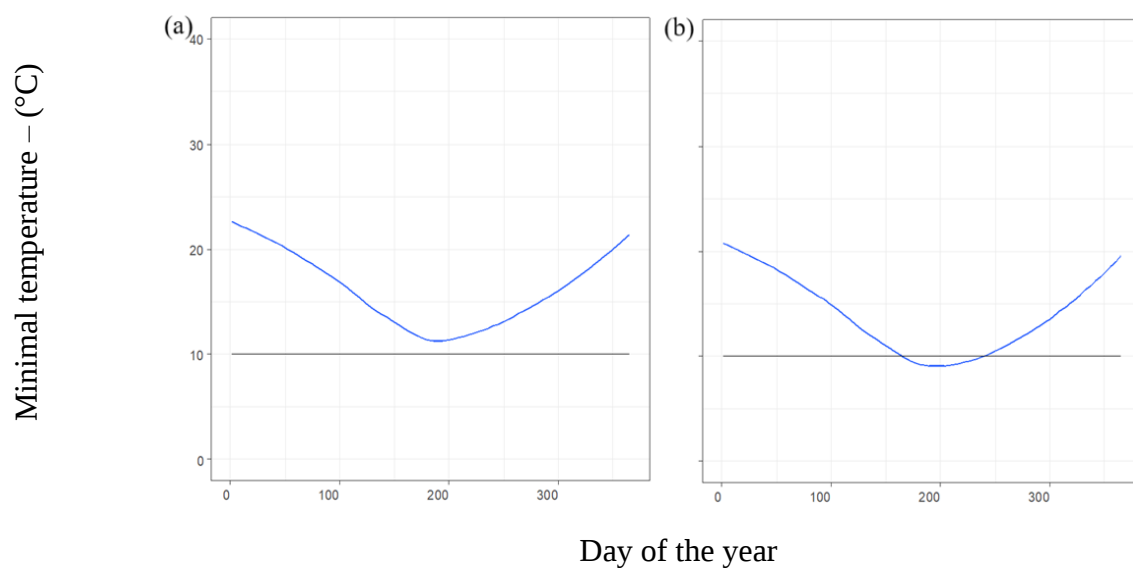


Figure 2. Behavior of minimum air temperature throughout the year for two municipalities in Rio Grande do Sul. (a) Porto Alegre, with a continuous cycle and no critical period. (b) Santa Vitória do Palmar, where sowing is interrupted from June 1st to September 1st due to minimum temperatures falling below the 10 °C threshold.

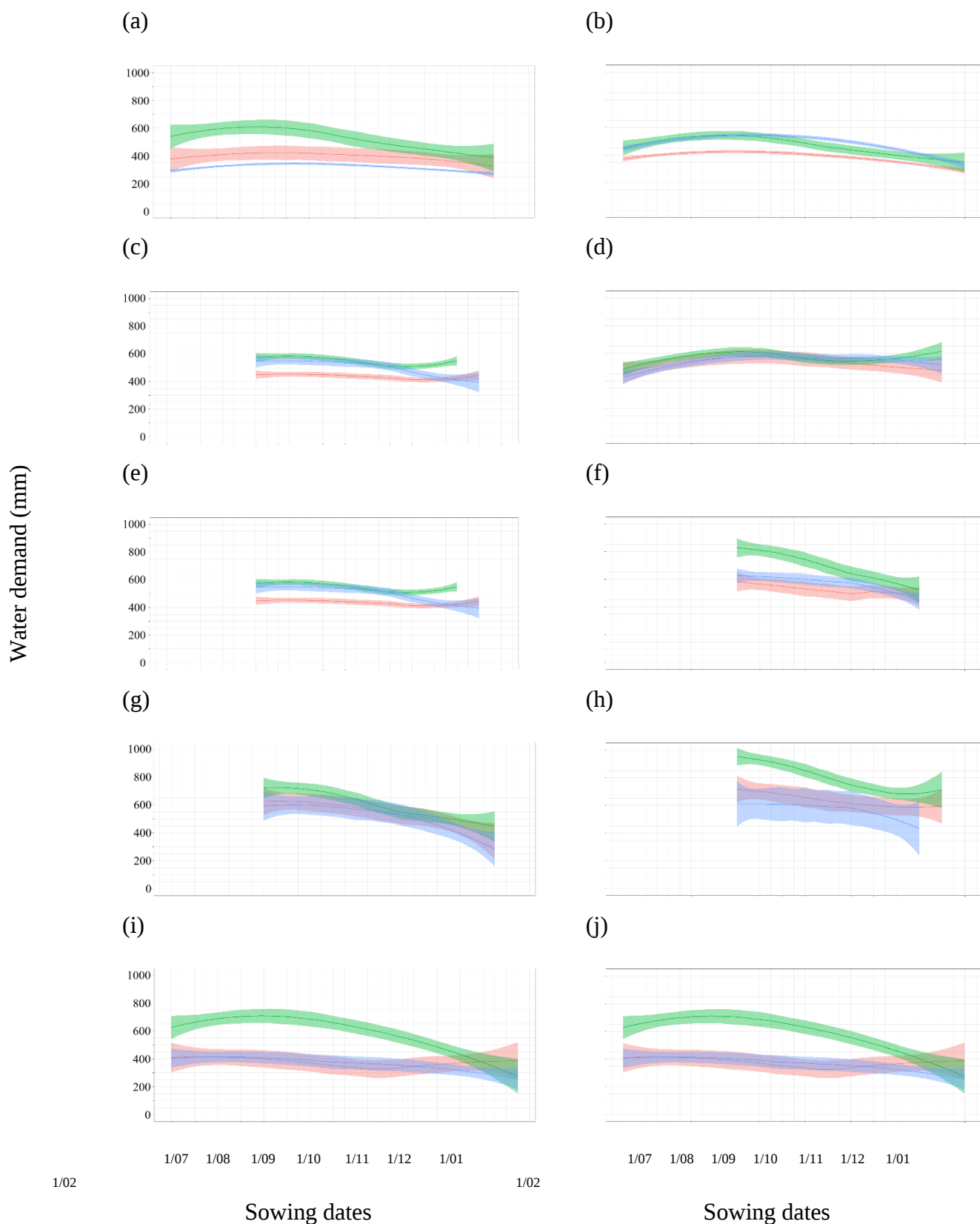


Figure 3. Results of the local regression of water demand as a function of sowing date and climatic year type (Neutral (blue), El Niño (green), and La Niña (orange)) for municipalities located in the lowlands of Rio Grande do Sul: (a) Torres; (b) Porto Alegre; (c) Pelotas; (d) Rio Grande; (e) Santa Vitória do Palmar; (f) Bagé; (g) Santa Maria; (h) Santana do Livramento; (i) São Borja; and (j) Uruguaiana.

