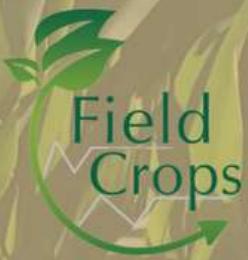


POTENCIAL E LACUNAS DE PRODUTIVIDADE DE MILHO EM SANTA CATARINA



2023



Universidade Federal de Santa Maria
Av. Roraima nº 1000, 97105-900 - Cidade Universitária,
Departamento de Fitotecnia - Prédio 77
Bairro Camobi, Santa Maria - RS



-  EQUIPEFIELDCROPS
-  EQUIPEFIELDCROPS
-  EQUIPEFIELDCROPS
-  EFIELDCROPS
-  EQUIPEFIELDCROPS

Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural - Epagri
Centro de Pesquisa para Agricultura Familiar - CEPAF
Servidão Ferdinando Tusset, S/N, 89803-904
Bairro São Cristovão, Chapecó - SC



-  epagri
-  Epagritv
-  EPAGRI
-  EpagriOficial
-  Epagri

Projeto registrado na UFSM: GAP/CCR **054426**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação – CIP

P861

Potencial e lacunas de produtividade de milho em Santa Catarina [recurso eletrônico] / Isabela Bulegon Pilecco [et al.]. Santa Maria: [s. n.], 2023.

63 p. ; il. color.
Disponível em PDF.

ISBN 978-65-89469-77-3

1. Milho 2. Produtividade 3. Cultivo I. Título

CDU 633.15

Bibliotecária responsável Trilce Morales – CRB 10/2209

Como citar:

PILECCO, I. B. et al. Potencial e lacunas de produtividade de milho em Santa Catarina. 1 ed. Santa Maria, 2023. 63p.



AUTORES



Isabela Bulegon Pilecco - Eng.-Agr. M.Sc. - Doutoranda no Programa de Pós-Graduação em Agronomia da UFSM e integrante da Equipe FieldCrops
E-mail: isabelabpilecco@gmail.com



Leandro do Prado Ribeiro - Eng. Agrônomo Dr. - Pesquisador na Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI) e Pesquisador 2 CNPq.
E-mail: leandroribeiro@epagri.sc.gov.br



Álvaro de Souza Carnellosso, Técnico em Agropecuária - Acadêmico de Agronomia da UFSM e integrante da Equipe FieldCrops.
E-mail: alvarocarnellosso@gmail.com



Cintia Piovesan Pegoraro - Acadêmica de Agronomia da UFSM e integrante da Equipe FieldCrops.
E-mail: cppegoraro1@gmail.com



Gabriel Martins Fortes, Técnico em Agropecuária - Acadêmico de Agronomia da UFSM e integrante da Equipe FieldCrops.
E-mail: gabrifortes@gmail.com



Kátia Mileni Manzke - Acadêmica de Agronomia da UFSM e integrante da Equipe FieldCrops.
E-mail: katiamanzke@gmail.com

AUTORES



Lauren Machado Lago, Técnica em Agropecuária - Acadêmica de Agronomia da UFSM e integrante da Equipe FieldCrops.
E-mail: lauremlago@gmail.com



Marcos Dalla Nora - Acadêmico de Agronomia da UFSM e integrante da Equipe FieldCrops.
E-mail: marcosdallanora7@gmail.com



Nereu Augusto Streck, Eng. Agrônomo Ph.D. - Professor do Departamento de Fitotecnia na UFSM, coordenador da Equipe FieldCrops e Pesquisador 1A CNPq.
E-mail: nstreck2@yahoo.com.br



Alencar Junior Zanon, Eng. Agrônomo Dr. - Professor do Departamento de Fitotecnia na UFSM, coordenador da Equipe FieldCrops, Consultor do Fundo Latino-Americano de Arroz Irrigado, Consultor da Organização das Nações Unidas e Pesquisador CNPq.
E-mail: alencar.zanon@ufsm.br

SUMÁRIO

GLOBAL YIELD GAP ATLAS -----	08
Potencial de produtividade -----	09
Potencial de produtividade -----	09
Lacunas de produtividade -----	12
Potencial de produtividade do milho no mundo -----	13
Lacuna de produtividade de milho no mundo -----	14
Potencial de produtividade no Brasil -----	15
Potencial de produtividade limitado por água para milho no Brasil -----	18
Lacuna de produtividade de milho no Brasil -----	21
Produção de milho em Santa Catarina -----	23
Zonas climáticas na área de cultivo de milho em Santa Catarina -----	25
Ferramentas e dados para estimativa dos potenciais de produtividade -----	29
Potencial de produtividade de milho em Santa Catarina-----	34
Potencial de produtividade de milho em Santa Catarina -----	34
Potencial de produtividade limitado por água em Santa Catarina -----	35
Produtividade atingível de milho em Santa Catarina -----	36
Produtividade média de milho em Santa Catarina-----	37
Lacuna de produtividade por água em Santa Catarina-----	38
Lacuna de produtividade atingível de milho em Santa Catarina -----	39
Potenciais e lacunas de produtividade de milho em Santa Catarina -----	40
Manejo para altas produtividades em lavouras de milho de Santa Catarina -----	41
Custo de produção X produtividade das lavouras de milho de Santa Catarina -----	58
Considerações finais -----	60
Bibliografia -----	61

AGRADECIMENTOS

Este estudo foi executado através da parceria entre a Equipe FieldCrops, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), e a Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI), durante as safras agrícolas de 2020/2021 e 2021/2022.

Agradecemos à EPAGRI, em especial aos extensionistas, pelo acompanhamento das lavouras durante as duas safras e aos pesquisadores e funcionários do Centro de Pesquisa para Agricultura Familiar (CEPAF - EPAGRI) pela condução de experimentos de milho visando atingir o potencial de produtividade.

Aos produtores de milho de Santa Catarina que abriram as porteiras de suas propriedades e permitiram o acompanhamento das lavouras.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelas bolsas de estudo de nível técnico, graduação, pós-graduação e pesquisador.

A EPAGRI

A Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina – EPAGRI – é uma empresa pública, vinculada ao Governo do Estado de Santa Catarina por meio da Secretaria de Estado da Agricultura, da Pesca e do Desenvolvimento Rural. A criação da Empresa, em 1991, uniu os trabalhos de pesquisa e extensão rural e pesqueira, somando décadas de experiência em diferentes áreas e fortalecendo ainda mais o setor (mais informações: <https://www.epagri.sc.gov.br/index.php/a-epagri/quem-somos/>).

A EQUIPE FIELD CROPS

FieldCrops é uma equipe multidisciplinar e multi-institucional que busca a intensificação sustentável de sistemas de produção de soja, arroz, milho, trigo, mandioca e plantas de cobertura. A Equipe FieldCrops desenvolve trabalhos de pesquisa, ensino e extensão dentro da lavoura do produtor, atendendo demandas locais, mas com impacto e foco na sustentabilidade global, atendendo aos *Sustainable Development Goals* (SDGs) e a Agenda 2030 da ONU. Nossa Equipe também colabora para a realização de projetos globais, como o *Global Yield Gap Atlas* (www.yieldgap.org), que tem como objetivo determinar o quanto é possível produzir de alimentos na atual área agricultável com o mínimo de impacto ambiental, abrangendo 15 culturas alimentares em 75 países. As ações de geração de conhecimento e transferência de tecnologia capitaneadas pela Equipe FieldCrops são baseadas na interação GxAxMxP (Genótipo x Ambiente x Manejo x Produtor) em nível de sistema de produção.

Por fim, a Equipe FieldCrops divulga informações técnicas aplicadas ao produtor através das redes sociais oficiais (Instagram, Twitter, Youtube, Facebook e Linkedin), onde nossos seguidores (100% orgânicos) recebem informações inéditas, exclusivas e atualizadas diretamente das lavouras do Brasil, e fora do Brasil, 365 dias por ano, garantindo transparência como pilar principal das nossas ações.

GLOBAL YIELD GAP ATLAS

O *Global Yield Gap Atlas* (GYGA) é um protocolo global que tem como objetivo estimar o quanto é possível produzir de alimentos em cada hectare agricultável ao redor do mundo, com o menor impacto ambiental. Assim, é possível identificar as regiões do globo com maior potencial de aumento da produção de forma vertical, ou seja, pelo aumento da produtividade das culturas. Para isso, já foram estimados o potencial de produtividade, potencial de produtividade limitado por água e as lacunas de produtividade de 15 culturas alimentares, em 75 países, nos seis continentes (Figura 1). Através do GYGA já foi estimado o potencial e as lacunas de produtividade nos países responsáveis por 91, 86, 58 e 82% da produção global de arroz, milho, trigo e soja, respectivamente. Estes dados são públicos e estão disponível em: www.yieldgap.org/. No Brasil, esse projeto é liderado pela Equipe FieldCrops/UFSM, juntamente com a ESALQ/USP, UFG e a EMBRAPA Arroz e Feijão.

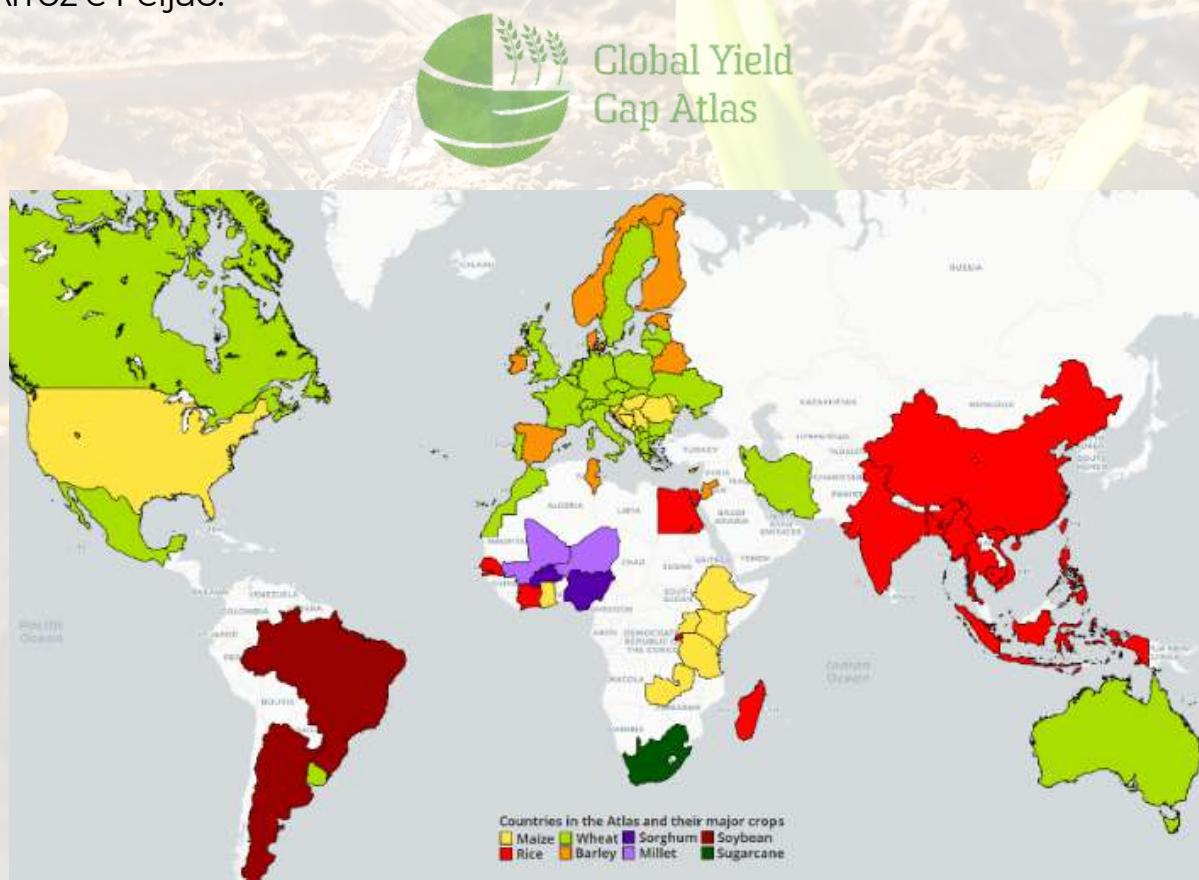


Figura 1. Países que fazem parte do GYGA e sua principal cultura agrícola (cor). Milho (amarelo), arroz (vermelho claro), trigo (verde claro), cevada (laranja), sorgo (roxo escuro), milheto (roxo claro), soja (vermelho escuro) e cana-de-açúcar (verde escuro). Fonte: GYGA (www.yieldgap.org/).

POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE

O potencial de produtividade (Pp) é a produtividade obtida se a cultura não sofrer limitação por água, nutrientes e não ocorrer a interferência de fatores bióticos (p.ex.: artrópodes-praga, doenças e plantas daninhas) e abióticos (p.ex.: ventos fortes, granizo e geada) durante todo o ciclo (Figura 2.1). O Pp é definido por fatores ambientais (a quantidade de radiação solar disponível, temperatura e a concentração de CO₂) e sua interação com o material genético utilizado. Por isso, data de semeadura e escolha do híbrido são fatores controlados pelos agricultores e que contribuem para a definição do potencial de produtividade das lavouras (Silva et al., 2022).