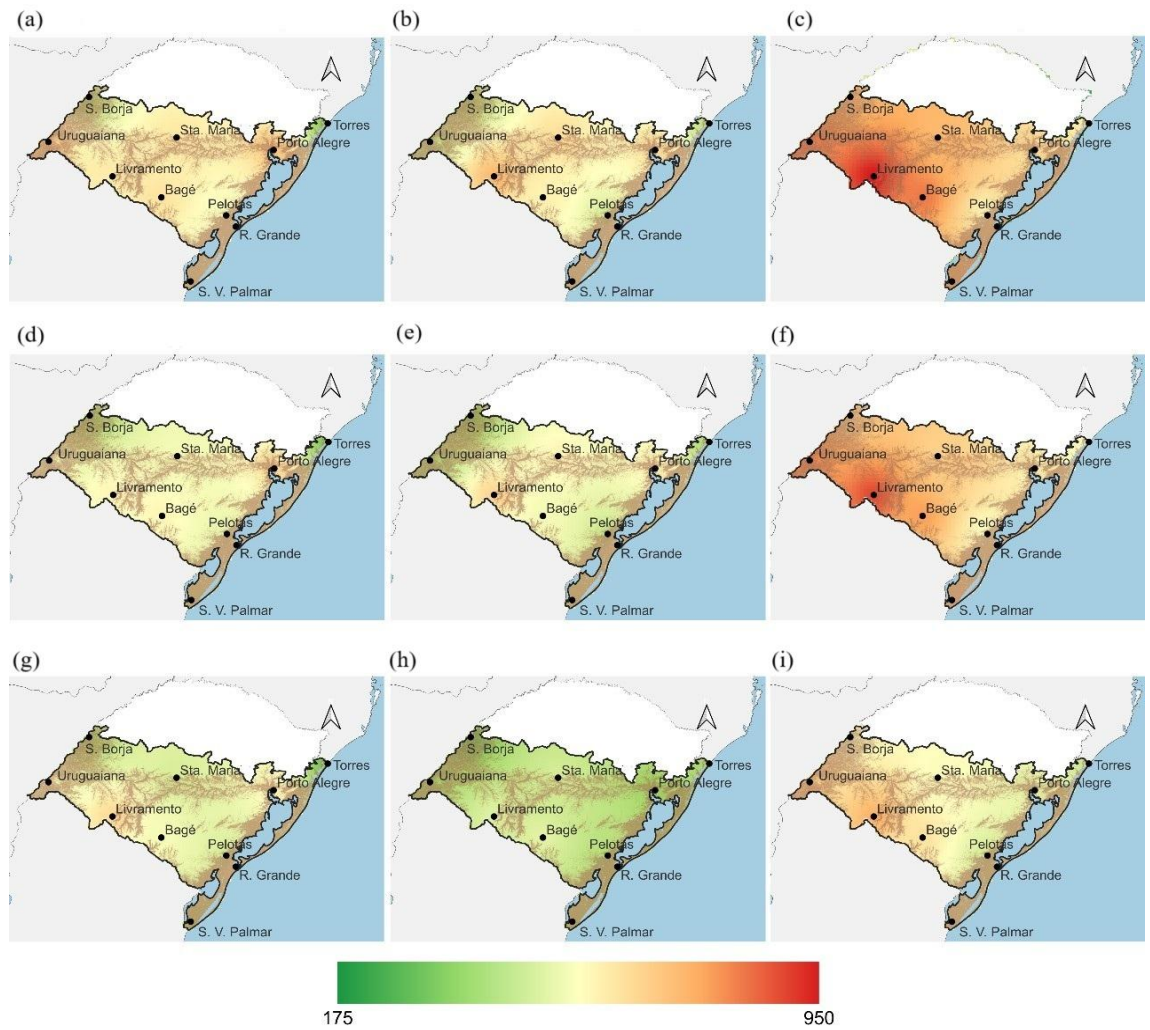


Figure 4. Spatial distribution of water demand (mm) for municipalities located in the lowlands of Rio Grande do Sul, considering three sowing dates and different climatological conditions. Sowing on September 15: (a) Neutral years, (b) El Niño years, (c) La Niña years; sowing on November 1: (d) Neutral years, (e) El Niño years, (f) La Niña years; sowing on December 15: (g) Neutral years, (h) El Niño years, (i) La Niña years.

6. Artigo 2

Impact of El Niño–Southern Oscillation Phenomena on Water Deficit in Maize Crops in the Lowlands of Rio Grande do Sul – Part 2

ABSTRACT

This study evaluated the effects of El Niño and La Niña phenomena on water deficit in maize cultivation across different sowing dates in the lowlands of Rio Grande do Sul, Brazil. Historical meteorological data (2000–2024) and water balance simulations based on the Thornthwaite & Mather and CN-SCS models—adapted to regional edaphoclimatic conditions—were used to quantify water deficits and identify critical sowing windows. The results showed that water deficits were more severe during La Niña years, especially in the municipalities of Bagé, Uruguaiana, and Santana do Livramento. In contrast, El Niño years, particularly with late sowing dates, exhibited lower deficits. These findings highlight the importance of monitoring ENSO events for agricultural planning and efficient irrigation management in regions with high climatic variability.

Keywords: El Niño; La Niña; maize; water balance.

1. Introduction

Modern agriculture faces increasingly complex challenges due to climate variability and growing instability in hydrological regimes. In southern Brazil, particularly in the lowland areas of Rio Grande do Sul, extreme events of drought and excessive rainfall have become more frequent and intense, significantly affecting the productivity of crops sensitive to water availability, such as maize. Recent studies (Villa et al., 2024) show that water deficit periods occur precisely during critical phenological stages, such as flowering and grain filling, increasing the risk of yield losses. Dependence on rainfall makes these areas especially vulnerable to water shortages during key developmental stages, highlighting the need for more efficient soil water management strategies (Parfitt & Bueno, 2025).

Among the main climatic factors influencing rainfall distribution and volume are interannual ocean-atmosphere phenomena, especially El Niño–Southern Oscillation (ENSO). These events significantly alter precipitation patterns at global and regional scales, directly affecting agricultural water balance. Classic studies (Ropelewski & Halpert, 1987; Philander, 1990) demonstrated how ENSO causes rainfall anomalies in South America. More recently,

Pilau et al. (2022) analyzed 25 soybean growing seasons in Rio Grande do Sul and found that only in El Niño years does precipitation exceed the 800 mm required for significant yield increases; the study also quantified the impact of water deficit on soybean productivity, ranging from -3.7 to $-15.2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$.

Experts from the International Research Center on El Niño Phenomenon, CIIFEN (2024), warn of an increase in both the frequency and intensity of ENSO events, noting the 2023–2024 El Niño as one of the strongest since 1950, with consequent intensification of climate extremes in South America, such as heat waves and severe droughts, causing major losses in crops like maize and soybean.

Additionally, analyses by Anderson et al. (2019, 2020) indicate that, in southern Brazil, consecutive La Niña events tend to cause persistent declines in soil moisture and significant reductions in agricultural productivity. Regional data corroborate these impacts: between 2023 and 2024, severe drought episodes were recorded in southern Brazil, associated with persistent La Niña events. Satellite monitoring by EarthDaily Agro detected sustained low precipitation and decreased NDVI indices in maize and soybean fields in Rio Grande do Sul, Santa Catarina, and Paraná, indicating a high risk of production losses (Revista Cultivar, 2024).

Thus, ENSO events are not only becoming more frequent and intense but also tend to occur in prolonged sequences (such as multi-year La Niña events), posing additional challenges to water predictability and requiring adjustments in sowing calendars, conservation planning, and adoption of technologies to forecast and mitigate the impacts of water deficits or surpluses on agricultural crops.

Maize, due to its high water demand and relatively short cycle, is a strategic crop for climate risk analyses and irrigation requirement assessments. Understanding the interactions between climate, soil, and crop physiological needs is essential for defining more sustainable and productive agronomic practices. In this context, quantifying water deficiency throughout the crop cycle plays a central role in farmers' decision-making, especially in environments with high interannual rainfall variability. Villa et al. (2024) highlight that climate variability phenomena such as El Niño and La Niña intensify drought and excess rainfall extremes in southern Brazil, significantly affecting the agricultural water balance. Additionally, the review by Soares, Paço, and Rolim (2023) reinforces the importance of water demand estimation models as tools to support irrigation, emphasizing the need for management strategies that consider both climate variability and future climate change scenarios.

This study aimed to evaluate the effects of El Niño and La Niña on water deficiency in maize cultivation under different sowing dates. The approach seeks to provide technical support for water management planning in lowland regions of Rio Grande do Sul, contributing to agricultural production resilience in the face of ENSO phenomena.

2. Material and Methods

This study aimed to estimate the water deficiency of maize for different sowing dates of the P3016VYHR cultivar, classified as ultra-early maturity with a thermal requirement of 1498 growing degree days (GDU) (Corteva Agriscience, 2024), in the lowland regions of Rio Grande do Sul. The study area included the municipalities of São Borja, Uruguaiiana, Santa Maria, Torres, Porto Alegre, Pelotas, Rio Grande, Santa Vitória do Palmar, Bagé, and Santana do Livramento (Figure 1). The analyses were carried out through climatic water balance simulations combined with technical criteria for determining water deficits and irrigation events.

Ten representative municipalities of the lowland regions of Rio Grande do Sul were selected, considering their geographical distribution and the availability of reliable meteorological data. For each municipality, the nearest weather station was used. Analyses were based on daily historical series of precipitation, maximum temperature, minimum temperature, and reference evapotranspiration (ET_o), obtained from the National Institute of Meteorology (INMET) for the period 2000 to 2024, considering only years with complete datasets.

2.1 Determination of sowing dates and critical periods

For each municipality, sowing dates were simulated on the 1st and 15th of each month throughout the year. However, dates falling within periods with temperatures unfavorable for germination, referred to as “critical periods,” were excluded (table 2). The definition of these periods was based on the minimum temperature required for maize germination, established at 10 °C soil temperature (Barros & Calado, 2014). Due to the lack of historical soil temperature data, minimum air temperature was adopted as a reference, considering that values below 10 °C prevent germination.

To identify critical periods, daily minimum air temperature time series were smoothed using the Loess method (Cleveland & Devlin, 1988) in R software version 4.4.1 (R Core Team, 2023), with a 95% confidence interval. The start and end of critical periods were

defined by the points where the lower limit of the confidence interval of the smoothed curve intersected the 10 °C line, determined analytically using R scripts. It was also considered that the period between sowing and maize emergence is six days (Barros & Calado, 2014), and sowing dates resulting in minimum temperatures below 10 °C during this interval were excluded. Additionally, dates with reproductive phases extending beyond June 30 were discarded to avoid overlapping between successive growing seasons.

2.2 Phenological simulation and evapotranspiration

The phenological cycle of the Pioneer® P3016VYHR cultivar was simulated for all sowing dates using the growing degree unit (GDU) approach, with a total requirement of 1498 GDU from emergence to physiological maturity, calculated using the following formula:

$$\text{GDU} = (\text{Tmax} + \text{Tmin})/2 - \text{Tbase}, \text{ where } \text{Tbase} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C} \text{ (Kiniry, 1991).}$$

2.3 Water balance and irrigation simulations

Water balances were simulated following the recommendations of the ridge-furrow system. The methodology for implementing this technology, including soil preparation, fertility management, fertilization, ridge construction, weed management, and installation of drip lines, is described in Parfitt et al. (2021).

2.4 Soil water balance (WB)

The soil water balance model adopted was that proposed by Mélo-Araujo (2023), specifically developed for lowland conditions. Climatic data on precipitation (P) and reference evapotranspiration (ET_o) were obtained from meteorological stations of the National Institute of Meteorology (INMET), available free of charge.

2.5 Variation in soil water storage (ΔARM)

The variation in soil water storage (ΔARM) was estimated using the model of Thornthwaite & Mather (1955), in its simplified form proposed by Pereira et al. (1997), considering the following components of the water balance.

$\Delta\text{ARM} = \text{P} + \text{I} - \text{Etc}$, where ΔARM is the variation in soil water storage (mm); P is effective precipitation (mm); I is irrigation (mm); and ETC is crop evapotranspiration (mm day⁻¹). The initial ARM was calculated based on the soil available water capacity (AWC).

$\text{AWC} = (\theta_{\text{FC}} - \theta_{\text{PWP}}) \times Z$, Where, AWC is the soil available water capacity (mm); θ_{FC} is the soil moisture at field capacity (cm³ cm⁻³); θ_{PWP} is the soil moisture at permanent

wilting point ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); and Z is the effective rooting depth (mm), which, in this case for lowland soils, was considered to be 300 mm as indicated by Parfitt, Pinto & Timm (2014). The values for permanent wilting point and field capacity at each location were obtained from the data provided by Beltrame & Louzada (1996). The daily soil water storage (ARM) and irrigation simulations (I) were determined based on the conditions presented in Table 1.

Table 1. Conditions used in the soil water balance model to determine daily soil water storage.

Programming	Description
If $\text{ARM}_{i-1} + \Delta\text{ARM} > \text{AWC}$; $\text{ARM} = \text{AWC}$	If the previous day's ARM plus the current day's ΔARM is greater than the AWC, then ARM is equal to the AWC.
If $\text{ARM}_{i-1} + \Delta\text{ARM} < 0$; $\text{ARM} = 0$	If the previous day's ARM plus the current day's ΔARM is less than zero, then ARM is set to zero.
If $0 < \text{ARM}_{i-1} + \Delta\text{ARM} < \text{AWC}$; $\text{ARM} = \text{ARM}_{i-1} + \Delta\text{ARM}$	If the previous day's ARM plus the current day's ΔARM is greater than zero and less than the AWC, then ARM is the result of the previous day's ARM plus the current day's ΔARM .

2.6 Estimation of effective precipitation: CN-SCS method

Surface runoff (Pes) was estimated using the CN-SCS method (Soil Conservation Service – Curve Number), with effective precipitation (Pef) calculated as the difference between total precipitation (P) and direct runoff (Pes), according to the classical equation:

$$\text{Pes} = [(P - 0.2S)^2] / [P + 0.8S], \text{ for } P > 0.2S;$$

$$\text{Pes} = 0, \text{ for } P \leq 0.2S.$$

Maximum potential retention (S) was calculated by $S = (25400 / \text{CN}) - 254$, adopting CN equal to 88. This choice was based on three main factors: (i) the predominance of hydrologic group D soils in the lowlands, including Planosols, Gleysols, and Organosols, which are naturally poorly drained and highly susceptible to runoff; (ii) the predominant agricultural use of these areas, characterized by pastures compacted by animal trampling or conventional tillage, drastically reducing infiltration rates; and (iii) the need for a conservative approach in hydrological modeling under scenarios of high climate variability, as evaluated in this study.

The choice of $\text{CN} = 88$ is also technically supported by Siqueira (2018), who assessed the Fragata stream sub-basin in Pelotas (RS), identifying a weighted mean CN of 82, with local variations up to 98, depending on land use and cover. In that basin, about 85% of the area had group D soils, predominantly under pastures and compacted agricultural areas. The author

highlighted that CN tends to increase substantially under greater anthropogenic impact, with CN = 88 being compatible with real situations observed in adjacent basins with similar intensive land use to the areas in this study.

Therefore, adopting CN = 88 in this work is consistent with the technical-empirical parameters of the CN-SCS model and better reflects the hydrological and edaphic reality of the lowlands in Rio Grande do Sul, contributing to more accurate and reliable estimates of effective precipitation and, consequently, agricultural water balance under different climatic scenarios.

Crop evapotranspiration (ET_c) was estimated according to Allen et al. (1998), using the equation:

$ET_c = ET_o \times K_c$; where, ET_o is the reference evapotranspiration provided by INMET (calculated using the Penman-Monteith equation), and K_c is the crop coefficient adapted from Radin et al. (2003), given by:

$$K_c = -0.000157 \times DAS^2 + 0.0241 \times DAS + 0.421; \text{ where, } DAS = \text{days after sowing.}$$

Years were classified as Neutral, El Niño, or La Niña based on NOAA data, considering events in which at least 30% of the reproductive phase coincided with the phenomenon. El Niño events were characterized by Pacific Ocean surface temperature anomalies greater than +0.5 °C for at least five consecutive quarters, while anomalies below –0.5 °C indicated La Niña. Anomalies between –0.5 °C and +0.5 °C were classified as neutral conditions. Typical El Niño confirmation considered the ASO quarter anomaly (August, September, and October) consistently exceeding +0.5 °C.

Based on these simulations, it was possible to identify the periods with the greatest water deficits throughout the maize cycle, aiming to ensure the full development of the cultivar under the edaphoclimatic conditions of the lowlands in Rio Grande do Sul.