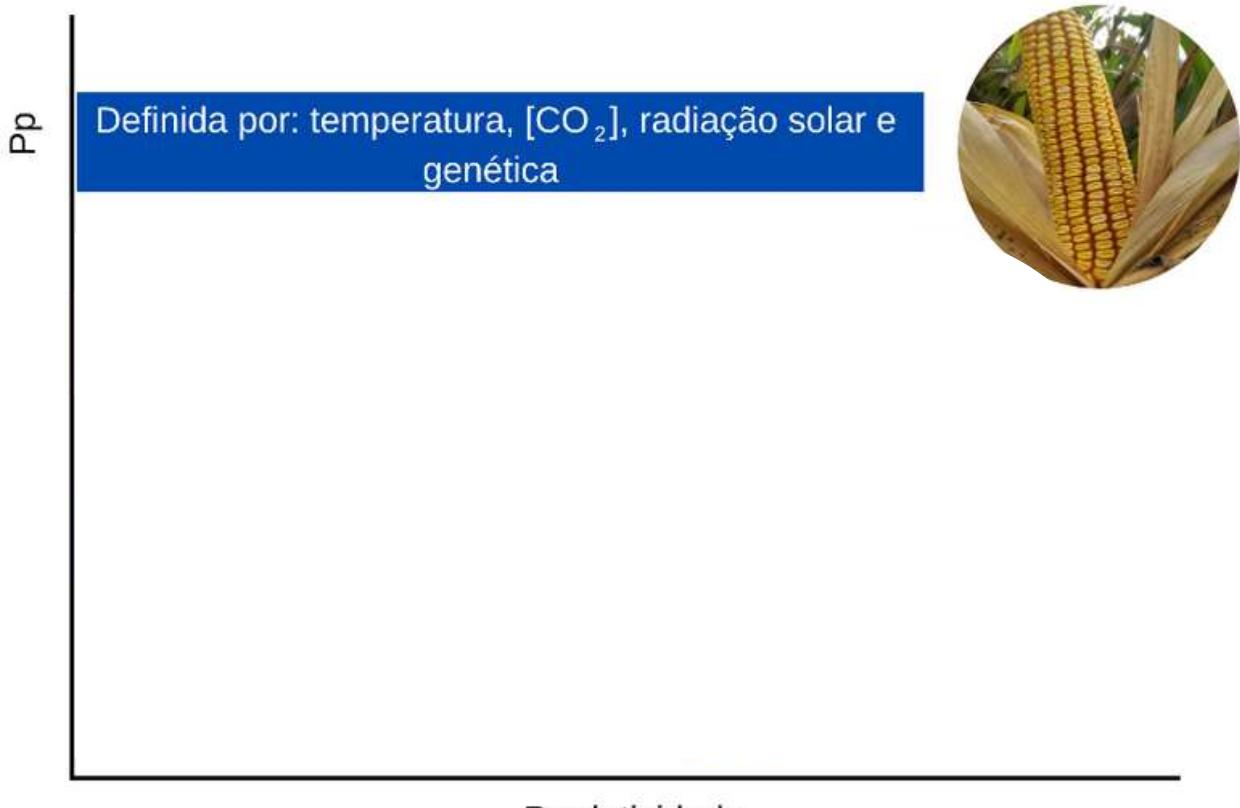


Figura 2.1. Fatores que definem o potencial de produtividade (Pp).

Os fatores que limitam o potencial de produtividade das culturas são água e nutrientes (Figura 2.2). Ou seja, P_{pa} é o potencial de produtividade de acordo com a disponibilidade e distribuição de água e nutrientes que existe durante o ciclo da cultura. Considerando que grande parte das lavouras de milho de Santa Catarina são em condições de sequeiro, neste livro iremos explorar o potencial de produtividade limitado por água (P_{pa}). Para identificar o P_{pa} também precisamos considerar a quantidade e distribuição da chuva, além de características de solo que governam a capacidade de armazenamento de água no solo (Van Ittersum et al., 2013). Assim, junto com a escolha da data de semeadura e do híbrido, a irrigação e as práticas de manejo que modificam a capacidade do solo de armazenar água são formas de alterar o P_{pa} da lavoura. Conhecer o potencial de produtividade (para lavouras irrigadas) e o potencial de produtividade limitado por água (para lavouras de sequeiro) possibilita um melhor planejamento do investimento de insumos, pois eles nos orientam em relação a produtividade máxima que pode ser obtida nas lavouras.

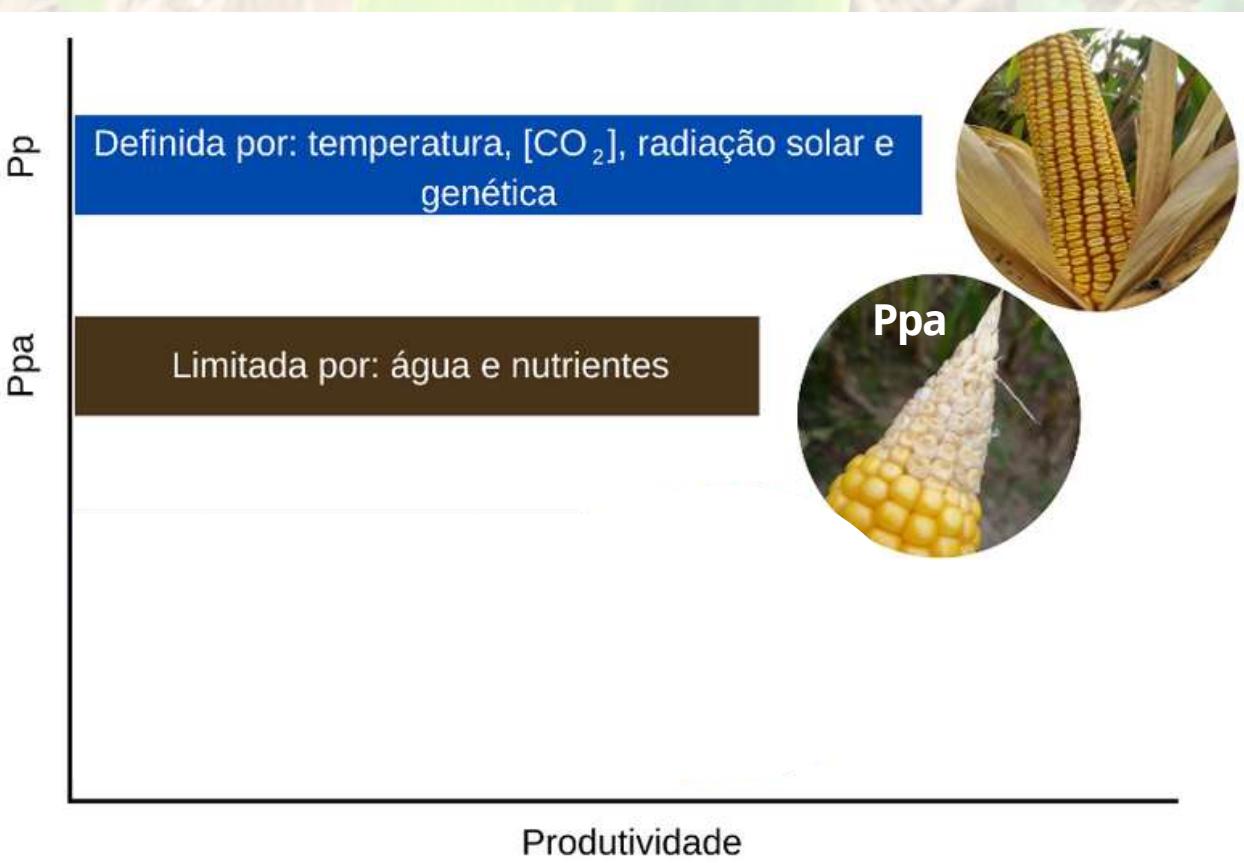


Figura 2.2. Fatores que definem o potencial de produtividade (Pp) e limitam o potencial. A imagem ao lado da barra marrom ilustra o potencial de produtividade limitado por água (P_{pa}).

Por fim, temos os fatores que reduzem a produtividade (Figura 2.3). Atingir o Pp (para lavouras irrigadas) ou o Ppa (para lavouras de sequeiro) não é viável a nível comercial, pois exigiria uma intensidade de práticas de manejo que tornaria a produção insustentável ambientalmente e economicamente, onde seria necessário controlar com excelência todos os fatores que possam reduzir a produtividade. Por isso, consideramos que a produtividade atingível (Pat) em lavouras está entre 70 e 85% do Pp ou Ppa (respectivamente para lavouras irrigadas e de sequeiro), de acordo com o acesso a insumos, mercado e informação técnica (Lobell et al., 2009; Van Ittersum, 2013; Monzon et al., 2021).

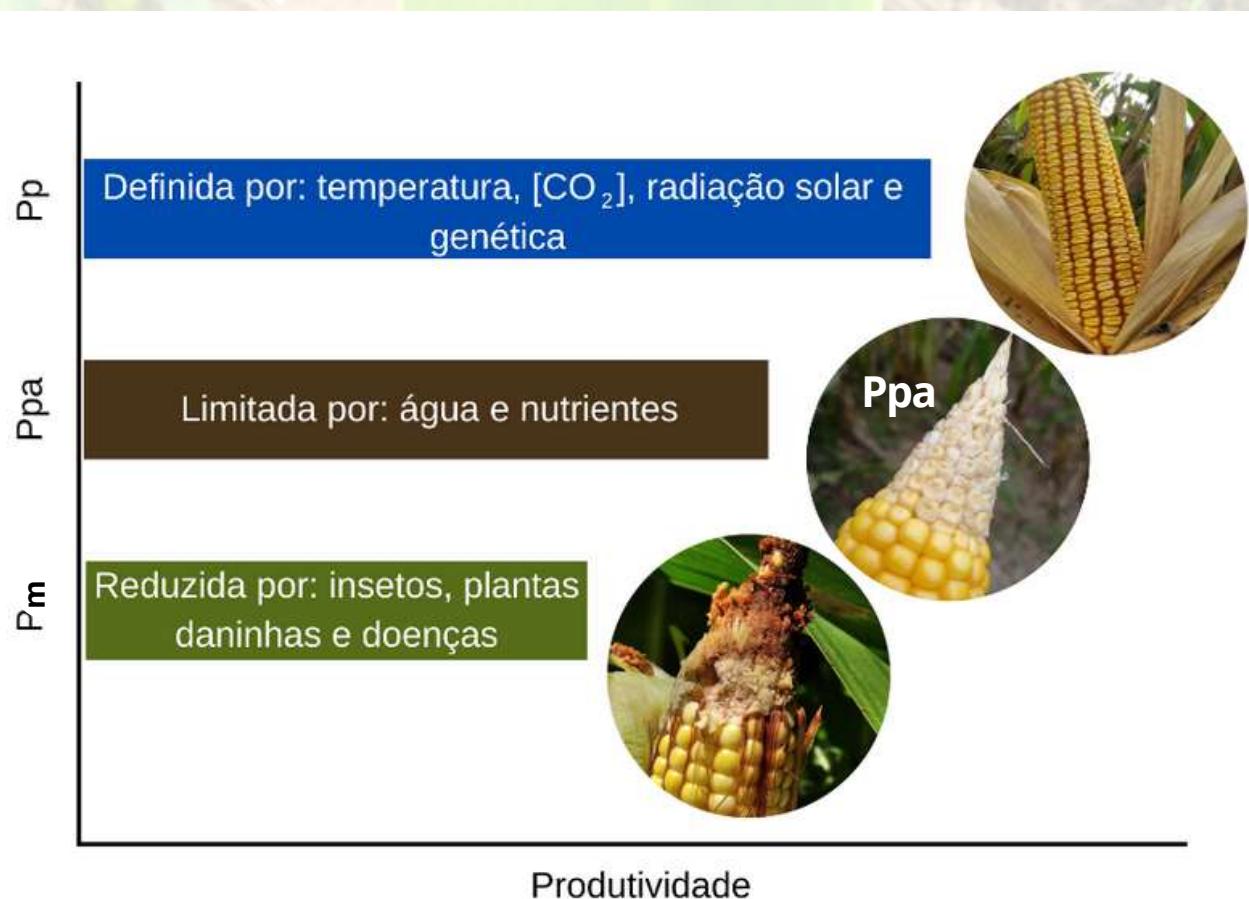


Figura 2.3. Fatores que definem o potencial de produtividade (Pp), limitam o potencial e exemplos de fatores que reduzem a produtividade das lavouras (Pm). A imagem ao lado da barra marrom ilustra o potencial de produtividade limitado por água (Ppa).

LACUNAS DE PRODUTIVIDADE

Lacuna de produtividade é a diferença entre os distintos níveis de produtividade. Na Figura 3 apresentamos os principais níveis de lacunas de produtividade.

$$\text{Lacuna de produtividade total (Lpt)} = Pp - Pm$$

$$\text{Lacuna de produtividade por água (Lpa)} = Pp - Ppa$$

$$\text{Lacuna de produtividade por manejo (Lpm)} = Ppa - Pm$$

$$\text{Lacuna de produtividade atingível (Lpat)} = Pat (75\% \text{ do Ppa}) - Pm$$

Para Santa Catarina iremos apresentar a lacuna de produtividade atingível (Lpat), pois esse nível representa o quanto é possível aumentar a produtividade média do Estado. Porém, antes será apresentada uma breve contextualização sobre o potencial e as lacunas de produtividade de milho no mundo e no Brasil.