3. Results and discussion

3.1 Minimum temperature and sowing window

Analysis of minimum air temperature curves (Figure 2) reveals significant differences between Porto Alegre and Santa Vitória do Palmar regarding thermal viability for maize germination. In Porto Alegre, minimum temperatures remain above the physiological threshold of 10 °C throughout the year, with no thermal restrictions for seed germination. This condition enables sowing at any time of the year, allowing for a continuous and highly flexible production system, consistent with the recommendations of the Agricultural Zoning

for Climate Risk (ZARC) for regions with a low frequency of extreme cold events (EMBRAPA, 2022).

In contrast, in Santa Vitória do Palmar, the minimum temperature curve crosses the critical threshold of 10 °C between days 152 and 244 of the year, approximately from June 1 to September 1. This period was defined as a “critical period” when sowing becomes unfeasible due to insufficient thermal conditions for germination. This restriction is physiologically justified, as temperatures below 10 °C impair enzymatic activity, cellular membrane fluidity, and seed respiration, leading to reduced germination rates and delayed emergence (Jan et al., 2022).

These data reinforce the importance of considering local thermal conditions when defining safe sowing periods. In regions like Porto Alegre, conditions are broadly favorable to flexible sowing schedules, whereas in more southern areas such as Santa Vitória do Palmar, thermal risks impose restrictions that must be respected to ensure successful germination and uniform plant stands. The adoption of cultivars with greater cold tolerance and conservation tillage practices can partially mitigate these effects but do not replace the need for planning based on historical minimum temperature series, as recommended by agroclimatic and physiological studies (Avila et al., 2021; Jan et al., 2022; Zhang et al., 2020; EMBRAPA, 2022)

Table 2. Critical periods and sowing dates for a medium-cycle maize cultivar in lowland municipalities of Rio Grande do Sul.

Municipality	Critical period	Sowing dates
Torres	- -	01/07 - 01/02
Porto Alegre	- -	01/07 - 15/02
Pelotas	15/06 - 15/08	15/09 - 01/02
Rio Grande	- -	01/07 - 01/02
Santa Vitória do Palmar	01/06 - 01/09	15/09 - 15/01
Bagé	01/06 - 01/09	15/09 - 15/01
Santana do Livramento	01/06 - 01/09	15/09 - 01/02
Santa Maria	15/06 - 15/08	01/09 - 01/02
Uruguiana	15/06 - 01/08	15/08 - 01/02
São Borja	- -	01/07 - 15/02

3.2 Patterns of water deficit among municipalities

According to the graphs (Figure 3), all evaluated municipalities showed water deficits for all sowing dates. Therefore, the adoption of irrigation with modern techniques becomes essential to achieve high yields (Parfitt & Bueno, 2025). The observed pattern of greater water deficits (Figure 4) between September 1 and October 1, especially for early sowing dates, aligns with the findings of Cordeiro, Berlato & Alves (2018), who identified a high frequency of critical water index values ($IH \leq 0.6$) in southern RS during December and January, directly affecting spring-summer crops. This indicates that even sowings in September can accumulate water stress throughout the crop cycle. The authors also highlighted that La Niña events reduce the water index mainly in spring, reinforcing the trend of higher deficits at the beginning of the cycle in cold years.

The occurrence of more intense deficits in Bagé, Santana do Livramento, and Uruguaiana, particularly under La Niña, is supported by Matzenauer et al. (2018), who found a high frequency of droughts in the Campanha and Fronteira Oeste regions of RS during spring and summer, coinciding with critical stages of maize (tasseling and grain filling). According to these authors, in La Niña years, precipitation remains below the climatological average in almost all months, aggravating water deficits in these regions.

However, the overlapping of water deficit patterns among Neutral, El Niño, and La Niña years, especially in municipalities like Porto Alegre, Santa Maria, and Rio Grande, reveals the complexity of hydrological behavior in climatic transition zones. Studies such as Matzenauer et al. (2017) indicate that although precipitation in El Niño years tends to be higher in spring, in some years deviations are insufficient to ensure adequate water availability, and poorly distributed rainfall also reduces available soil moisture, even under El Niño.

In Torres, where the greatest deficits were observed in El Niño years, this exception is supported by Cordeiro et al. (2018), who showed that the water index (IH) is generally higher in spring in most meteorological stations, but not all, highlighting that hydrological behavior can be locally reversed due to topographic and microclimatic particularities.

The clear distinction between climatic regimes in Uruguaiana, with La Niña showing the highest deficits, is consistent with Berlato, Farenzena & Fontana (2005), who identified a strong association between La Niña and maize yield reduction due to water deficits, especially when precipitation from October to March is reduced.

Additionally, the observed trend of decreasing water deficit with later sowing dates is supported by Cordeiro et al. (2018), who reported lower water indices in spring and early summer, as well as by Tolimir et al. (2024), who, even under a temperate continental European climate, found that sowing dates directly influence water use efficiency and maize

yield. Although Tolimir's study focused on irrigation, their data indicate that choosing the sowing date plays a critical role in mitigating water stress, even under limited rainfall conditions.

These variations highlight the importance of considering both climatic seasonality and year type when planning sowing and irrigation management, particularly in areas with edaphoclimatic constraints. It is recommended that future research integrate productivity data and irrigation technologies to improve the agroclimatic zoning of the crop under different climatic scenarios. Furthermore, the use of predictive tools combined with ENSO event monitoring can contribute to more resilient agricultural practices and efficient water resource management.

4. Conclusions

The results of this study demonstrate that the water deficit of a medium-cycle maize cultivar in the lowlands of Rio Grande do Sul varies significantly according to sowing date and ENSO climatic phenomena. The greatest water deficit was observed in La Niña years, particularly in municipalities such as Bagé, Uruguaiana, and Santana do Livramento, while lower values were recorded during El Niño years, mainly in later sowing periods. These findings contribute directly to irrigation planning and sowing zoning in regions with high interannual rainfall variability.

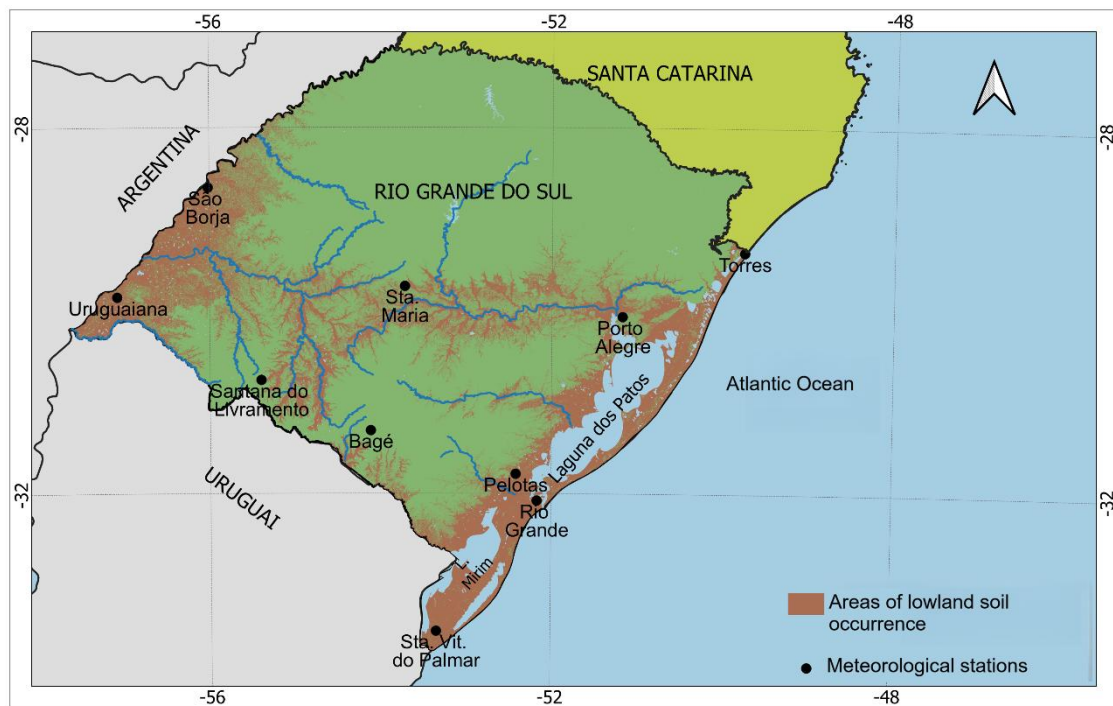


Figure 1. Spatial distribution of the lowlands in Rio Grande do Sul and location of the municipalities where the meteorological stations used are situated. Adapted from Miura et al. (2015).

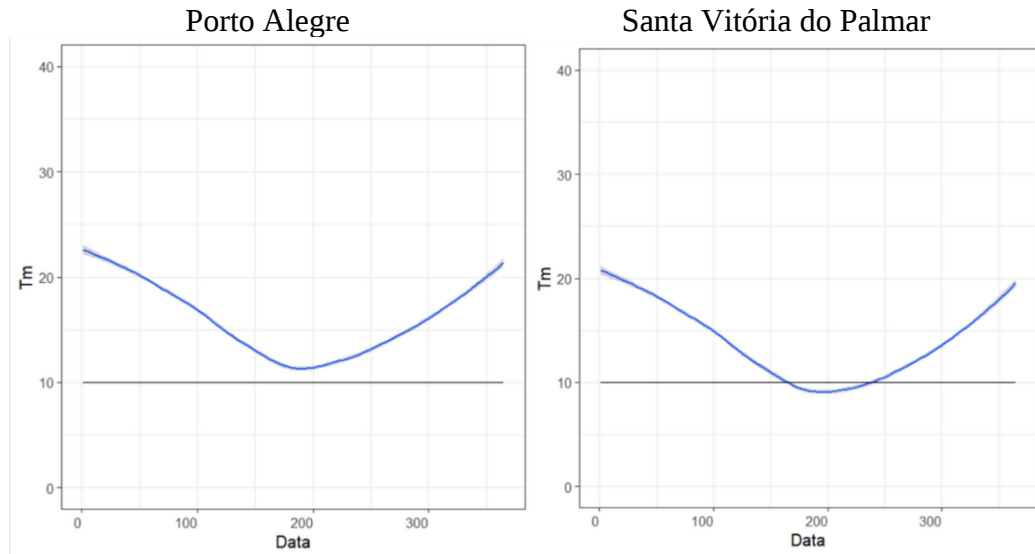
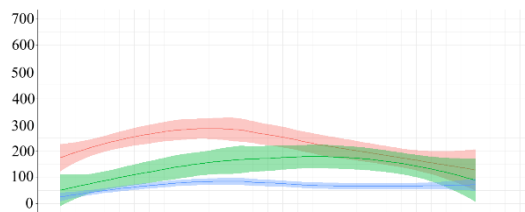


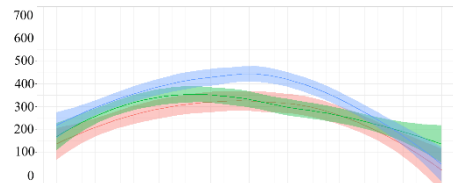
Figure 2. Minimum air temperature behavior throughout the year for two municipalities in Rio Grande do Sul. (a) Porto Alegre, with a continuous cycle and no occurrence of critical periods. (b) Santa Vitória do Palmar, with sowing interruption from June 1 to September 1 due to minimum temperatures falling below the 10 °C threshold.

Water Deficiency (mm)

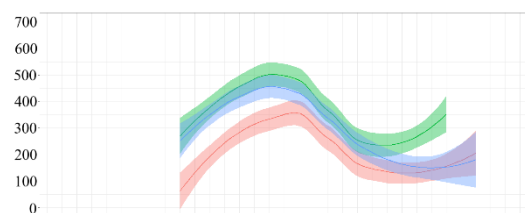
(a) Torres



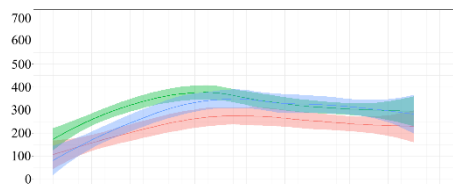
(b) Porto Alegre



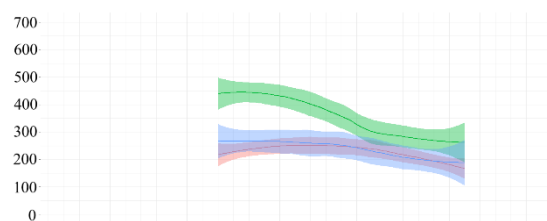
(c) Pelotas



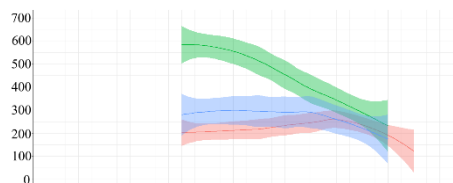
(d) Rio Grande



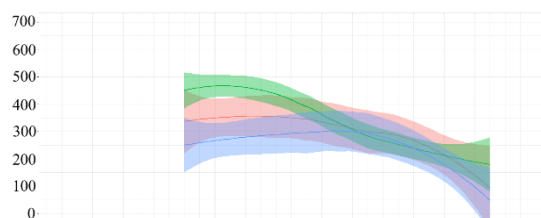
(e) Santa Vitoria



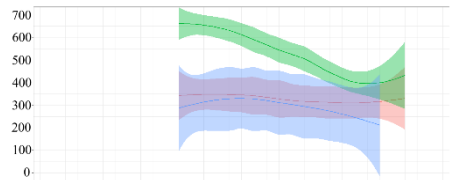
(f) Bagé



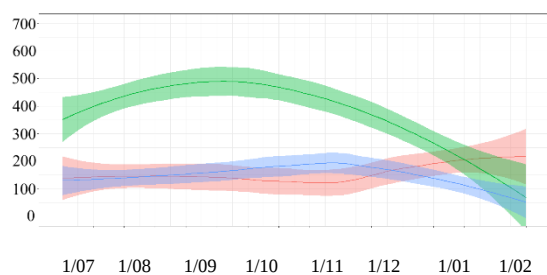
(g) Santa Maria



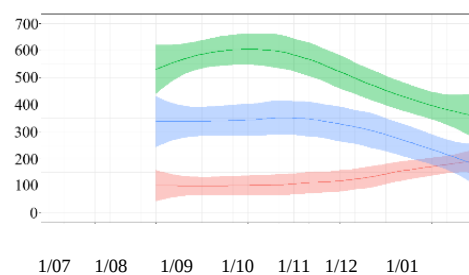
(h) Santana do Livramento



(i) São Borja



(j) Uruguiana



Sowing dates

Sowing dates

Figure 3. Results of the local regression of water deficit as a function of sowing date and climatic year type (Neutral (blue), El Niño (green), and La Niña (orange)) for municipalities located in the lowlands of Rio Grande do Sul: (a) Torres; (b) Porto Alegre; (c) Pelotas; (d) Rio Grande; (e) Santa Vitória do Palmar; (f) Bagé; (g) Santa Maria; (h) Santana do Livramento; (i) São Borja; and (j) Uruguiana.