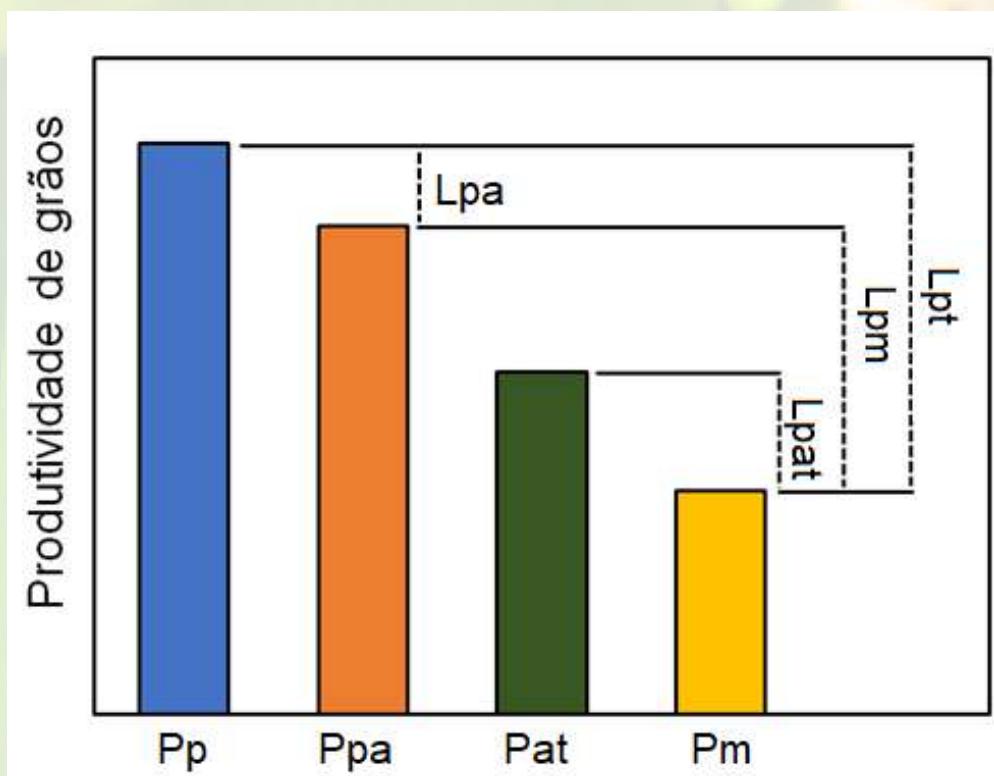


Figura 3. Representação do potencial de produtividade (Pp), potencial de produtividade limitado por água (Ppa), produtividade atingível (Pat), produtividade média (Pm), lacuna de produtividade por água (Lpa), total (Lpt), por manejo (Lpm) e atingível (Lpa).

POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE DE MILHO

NO MUNDO

O milho é uma das culturas mais produzidas no mundo devido à sua composição química, valor nutricional e alto potencial produtivo (Hou et al., 2020). Segundo o GYGA (www.yieldgap.org/), o potencial de produtividade de milho no mundo varia de 5 a 15 t/ha (Figura 4). A variabilidade do potencial de produtividade, assim como, da produtividade média de milho entre regiões e entre safras, está associada a variações nos recursos e no ambiente, principalmente radiação solar e precipitação (Lobell et al., 2009; Yang et al., 2021). Estados Unidos, China e Brasil são os maiores produtores mundiais de milho. Nesse cenário, o Brasil é o país com maior potencial para aumento da produção de forma vertical, já que possui a maior lacuna de produtividade, como veremos a seguir.

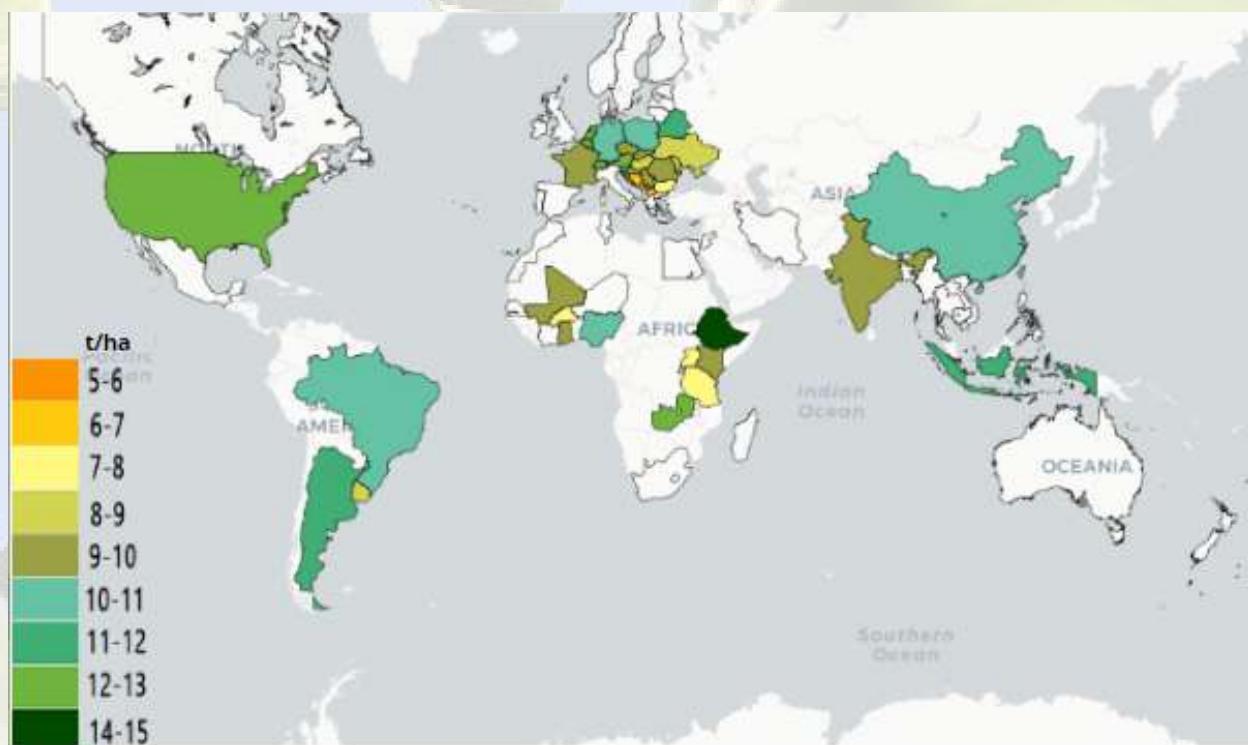


Figura 4. Potencial de produtividade de milho no mundo. Fonte: GYGA (www.yieldgap.org/). As cores indicam a variação do potencial de produtividade nos países.

LACUNA DE PRODUTIVIDADE DE MILHO NO MUNDO

Nos países em desenvolvimento, em geral, as lacunas de produtividade são maiores que nos países desenvolvidos (Figura 5). É, portanto, nesses locais que existem as maiores oportunidades de aumentar a produção de alimentos sem modificar a área de cultivo. Conhecer as lacunas de produtividade auxilia na identificação dos fatores que causam perdas de produtividade nas lavouras e, assim, na busca por estratégias específicas para aumentar a produtividade de cada local, possibilitando que os agricultores selezionem práticas que melhoram a lucratividade e a sustentabilidade da atividade agrícola (Water et al., 2015; Di Mauro et al., 2018; Agus et al., 2019; Deng et al., 2019). Na América do Sul, as lacunas de produtividade de milho estão associadas ao uso de genética inadequada para a região de cultivo, estresse hídrico e deficiência de nitrogênio, ou seja, da interação entre genética, ambiente e manejo (Andrea et al., 2018).

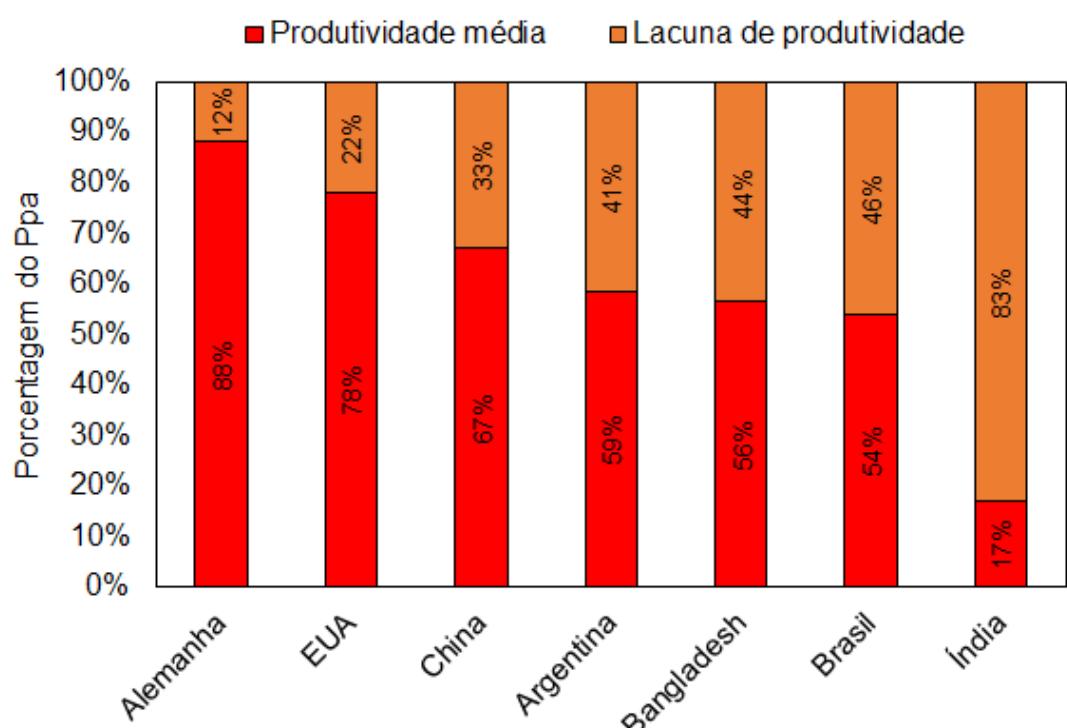


Figura 5. Produtividade média e lacuna de produtividade em porcentagem do potencial de produtividade limitado por água (Ppa) de milho para países desenvolvidos (Alemanha, EUA e China) e em desenvolvimento (Argentina, Bangladesh, Brasil e Índia). Fonte: Grassini et al., 2017.

POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE DE MILHO

NO BRASIL

O potencial de produtividade de milho, ou seja, quando a disponibilidade de água não é um fator limitante, para a primeira safra no Brasil varia de 13,6 a 17,8 t/ha (Ribeiro et al., 2020) (Figura 6). Os maiores Pp na primeira safra estão na região sul do Brasil, devido à maior incidência de radiação solar, uma vez que na região centro-oeste, esse período é marcado pela estação das chuvas, o que acarreta em mais dias nublados e, por consequência, menor disponibilidade de radiação solar para a cultura. Além disso, na região centro-oeste do país, as temperaturas noturnas são mais altas, aumentando o gasto energético da planta com respiração (Andrea et al., 2018). Na segunda safra, o Pp de milho no Brasil varia de 8,5 a 16,7 t/ha. A interação entre radiação solar, temperatura e ciclo é fundamental na definição do Pp. Mesmo havendo disponibilidade de radiação solar, se a temperatura não está dentro da faixa ideal para a fase de desenvolvimento da cultura, ocorre uma redução do Pp. O alto Pp de milho no Brasil indica uma ótima possibilidade para lavouras onde há condições para irrigação, já que é possível atingir altas produtividades de grãos por hectare agricultável.

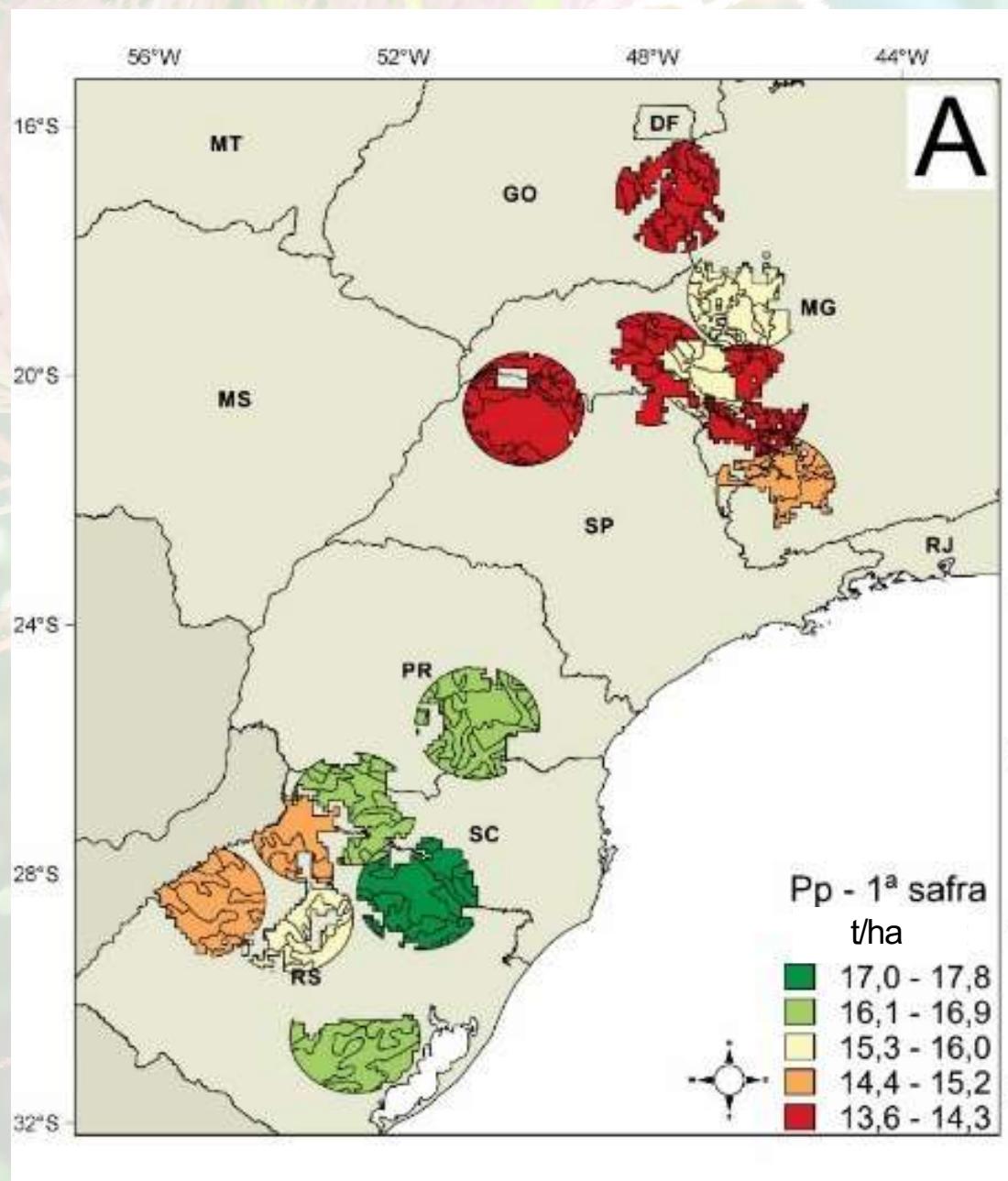


Figura 6A. Potencial de produtividade (Pp) para milho no Brasil na primeira safra. Fonte: Ribeiro et al., 2020.

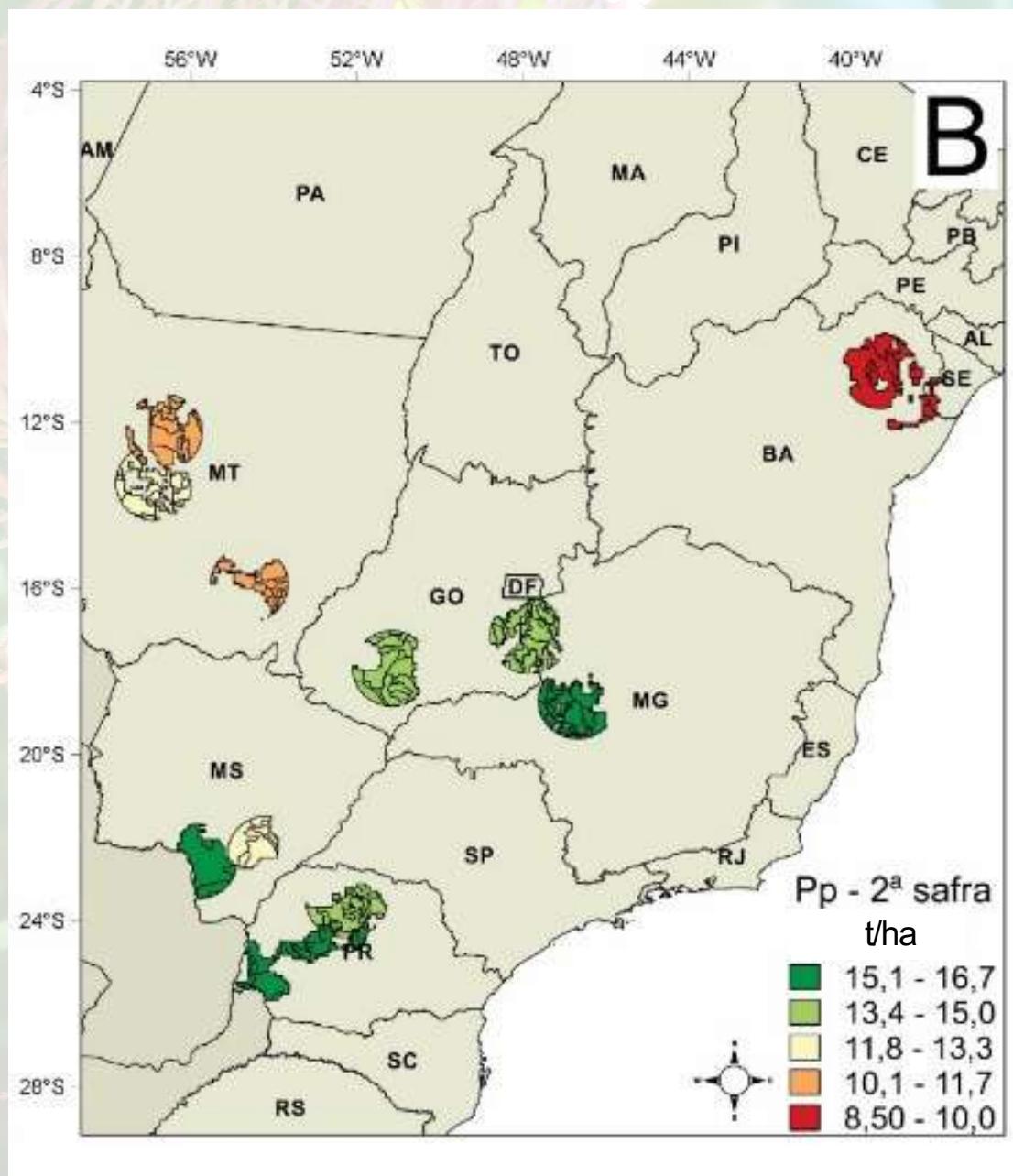


Figura 6B. Potencial de produtividade (Pp) para milho no Brasil na segunda safra. Fonte: Ribeiro et al., 2020.

POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE LIMITADO POR ÁGUA PARA MILHO NO BRASIL

Na primeira safra, o potencial de produtividade limitado por água para milho no Brasil varia de 5,7 a 15,1 t/ha, sendo os menores valores encontrados no sul do Brasil (Ribeiro et al., 2020) (Figura 7). Isso ocorre pois na região centro-oeste há uma melhor distribuição das chuvas durante essa estação de cultivo, o que não ocorre na região sul do Brasil. Na segunda safra, o potencial de produtividade limitado por água para milho varia de 2,1 a 12,6 t/ha. O Ppa na segunda safra é inferior devido à maior irregularidade na distribuição das chuvas, principalmente durante o enchimento de grãos, considerada a fase crítica para a cultura.

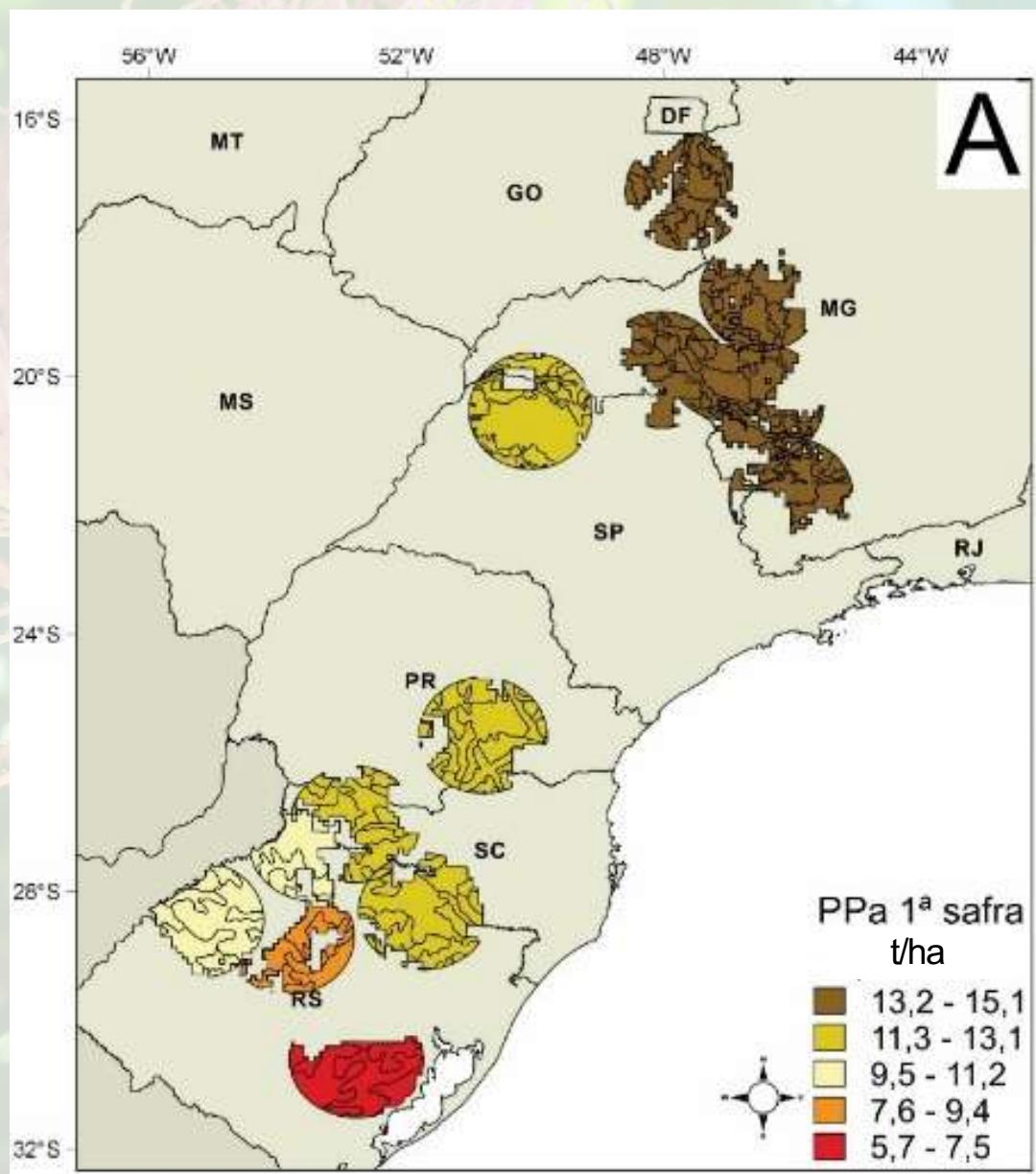


Figura 7A. Potencial de produtividade limitado por água (PPa) para milho no Brasil em primeira safra. Fonte: Ribeiro et al., 2020.