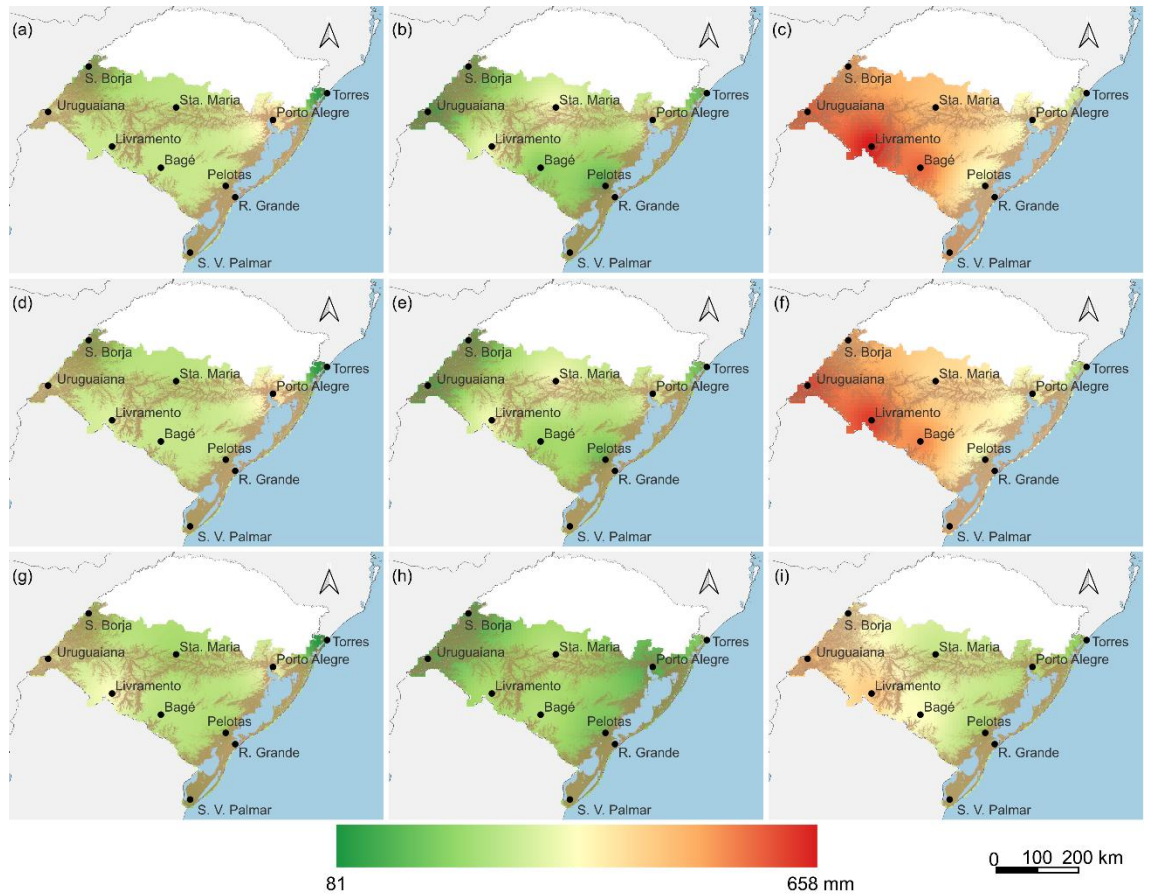


Figure 4. Spatial distribution of water deficit (mm) for municipalities located in the lowlands of Rio Grande do Sul on three sowing dates under different climatic conditions.

Sowing on September 15: (a) Neutral years, (b) El Niño years, (c) La Niña years;

Sowing on November 1: (d) Neutral years, (e) El Niño years, (f) La Niña years;

Sowing on December 15: (g) Neutral years, (h) El Niño years, and (i) La Niña years.

Considerações finais

A identificação dos períodos críticos para a semeadura, com base nas temperaturas mínimas do ar e nas exigências térmicas da cultura, mostrou-se essencial para o planejamento agrícola nas terras baixas. A delimitação de janelas térmicas mais favoráveis para a semeadura permite potencializar o uso eficiente dos recursos climáticos disponíveis.

A análise integrada da demanda e da deficiência hídrica do milho nas terras baixas do Rio Grande do Sul demonstrou que os fenômenos El Niño e La Niña exercem influência significativa sobre a viabilidade hídrica da cultura. Os resultados evidenciaram que, em anos de La Niña, ocorrem os maiores valores de demanda e deficiência hídrica, especialmente quando associados a semeaduras precoces em municípios com baixa precipitação e elevada evapotranspiração potencial. Mostrando-se que nesses anos o uso da irrigação se torna mais importante. Em contrapartida, anos classificados como El Niño apresentaram menor exigência hídrica e déficits reduzidos, favorecendo o cultivo sem irrigação e com um bom sistema de drenagem, particularmente em semeaduras realizadas entre novembro e janeiro.

As informações geradas nesta pesquisa contribuem para a definição de estratégias de irrigação mais seguras e embasadas em evidências climáticas, além de subsidiar o manejo adaptativo frente à variabilidade interanual associada aos fenômenos ENOS. Tais resultados fortalecem a capacidade de resposta dos agricultores e gestores públicos diante dos efeitos das mudanças climáticas e da crescente ocorrência de eventos climáticos extremos.

Recomenda-se, como desdobramento, a incorporação dos dados desta pesquisa em sistemas de apoio à decisão agrícola, incluindo ferramentas digitais para recomendação de época de semeadura e sistemas de alerta climático. Sugere-se, ainda, a realização de estudos futuros que integrem dados de produtividade observada com variáveis edafoclimáticas e tecnologias de irrigação de precisão, visando aprimorar a sustentabilidade da produção de milho nas terras baixas do sul do Brasil.

Referências

ABIMILHO – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DO MILHO. *O cereal que enriquece a alimentação humana*. Brasília: ABIMILHO, 2019. Disponível em: <https://www.abimilho.com.br/>

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements*. Rome: FAO, 1998. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56). Disponível em: <https://www.fao.org/4/x0490e/x0490e00.htm>

ANDERSON, W. B.; HAN, E.; BAETHGEN, W.; GODDARD, L.; MUÑOZ, A. G.; ROBERTSON, A. W. The Madden–Julian Oscillation affects maize yields throughout the tropics and subtropics. *Geophysical Research Letters*, v. 47, n. 14, e2020GL087004, 2020. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2020GL087004>

ANDERSON, W. B.; SEAGER, R.; BAETHGEN, W.; CANE, M.; YOU, L. Synchronous crop failures and climate-forced production variability. *Science Advances*, v. 5, n. 7, eaaw1976, 2019. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aaw1976>

ARAÚJO, P.; FÉRES, J.; REIS, E.; BRAGA, M. J. *Assessing the impacts of ENSO-related weather effects on Brazilian agriculture*. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa / IPEA, 2005. Disponível em: https://www.academia.edu/112825829/Assessing_the_Impacts_of_ENSO_related_Weather_Effects_on_the_Brazilian_Agriculture

ASLAM, M. F. et al. Modelling crop water demand under climate change: the case of Sardinia region. *Irrigation Science*, 2025. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00271-025-01027-8>

BARROS, A. C.; CALADO, J. S. Características térmicas do solo e suas implicações na agricultura. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 18, n. 1, p. 78–85, 2014. Disponível em: <https://dspace.uevora.pt/rdpc/handle/10174/10804>

BARROS, A. H. C.; CALADO, T. J. S. Comparação entre o desempenho de cultivares de milho convencional e transgênico em diferentes épocas de semeadura. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, v. 9, n. 3, p. 122–127, 2014.

BARROS, A. C. S.; CALADO, M. C. L. *Agrometeorologia básica: com aplicações no Estado do Rio Grande do Sul*. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2014.

BELTRAME, L. F. S.; LOUZADA, J. A. S. *Caracterização físico-hídrica dos solos formadores da várzea arrozeira do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: UFRGS-IPH, 1996. 30 p.

BERGAMASCHI, H. et al. Déficit hídrico e produtividade na cultura do milho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 41, n. 2, p. 243–249, 2006. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/GtwYt6SSLWgzZFKgHbt36P/>

BERGAMASCHI, H. et al. O milho e o clima no Rio Grande do Sul. *Ciência Rural*, v. 36, n. 2, p. 571–578, 2006.

BERLATO, M. A.; FARENZENA, H.; FONTANA, D. C. Associação entre El Niño Oscilação Sul e a produtividade do milho no Estado do Rio Grande do Sul. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 40, n. 5, p. 423–432, 2005.

BERLATO, M. A.; FONTANA, D. C.; FONSECA, J. C. Zoneamento agroclimático da cultura de milho por épocas de semeadura, no estado do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 4, n. 1, p. 115–120, 1986.