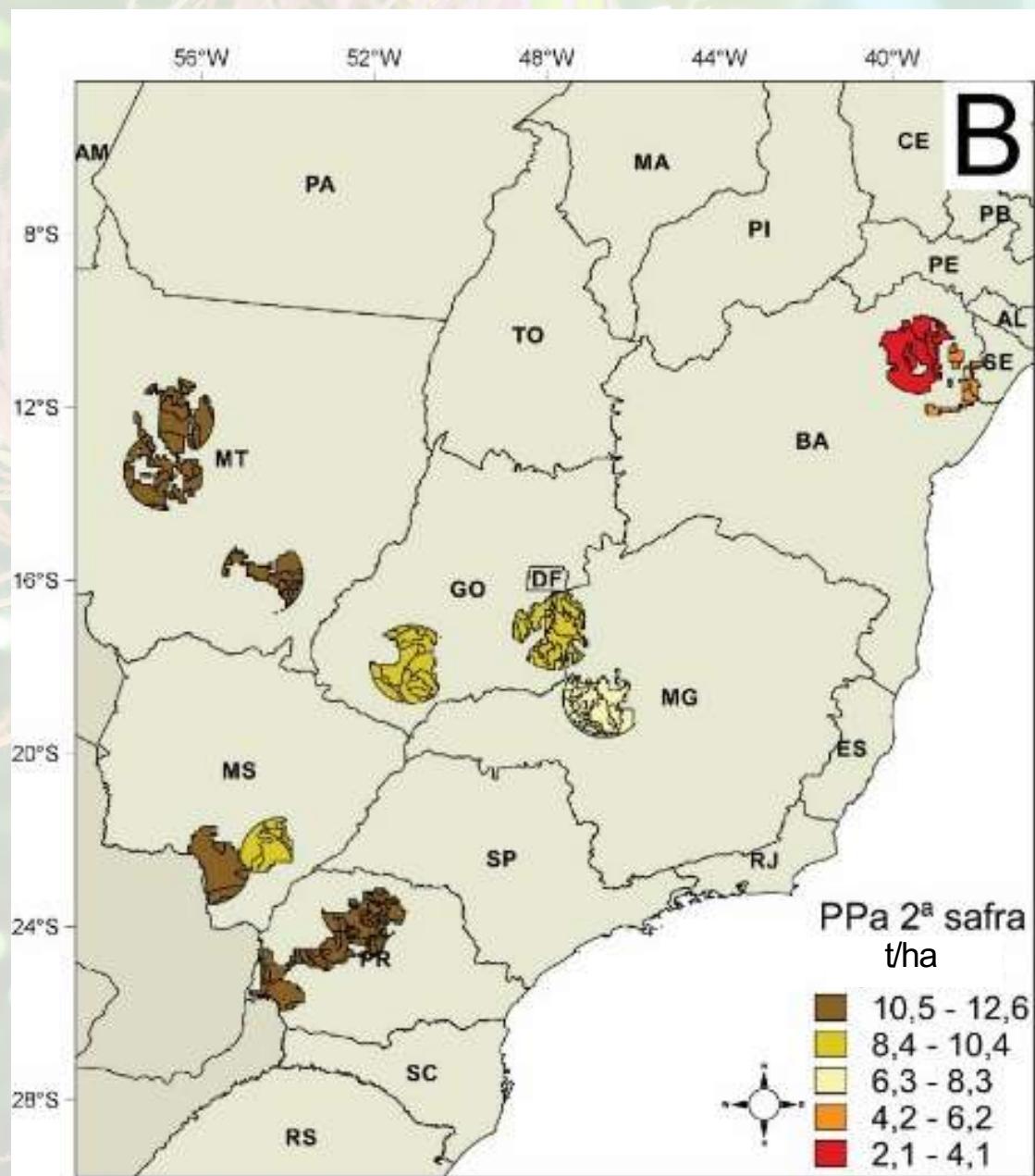


Figura 7B. Potencial de produtividade limitado por água (Ppa) para milho no Brasil em segunda safra. Fonte: Ribeiro et al., 2020.

LACUNAS DE PRODUTIVIDADE DE MILHO

NO BRASIL

A lacuna de produtividade por manejo para milho no Brasil (diferença entre o potencial de produtividade limitado por água e a produtividade média das lavouras) varia de 19 a 60% na primeira safra e de 30 a 61% na segunda safra. Os principais produtores na primeira safra são: Minas Gerais, Rio Grande do Sul, Paraná e Santa Catarina. Em Santa Catarina a Lm variou de 27 a 42% (Figura 8). No entanto, poucos locais de Santa Catarina foram avaliados nesse estudo.

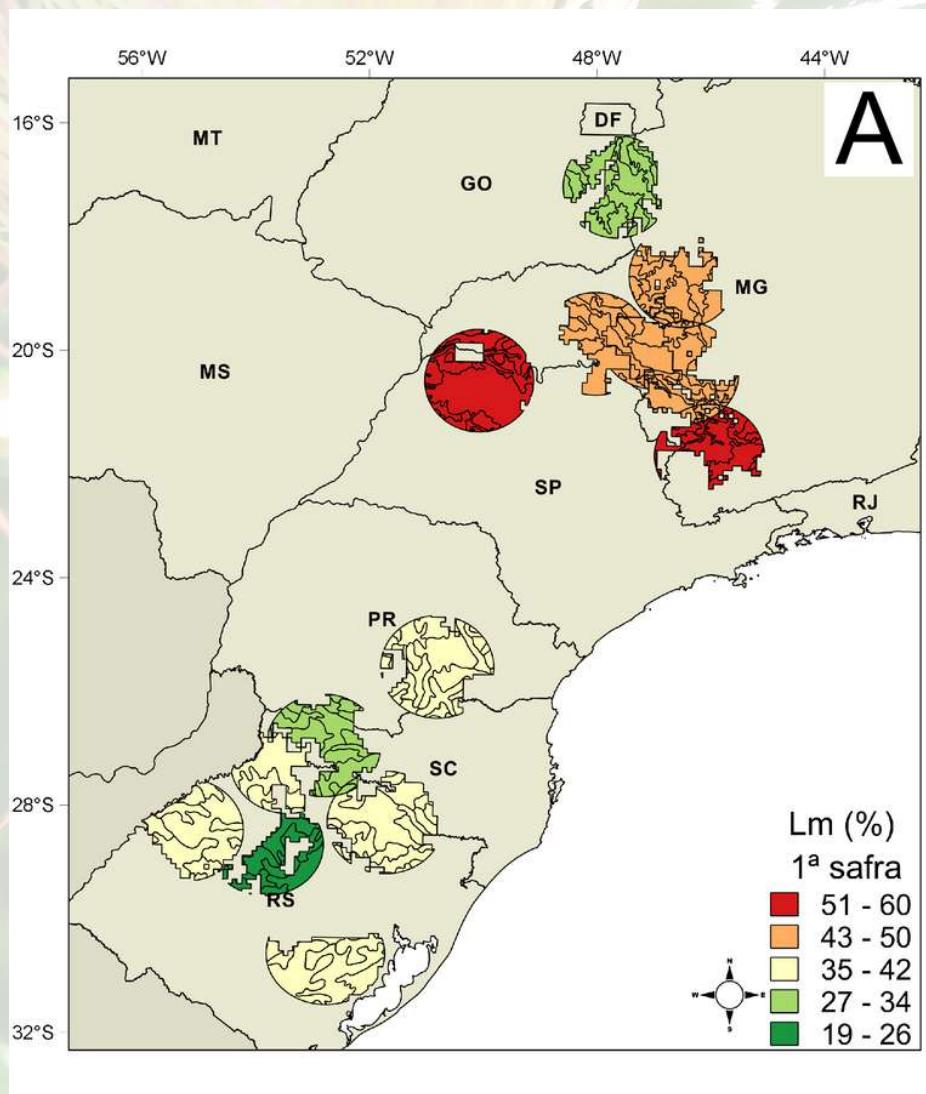


Figura 8A. Lacuna de produtividade de manejo (Lm) (potencial de produtividade limitado por água - produtividade média) do milho na primeira safra no Brasil. Fonte: Ribeiro et al. 2020.

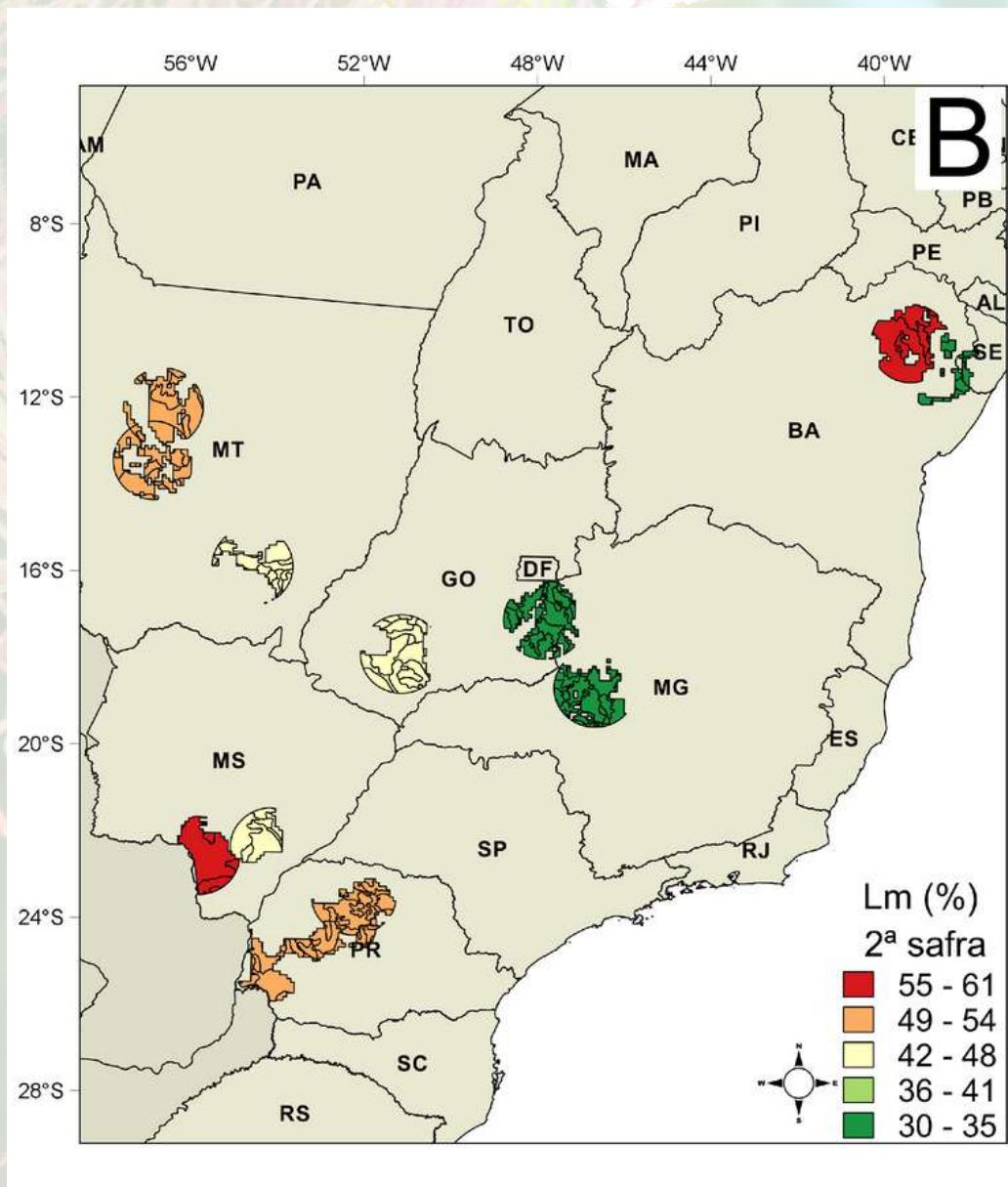


Figura 8B. Lacuna de produtividade de manejo (Lm) (potencial de produtividade limitado por água - produtividade média) do milho na segunda safra no Brasil. Fonte: Ribeiro et al. 2020.

PRODUÇÃO DE MILHO EM SANTA CATARINA

O Brasil é um importante produtor de grãos e carne, sendo o maior exportador de carne de frango e o quarto maior exportador mundial de carne suína (EMBRAPA, 2022). Em 2022, Santa Catarina foi o maior exportador de carne suína e o segundo maior exportador de carne de frango do Brasil, sendo responsável por 52% e 23% das exportações nacionais desses produtos, respectivamente. Devido à grande produção animal de Santa Catarina, em 2020 o consumo interno de milho foi 66% superior a produção do Estado (EPACRI, 2021). Apesar da lacuna de produtividade apresentada anteriormente de até 41%, nas últimas décadas, a produtividade média de milho vem crescendo (Figura 9), com ressalva ao ano agrícola de 2020/2021, onde houve uma queda na produtividade explicada pela forte estiagem como consequência da fase negativa do Fenômeno ENOS (La Niña), e pelo aumento na ocorrência da cigarrinha-do-milho.

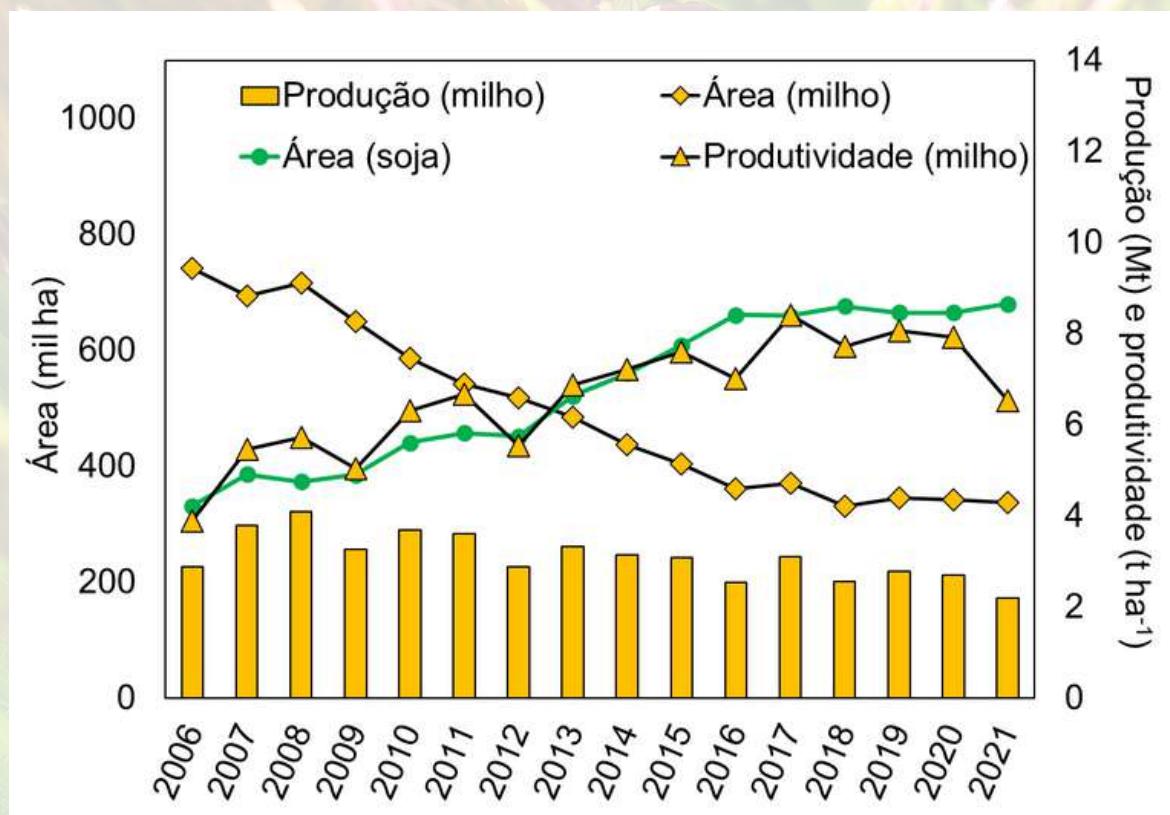


Figura 9. Produção, produtividade e área colhida de milho em Santa Catarina de 2006 a 2021. Área colhida com soja em Santa Catarina de 2006 a 2021. Fonte: SIDRA/IBGE (sidra.ibge.gov.br/tabela/6588)

No entanto, percebemos uma redução na área colhida de milho proporcional ao aumento da área colhida com soja, o que impacta em queda na produção de milho no Estado. Isso ocorre, principalmente, devido a valorização do preço da soja e às oscilações no preço do milho. O déficit de produção de milho em Santa Catarina é atendido pelas importações interestaduais (Mato Grosso do Sul e Paraná, principalmente) ou de outros países, como Paraguai e Argentina. Dessa maneira, aumenta os custos de produção e o impacto ambiental das agroindústrias, uma vez que o transporte está entre os três principais emissores de CO₂ equivalente da produção de grãos (Marin et al., 2022).

A partir disso, a Equipe FieldCrops da UFSM e a Epagri, através de acordo de cooperação técnica firmado para execução do projeto "Potencial e Lacunas de Produtividade do Milho em Santa Catarina", estimaram o potencial de produtividade e as lacunas de produtividade das principais regiões produtoras de milho do Estado, buscando identificar as regiões de Santa Catarina com maior potencial de aumento vertical da produção de milho. Além disso, através da análise de dados coletados diretamente nas lavouras de milho de Santa Catarina, por extensionistas da Epagri, foi possível identificar quais os fatores de manejo diferenciam as lavouras de altas produtividades e as lavouras de baixas produtividades de milho. Os principais resultados desse projeto serão discutidos a seguir.



ZONAS CLIMÁTICA NA ÁREA DE CULTIVO DE MILHO EM SANTA CATARINA

Seguindo a metodologia do Projeto *Global Yield Gap Atlas*, foram selecionadas as zonas de similaridade climática representativas da área de produção de milho em Santa Catarina (Figura 10). Nessa metodologia, zonas de similaridade climática que cobrem menos de 5% da área colhida com a cultura não foram consideradas. Essas zonas indicam regiões semelhantes quanto a: 1) Graus-dias; 2) Índice de aridez (precipitação média anual/evapotranspiração potencial média anual); e 3) Sazonalidade da temperatura, considerando, assim, fatores relacionados a duração do ciclo da cultura (acúmulo de unidades térmicas), limitação por água e amplitude térmica. Essa classificação existe para todo o globo onde há o cultivo de pelo menos uma das principais culturas alimentares (milho, arroz, trigo, painço, cevada, soja, mandioca, batata, inhame, batata doce, banana, amendoim, feijão-comum e outras leguminosas, beterraba açucareira, cana-de-açúcar), possibilitando que sejam comparadas áreas ao redor do mundo que tenham similaridade climática.

Como exemplo, vamos utilizar a zona de similaridade climática 5801 (5-8-01). O 5 representa a faixa de graus-dias, o 8 representa a faixa de índice de aridez e o 01, a faixa de sazonalidade da temperatura. Podemos perceber que existem quatro faixas de graus dias em Santa Catarina, duas faixas de índice de aridez (regiões com índice de aridez 9, na média, tem maior disponibilidade de água do que regiões com índice de aridez 8) e todas as regiões estudadas em Santa Catarina apresentam similaridade quanto a sazonalidade da temperatura. Os valores que cada faixa representada podem ser consultados através do site: www.yieldgap.org/web/guest/climate-zones.

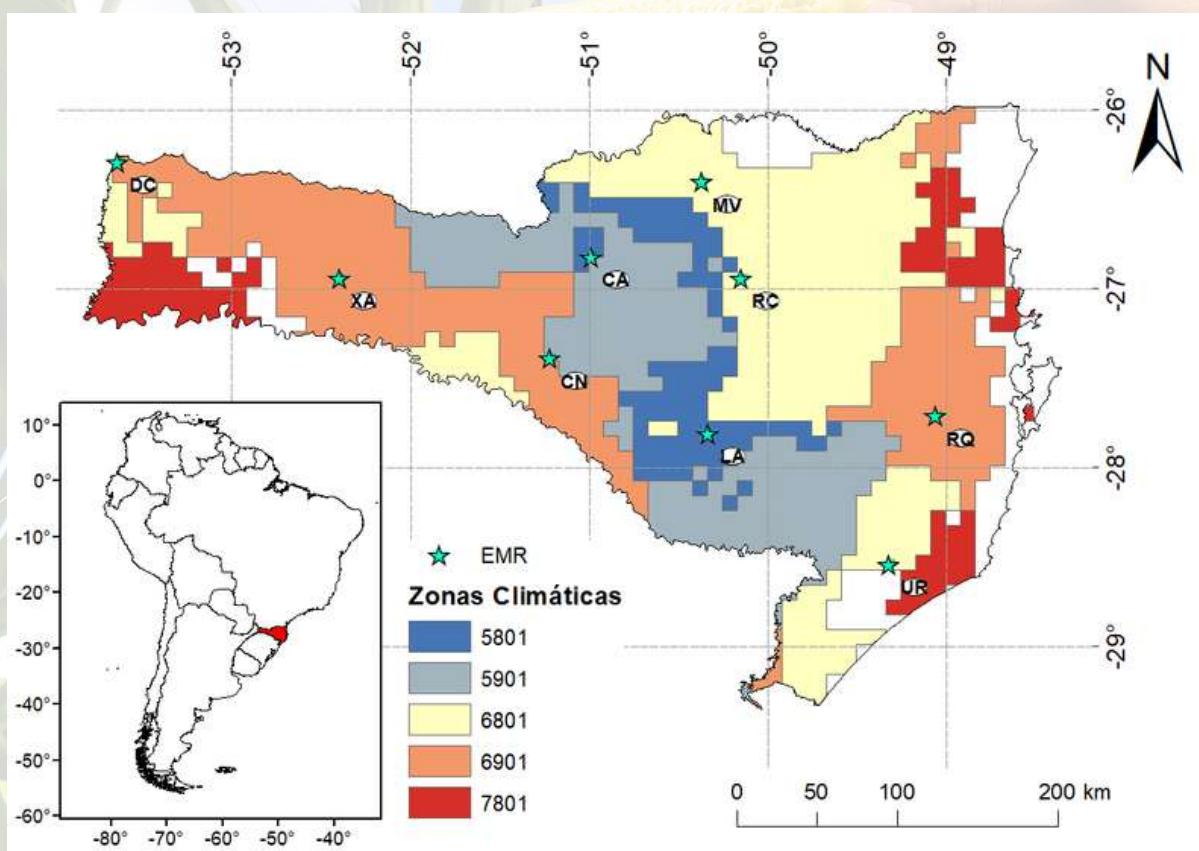


Figura 10. Zonas de similaridade climática com área de colheita de milho superior a 5%, que somadas cobrem 89% da área de produção de milho em Santa Catarina.



Após definir as zonas de similaridade climática presentes no Estado e que cobrem mais de 5% da área de colheita, foram selecionadas estações meteorológicas de referência (EMR). Considera-se que os dados meteorológicos dessas estações representam as condições meteorológicas de locais que estejam dentro de um raio de 100 quilômetros de distância, desde que dentro da mesma zona de similaridade climática. Assim, nós selecionamos nove estações meteorológicas de referência em Santa Catarina (Figura 11). O raio de 100 quilômetros no entorno da EMR e dentro de uma mesma zona de similaridade climática é chamado de *Buffer Zone* e deve representar mais de 2% da área de colheita de milho no Estado. Juntas, as nove *Buffers Zones* selecionadas cobrem 63% da área colhida com milho em Santa Catarina.

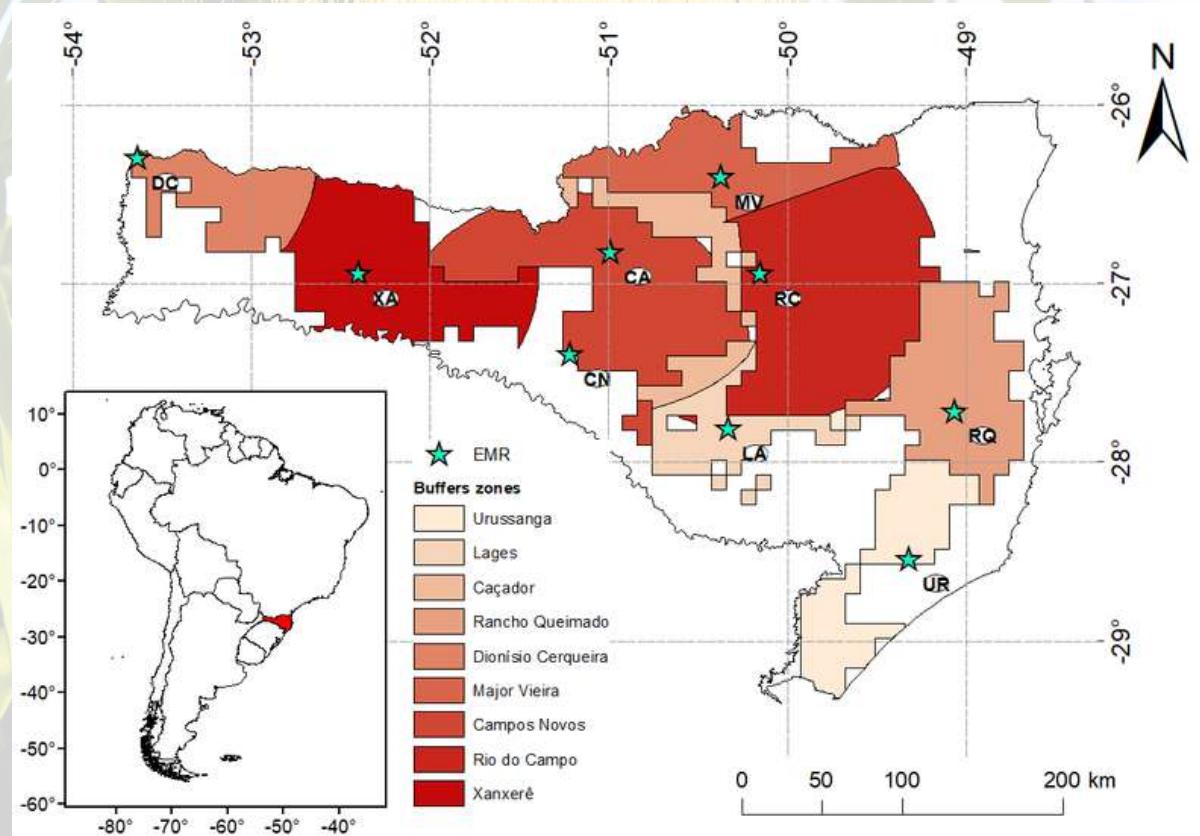


Figura 11. Localização das *Buffers Zones* selecionadas para a área de colheita de milho em Santa Catarina.

Pesquisas realizadas diretamente nas lavouras é a forma mais robusta de estimar a produtividade média atual das culturas e os fatores que explicam as lacunas de produtividade (Grassini et al., 2014, 2015; Edreira et al., 2017). Por isso, as práticas de manejo realizadas desde antes da semeadura até a colheita, características edáficas e a produtividade das lavouras de milho de Santa Catarina foram acompanhadas através de questionários durante duas safras (2020/2021 e 2021/2022). Durante essas duas safras, os extensionistas da Epagri acompanharam 293 lavouras de produção de grãos de milho, distribuídas em diferentes regiões do Estado (Figura 12). Além disso, durante essas duas safras foram conduzidos experimentos em condições potenciais (sem estresses bióticos e abióticos), na EPAGRI/CEPAF, em Chapecó, com híbridos de milho de ciclo precoces, superprecoces e hiperprecoces, mais utilizados no Estado.