BRESOLIN, M.; PONS, A. L. Botânica do milho. *IPAGRO Informa*, n. 26, p. 69–72, 1983.

CAMPOS, A. S. et al. *Utilização da tecnologia Sulco-Camalhão na produção de soja e milho em terras baixas do Rio Grande do Sul*. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2021. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1136688>

CARMONA, F. et al. *Classificação agroclimática das terras baixas do Rio Grande do Sul*. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2018. (Boletim Técnico, n. 190).

CARMONA, L. B.; MARCOLIN, E.; TERRA, V. M. Análise da variabilidade temporal das chuvas no Rio Grande do Sul associada ao ENOS. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 33, n. 2, p. 275–286, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/0102-77863320110>.

CARVALHO, C. G. P. et al. Déficit hídrico em milho. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, v. 1, n. 2, p. 79–90, 2000.

CENTENO, A. S.; PARFITT, J. M. B. O transformador sistema Sulco-Camalhão em terras baixas. *A Granja*, ed. 882, p. 32–34, jun. 2022.

CENTENO, A. S.; PARFITT, J. M. B. Sistema sulco-camalhão transforma a produção de milho nas terras baixas. *A Granja*, ano 78, n. 882, p. 32–34, jun. 2022.

CIIFEN – CENTRO INTERNACIONAL PARA LA INVESTIGACIÓN DEL FENÓMENO DE EL NIÑO. *El Niño Costero 2023–2024 fue el más intenso de los últimos 20 años en el oeste de Sudamérica*. Guayaquil: CIIFEN, 2024. Disponível em: <https://osa.ciifen.org/en/2024/06/17/el-nino-costero-2023-2024-fue-el-mas-intenso-de-los-ultimos-20-anos-en-el-oeste-de-sudamerica>. Acesso em: 08 jul. 2025.

CLEVELAND, W. S.; DEVLIN, S. J. Locally weighted regression: an approach to regression analysis by local fitting. *Journal of the American Statistical Association*, v. 83, n. 403, p. 596–610, 1988.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. *Acompanhamento da safra brasileira de grãos: safra 2021/2022 – Nono levantamento*. Brasília: CONAB, 2022. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras>. Acesso em: 03 jul. 2025.

CONCEIÇÃO, G. C. et al. Impacto do déficit hídrico sob o crescimento do milho irrigado. In: *Engenharia, Agronomia e Geociência 2014–2021*. 2021. Cap. XI.

CORDEIRO, A. P. A.; BERLATO, M. A.; ALVES, R. C. M. Tendência do Índice Hídrico Sazonal do Rio Grande do Sul e sua relação com El Niño e La Niña. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ*, v. 41, n. 3, p. 216–226, 2018.

CORTEVA AGRISCIENCE. *Catálogo de híbridos de milho 2024*. Acesso em: 29 jun. 2025. Disponível em: [O futuro da agricultura | Corteva Agriscience](#)

CUI, Y. et al. Respostas acumulativas e adaptativas da transpiração, biomassa e produtividade do milho sob estresse hídrico contínuo. Hefei: Universidade de Tecnologia de Hefei, 2024.

CUNHA, G. R. *El Niño-Southern Oscillation and climate forecasts applied to crops management in Sou* EMBRAPA TRIGO. Aplicações do ENOS na agricultura do Sul do Brasil. In: SENTELHAS, P. C. et al. (org.). *Agrometeorologia aplicada ao zoneamento agrícola*. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2009. Acesso em: 6 jun. 2025.

EMBRAPA. Zoneamento agrícola de risco climático: procedimentos metodológicos. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2009. 48 p.

EMBRAPA. *Milho – Primeiro levantamento da safra 2021/22 – RS*. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2022. Disponível em: [https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1144509/2/Documento s-268-Disponibilidade-de-cultivares-de-milho-para-o-mercado-safra-2021-2022.pdf](https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1144509/2/Documento%20s-268-Disponibilidade-de-cultivares-de-milho-para-o-mercado-safra-2021-2022.pdf)

GAVA, R. et al. Estratégias de manejo de déficit hídrico na irrigação da cultura da soja. *Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas*, v. 10, n. 3, p. 305, 2016.

HANASHIRO, R. K. et al. Desempenho fenológico, morfológico e agrônômico de cultivares de milho em Jaboticabal-SP. *Científica*, v. 12, p. 58–59, 2015.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Mapa de Biomas do Brasil – Primeira aproximação*. Rio de Janeiro: IBGE, 2013. Acesso em: 6 jun. 2025.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. *Banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa (BDMEP)*. Brasília: INMET, 2024. Acesso em: 28 jun. 2025.

JAN, N. et al. Physiological and molecular plant responses to low temperature stress. *Frontiers in Plant Science*, v. 13, 866034, 2022.

KANDIL, E. E. et al. Potentials of organic manure and potassium forms on maize (*Zea mays* L.) growth and production. *Scientific Reports*, v. 10, p. 1–11, 2020.

KIM, H.; KIM, J. Architecture design for maritime centimeter-level GNSS augmentation: real-time correction system for maritime DGPS. *Journal of Navigation and Positioning*, v. 11, n. 1, p. 35–45, 2022.

KINIRY, J. R. A model which simulates the maize phenological development. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 55, p. 311–325, 1991.

KINIRY, J. R. Maize phenology. In: HODGES, T. (ed.). *Predicting crop phenology*. Boca Raton: CRC Press, 1991. p. 5–28.

KINIRY, J. R. et al. Predicting leaf growth for five forage grasses. *Crop Science*, v. 31, p. 813–819, 1991.

LEIVAS, J. F.; BERLATO, M. A.; FONTANA, D. C. Risco de deficiência hídrica nos períodos críticos das culturas de milho e soja no RS. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 41, n. 2, p. 273–283, 2006.

LOPES, F. L.; SANTOS, M. S.; BASTISTOTE, M. Maize productivity in Brazilian devaluation of the granulometric treatment for ethanol production. *Revista Desafios*, v. 9, n. 2, 2022.

MAYZ, A.; GIRASOL, B. Manejo e produtividade de girassol em rotação com milho. *Dossiê Técnico da Rede Aragonesa de Cultivos Extensivos e Leguminosas*, campanha 2019–2020. Zaragoza: Centro de Transferência Agroalimentária, 2019.

MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. *Milho para o Estado do Paraná: ano safra 2018/2019*. Brasília: MAPA/SPI, 2018.

MATZENAUER, R.; RADIN, B.; CARGNELUTTI FILHO, A. Rendimento de grãos de soja e de milho, no Rio Grande do Sul, não difere entre eventos El Niño Oscilação Sul. *Agrometeoros*, v. 26, n. 1, p. 123–129, 2018.

MATZENAUER, R. et al. Demanda e disponibilidade hídrica para o milho no RS. *Pesquisa Agropecuária Gaúcha*, v. 8, n. 1, p. 23–31, 2002.

MIURA, A. C. et al. Distribuição espacial e temporal da precipitação nas terras baixas do Rio Grande do Sul. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 50, n. 5, p. 393–403, 2015. Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/299404966_DISTRIBUICAO_ESPACIAL_E_TEMPORAL_DA_PRECIPITACAO_NA_AMAZONIA_ORIENTAL

MIURA, A. C. et al. Zoneamento ambiental das áreas suscetíveis à degradação dos solos nas terras baixas do Rio Grande do Sul. *Cadernos de Geografia*, v. 25, n. 45, p. 146–163, 2015.

MÉLLO-ARAUJO, L. C. *Simulação de balanço hídrico para lavouras de sequeiro nas terras baixas do Rio Grande do Sul*. 2023. Tese (Doutorado em Manejo e Conservação do Solo e da Água) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2023.

NASCIMENTO, P. S. *Análise do uso da curva de retenção de água no solo determinada por diferentes métodos em planilha de manejo de irrigação*. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2009.

NOAA – NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. *Climate Prediction Center: ENSO Diagnostic Discussion*. Washington, 2024. Acesso em: 29 jun. 2025.