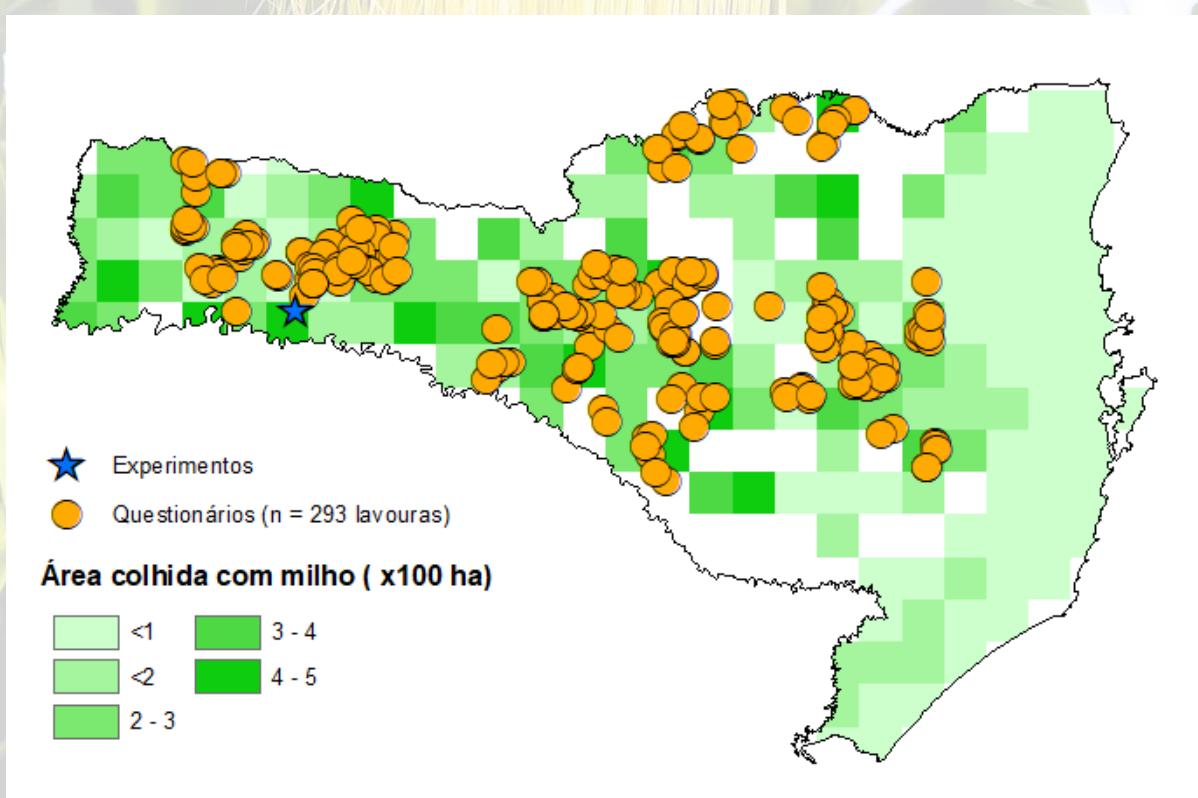


Figura 12. Localização das 293 lavouras acompanhadas em Santa Catarina durante as safras 2020/2021 e 2021/2022 (círculos amarelos) e dos experimentos conduzidos em condição potencial (estrela).

FERRAMENTAS E DADOS PARA ESTIMATIVA DOS POTENCIAIS DE PRODUTIVIDADE

Os dados dos experimentos serviram como forma de avaliar a capacidade do modelo baseado em processos *Hybrid-Maize* em simular a produtividade de grãos de milho em Santa Catarina. O *Hybrid-Maize* é um modelo de simulação do crescimento, desenvolvimento e produtividade para a cultura do milho. Modelos são representações simplificadas da realidade e auxiliam na identificação dos principais fatores que podem influenciar os cultivos (Soltani; Sinclair, 2011). Modelos baseados em processos são as ferramentas mais indicadas e aceitas na comunidade científica para estimar o potencial de produtividade de culturas agrícolas (Lobell et al., 2009).

Utilizando a soma térmica de 1711, 1634 e 1488 °C dia para os ciclos precoce, superprecoce e hiperprecoce, respectivamente, realizamos simulações com o *Hybrid-Maize*, utilizando os dados meteorológicos de cada safra para Chapecó, bem como a data de semeadura e densidade de semeadura. Cada ponto na Figura 13 representa os valores observados e simulados de produtividade. Quanto mais próximos da linha denominada 1:1, mais próximo o valor simulado está do observado. Pontos abaixo da linha 1:1 indicam que o modelo subestimou a produtividade e pontos acima da linha representam uma super estimativa por parte do modelo. Os valores de raiz quadrada média do erro (RQME) indicam, para cada um dos ciclos, a diferença média entre os valores simulados e observados (2,6, 1,7 e 0,9 t/ha, respectivamente para precoce, superprecoce e hiperprecoce). Nos Estados Unidos, onde o modelo foi desenvolvido, o RQME variou de 1,2 a 2,0 t/ha (Sandhu; Irmak, 2020). Assim, consideramos que ele teve boa capacidade preditiva do potencial de produtividade de milho em Santa Catarina.,

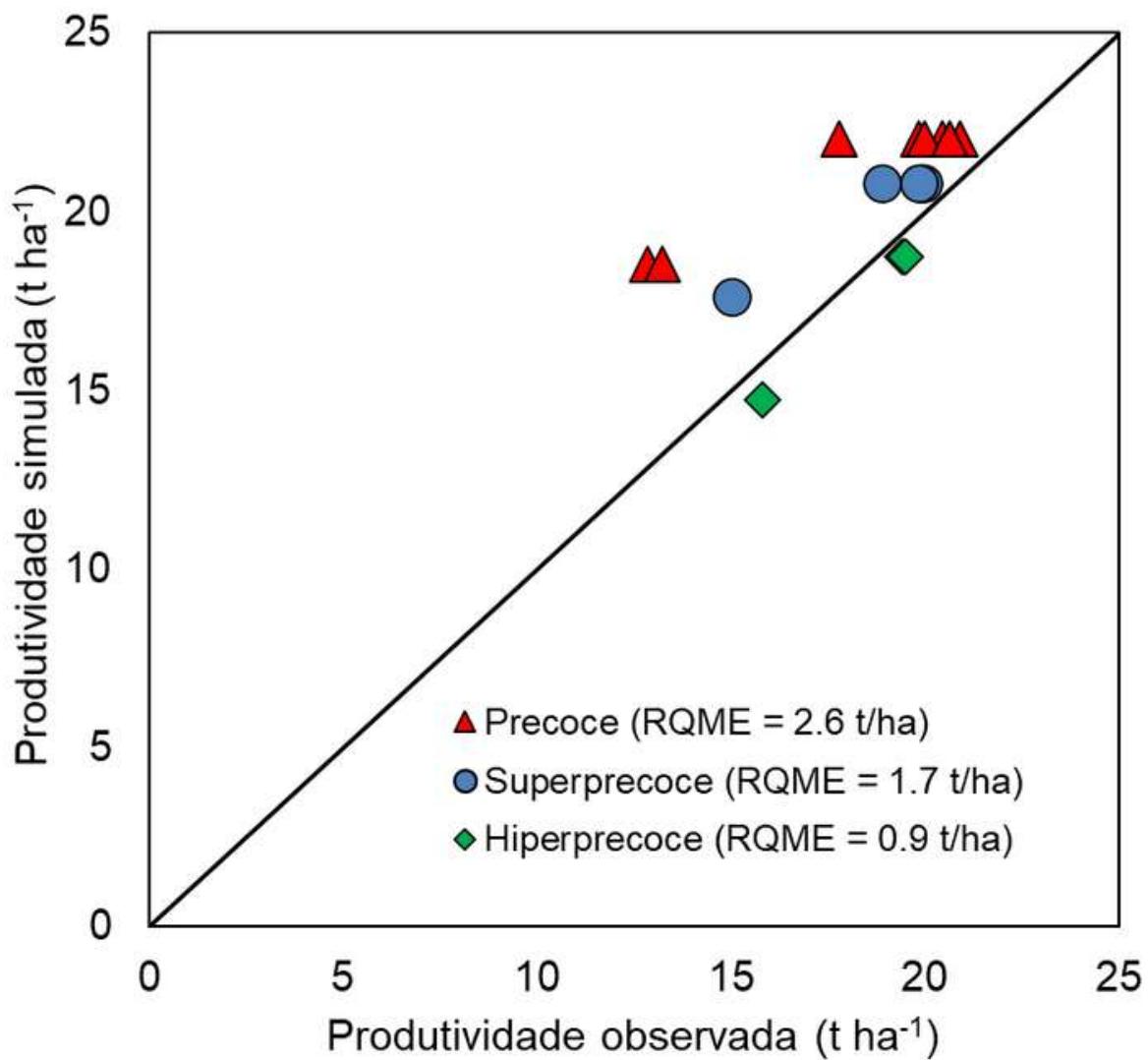


Figura 13. Produtividade simulada e observada de milho em experimentos potenciais conduzidos em Chapecó/SC. O triângulo representa híbridos do ciclo precoce, o círculo para híbridos superprecoce e o losango para híbridos hiperprecoce. RQME é a raiz quadrada média do erro.



Para que a estimativa dos potenciais seja confiável e represente a realidade das regiões em diferentes anos, é recomendado que sejam utilizados dados meteorológicos de 15 anos (Grassini et al., 2015). Para realizar as simulações com o *Hybrid-Maize* são necessários dados de temperatura máxima, temperatura mínima, radiação solar, precipitação, velocidade do vento, umidade relativa. Os dados meteorológicos utilizados nesse estudo foram recuperados das nove estações meteorológicas de referência, que fazem parte da rede de estações meteorológicas da EPAGRI/CIRAM (Epagri, 2020). Na Figura 14 apresentamos os valores médios de 2005 a 2020 para temperatura máxima, temperatura mínima, radiação solar, precipitação e evapotranspiração para as estações meteorológicas de referência de Caçador (CA), Campos Novos (CN), Dionísio Cerqueira (DC), Lages (LA), Major Vieira (MV), Rancho Queimado (RQ), Rio do Campo (RC), Urussanga (UR) e Xanxerê (XA).



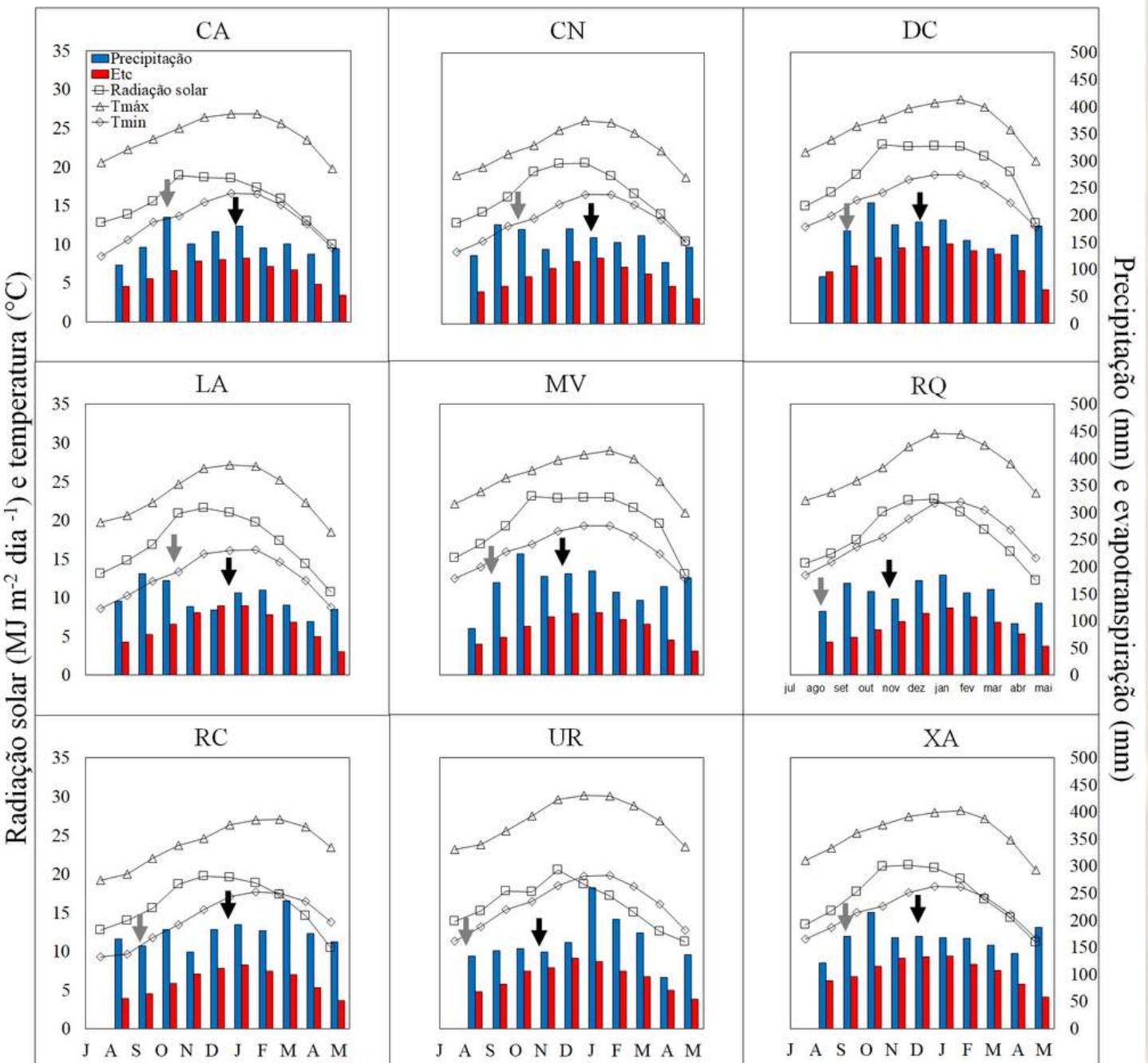


Figura 14. Média de 15 anos (2006 a 2020) da radiação solar incidente média, temperatura máxima (Tmax), temperatura mínima (Tmin), precipitação e evapotranspiração total para as nove Estações Meteorológicas de Referência (EMR) e *Buffers Zones* (BZs). As setas cinza e preta, dentro de cada painel, indicam, respectivamente, o mês de semeadura médio da região e o mês que ocorreu o florescimento da cultura (R1).