NOAA – NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. *Cold & Warm Episodes by Season*. Washington, 2025. Acesso em: 22 fev. 2025.

PARFITT, J. M. B.; BUENO, M. V. *Gestão da água para otimização do sistema produtivo em terras baixas – Experiências no Rio Grande do Sul*. Brasília: Embrapa, 2025. 130 p.

PARFITT, J. M. B. et al. *Manejo conservacionista do solo em terras baixas com sistema sulco-camalhão*. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2021. (Documentos, 435). Disponível em:
<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1158046/1/Comunicado-Tecnico-396-Cpact.pdf>

PARFITT, J. M. B.; PINTO, L. F. S.; TIMM, L. C. Zoneamento agroclimático para o cultivo de milho em sistemas sulco-camalhão em terras baixas do Rio Grande do Sul. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 49, n. 12, p. 1007–1016, 2014.

PARFITT, J. M. B.; PINTO, M. A. B.; TIMM, L. C. *Manejo de solo em sulco-camalhão: fundamentos e aplicações em terras baixas*. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2021.

PARFITT, J. M. B.; PINTO, M. A. B.; TIMM, L. C. *Efeito da sistematização sobre atributos físicos, químicos e biológicos de um solo de várzea no Rio Grande do Sul*. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2014. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 189).

PEREIRA, A. R.; ANGELUCCI, A. F.; ZUCOLOTO, R. Estudo do balanço hídrico. In: *Agrometeorologia*. Guaíba: Agropecuária, 1997.

PEREIRA, L. S.; FERRERES, E.; MARQUES, H. Métodos simplificados para o cálculo do balanço hídrico do solo. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 5, n. 1, p. 83–90, 1997.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. *Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas*. Guaíba: Agropecuária, 1997.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. *Evapo(transpi)ração*. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.

PETRY, M. T.; MARTINS, J. D.; CARLESSO, R. Irrigação de milho: foco em altas produtividades. *Conteúdo Técnico Biomatrix*, p. 18–28, 2021.

PHILANDER, S. G. H. *El Niño, La Niña and the Southern Oscillation*. San Diego: Academic Press, 1990.

PILAU, F. G. et al. Impact of ENSO-related rainfall variability on soybean yield in the state of Rio Grande do Sul, Brazil. *Agrometeoros*, v. 30, e027115, 2022. DOI: <https://doi.org/10.31062/agrom.v30.e027115>.

PINTO, L. F. S.; LAUS NETO, J. A.; PAULETTO, E. A. Solos de várzea do Sul do Brasil cultivados com arroz irrigado. In: GOMES, A. S.; MAGALHÃES, A. M. (ed.). *Arroz irrigado no Sul do Brasil*. Brasília: Embrapa, 2004. cap. 3, p. 75–96.

PIONEER. Informações técnicas da cultivar de milho P3016VYHR. Johnston: Pioneer Hi-Bred International, 2025. Disponível em: <https://www.pioneer.com>

QGIS DEVELOPMENT TEAM. QGIS Geographic Information System. Versão 3.34. Disponível em: <https://www.qgis.org>.

R CORE TEAM. *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2023. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 29 jun. 2025.

RADIN, B. et al. Relações entre evapotranspiração e produtividade do milho em diferentes regimes hídricos no RS. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 7, n. 1, p. 123–129, 2003.

RADIN, B.; PARFITT, J. M. B.; REICHARDT, K.; DOURADO NETO, D. Estimativa do consumo de água da cultura do milho para semeadura direta e convencional. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 27, n. 3, p. 431–438, 2003.

RADIN, B.; SIMÕES, A.; ANDRÉ, R. Coeficientes culturais de milho para cálculo da evapotranspiração no RS. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 38, n. 2, p. 253–260, 2003.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. *Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações*. 2. ed. São Paulo: Manole, 2012. 478 p.

REVISTA CULTIVAR. Seca ameaça safra de soja na Região Sul, aponta EarthDaily Agro. *Revista Cultivar*, 08 jan. 2024. Disponível em: <https://revistacultivar.com.br/noticias/seca-ameaca-safra-de-soja-na-regiao-sul-aponta-earthdaily>. Acesso em: 07 jul. 2025.

RIOS, A. D. F. et al. Indutores de resistência incrementam a produtividade e reduzem severidade da ferrugem na cultura do milho. *Scientific Electronic Archives*, v. 15, n. 7, 2022.

ROPELEWSKI, C. F.; HALPERT, M. S. Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation. *Monthly Weather Review*, v. 115, n. 8, p. 1606–1626, 1987.

SAH, R. P. et al. Impacto do estresse por déficit hídrico no milho: fenologia e componentes de rendimento. *Scientific Reports*, v. 10, p. 2944, 2020.

SILVA, D. F. et al. Morphological characteristics, genetic improvement and planting density of sorghum and corn crops: a review. *Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável*, v. 10, n. 3, 2021.

SILVA, M. R. et al. *Performance produtiva de híbridos elites de milho submetidos ao déficit hídrico*. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2019. (Documentos, 285).

SIQUEIRA, E. B. *Identificação do Parâmetro Curva Número para uma Sub-bacia da encosta do Sudeste do Rio Grande do Sul*. 2018. 86 f. Tese (Doutorado em Manejo e Conservação do Solo e da Água) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2018. Disponível em: <https://guaiaca.ufpel.edu.br/handle/prefix/4524>

SOARES, P. M. M.; PAÇO, T. A.; ROLIM, J. S. Assessing climate change impacts on irrigation water requirements under Mediterranean conditions – A review focused on maize crop. *Agronomy*, v. 13, n. 1, p. 117, 2023.

TANG, H. et al. Avaliação da influência das datas de plantio na produção sustentável de milho em condições de estresse hídrico. *Sustainability*, v. 16, n. 11, p. 4571, 2024.

TESTEZLAF, R. *Irrigação: métodos, sistemas e aplicações*. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, 2017.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The water balance. *Publications in Climatology*, v. 8, n. 1, p. 1–104, 1955.

TOLEDO, F. D. Tecnologia das sementes. In: *Melhoramento e produção de milho*. Campinas: Fundação Cargill, 1980. p. 571–619.

TOLIMIR, M. et al. Impact of deficit irrigation and planting density on grain yield and water productivity of maize grown under temperate continental climatic conditions. *Agricultural Water Management*, v. 302, 109009, 2024.

USDA – UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. *Grain: World Markets and Trade. Production, Supply and Distribution (PSD)*. Washington: USDA, 2021.

VILLA, F. *Balanço hídrico sequencial, consumo de água e necessidade de irrigação do milho no Rio Grande do Sul*. 2023. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. Disponível em: [link]. Acesso em: 6 jun. 2025.

VILLA, V. M. et al. Variabilidade climática e seus impactos no desenvolvimento e produtividade de culturas agrícolas no sul do Brasil: o caso do milho. *Agrometeoros*, v. 32, n. 1, p. 23–37, 2024.

VILLA, B. et al. Balanço hídrico do solo e a necessidade de irrigação do milho em diferentes regiões do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 34, n. 20, p. 405–431, 2024. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/379941062_Balanco_hidrico_do_solo_e_a_necessidade_de_irrigacao_do_milho_em_diferentes_regioes_do_Rio_Grande_do_Sul

WAQAS, M. A. et al. Thermal stresses in maize: effects and management strategies. *Plants*, v. 10, n. 2, p. 293, 2021.

WREGE, M. S. et al. *Clima do Rio Grande do Sul: variabilidade e tendências*. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2018. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento).

ZHANG, H. et al. Transcriptomic analysis reveals the roles of light and phytohormone signals in regulating maize seed germination under cold stress. *BMC Plant Biology*, v. 20, p. 476, 2020.

ÁVILA, R. T. et al. Identification of candidate tolerance genes to low temperature during seed germination in maize through genome-wide transcriptional analysis. *BMC Plant Biology*, v. 20, p. 375, 2020.