Além dos dados meteorológicos, o *Hybrid-Maize* utiliza dados de entrada relacionado ao manejo da cultura (ciclo de desenvolvimento, data de semeadura e densidade de semeadura) e dados de solo. Esses dados devem representar o sistema de cultivo de cada região, visando uma estimativa mais realista. Nós utilizamos o ciclo de desenvolvimento e a densidade de semeadura representativos do cultivo na região e a data de semeadura determinada quando 50% da área de milho estava semeada (Figura 15). Estas informações foram obtidas em reuniões com engenheiros-agrônomos especialistas da Epagri na cultura do milho em cada local, bem como, através de dados de estatísticas públicas divulgados pela Epagri através dos Boletins Agropecuários (mais informações em: cepa.epagri.sc.gov.br/index.php/publicacoes/boletim-agropecuario/).

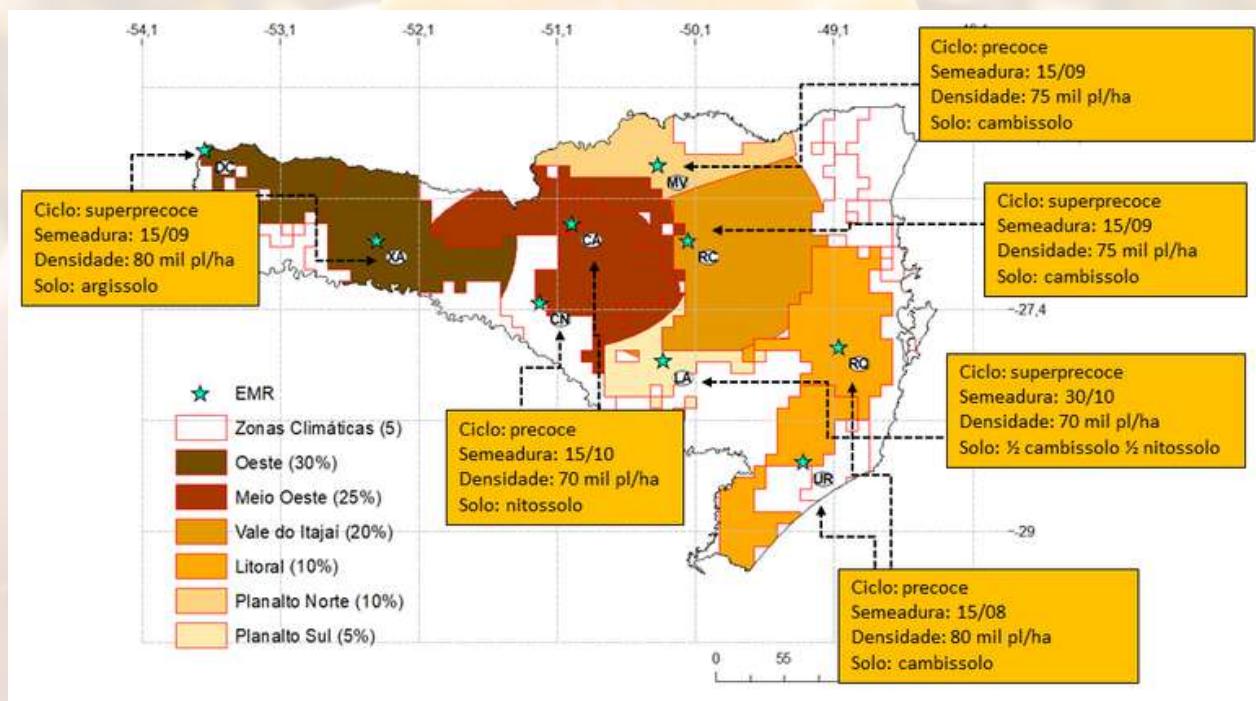


Figura 15. Ciclo de desenvolvimento, data e densidade de semeadura e classificação do solo de cada uma das regiões de estudo. A porcentagem entre parêntese indica o quanto da área colhida com milho e coberta pelas buffers zones está em cada uma das regiões.

POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE DE MILHO EM SANTA CATARINA

O potencial de produtividade de milho em Santa Catarina (média de 15 anos) variou de 14,7 a 20,0 t/ha entre as regiões (Figura 16). As buffers zones de abrangência das estações meteorológicas de referência de Caçador (CA) e Campos Novos (CN) tiveram os maiores potenciais de produtividade. O menor potencial de produtividade foi na *buffer zone* representada pela estação de Urussanga (UR). Provavelmente, por sua localização geográfica, Urussanga possui uma maior quantidade de dias nublados, explicando a menor radiação solar incidente. Além disso, a temperatura mínima (noturna) nesse região é alta durante a estação de cultivo, o que aumenta o gasto energético da planta com respiração, reduzindo o potencial de produtividade.

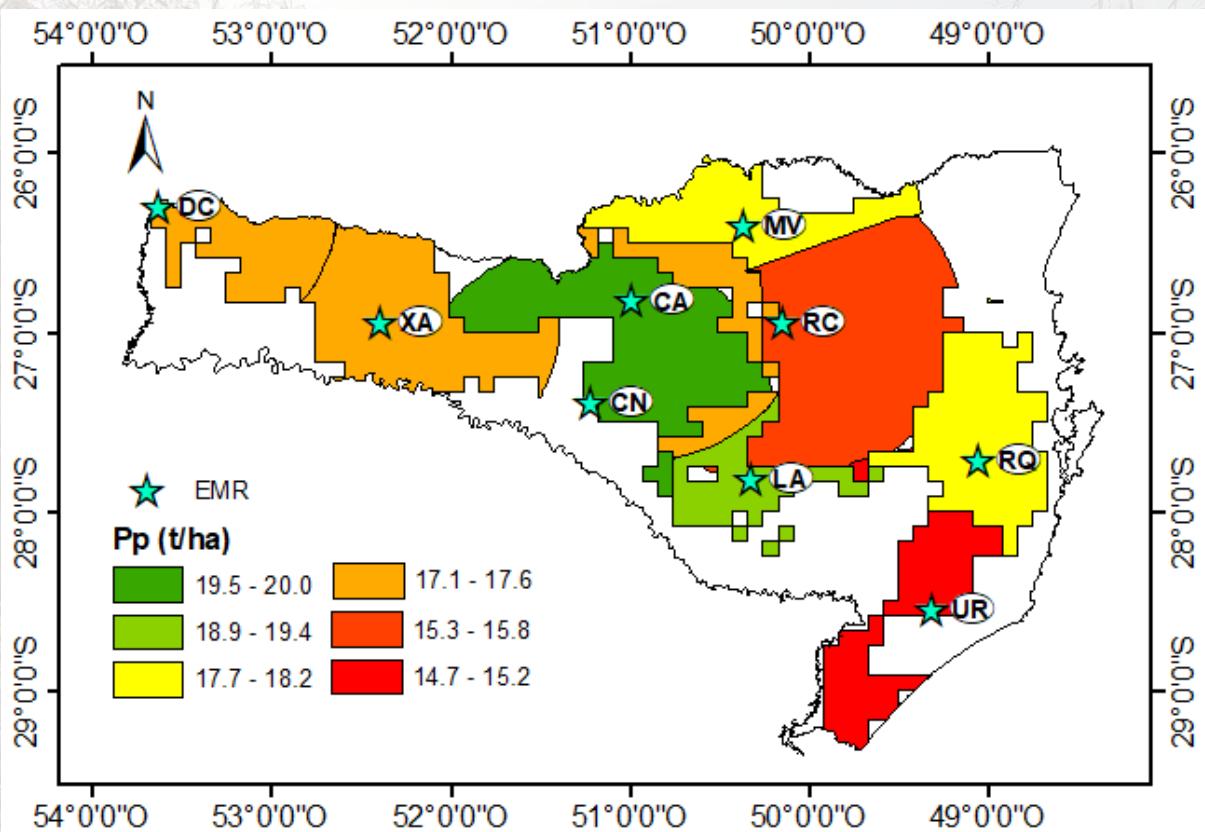


Figura 16. Potencial de produtividade (Pp) de milho em Santa Catarina (em toneladas por hectare).

POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE LIMITADO POR ÁGUA DE MILHO EM SANTA CATARINA

O potencial de produtividade limitado por água de milho em Santa Catarina variou de 9,9 a 17,0 t/ha, com coeficiente de variação de 12,5% entre as regiões (Figura 17). A *buffer zone* representada por Major Vieira (MV) teve o maior potencial de produtividade limitado por água, já o menor foi em Urussanga (UR).

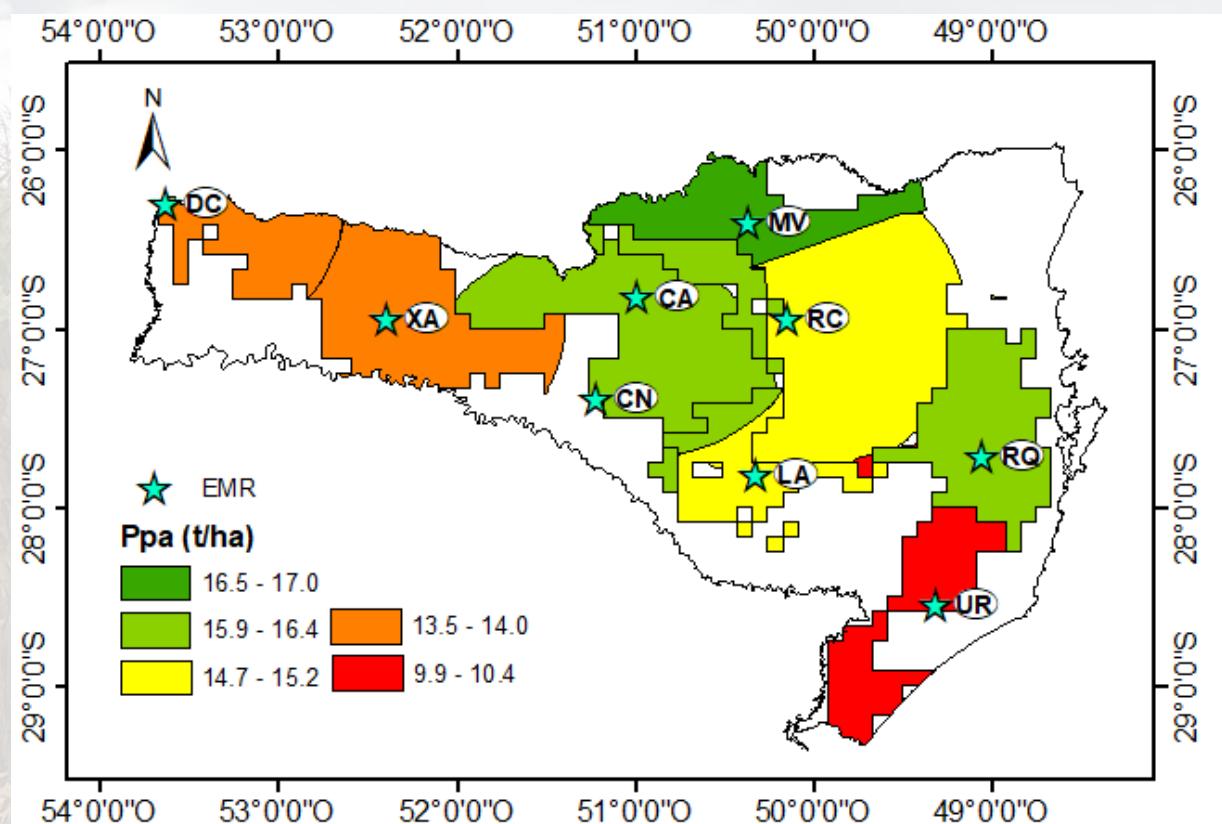


Figura 17. Potencial de produtividade limitado por água (Ppa) de milho em Santa Catarina (em toneladas por hectare).

PRODUTIVIDADE ATINGÍVEL DE MILHO EM SANTA CATARINA

Como a maioria das lavouras de milho de Santa Catarina são de sequeiro, nós consideramos como produtividade atingível 75% do potencial de produtividade limitado por água. Assim, a variação de Pat foi de 7,4 a 12,7 t/ha (Figura 18).

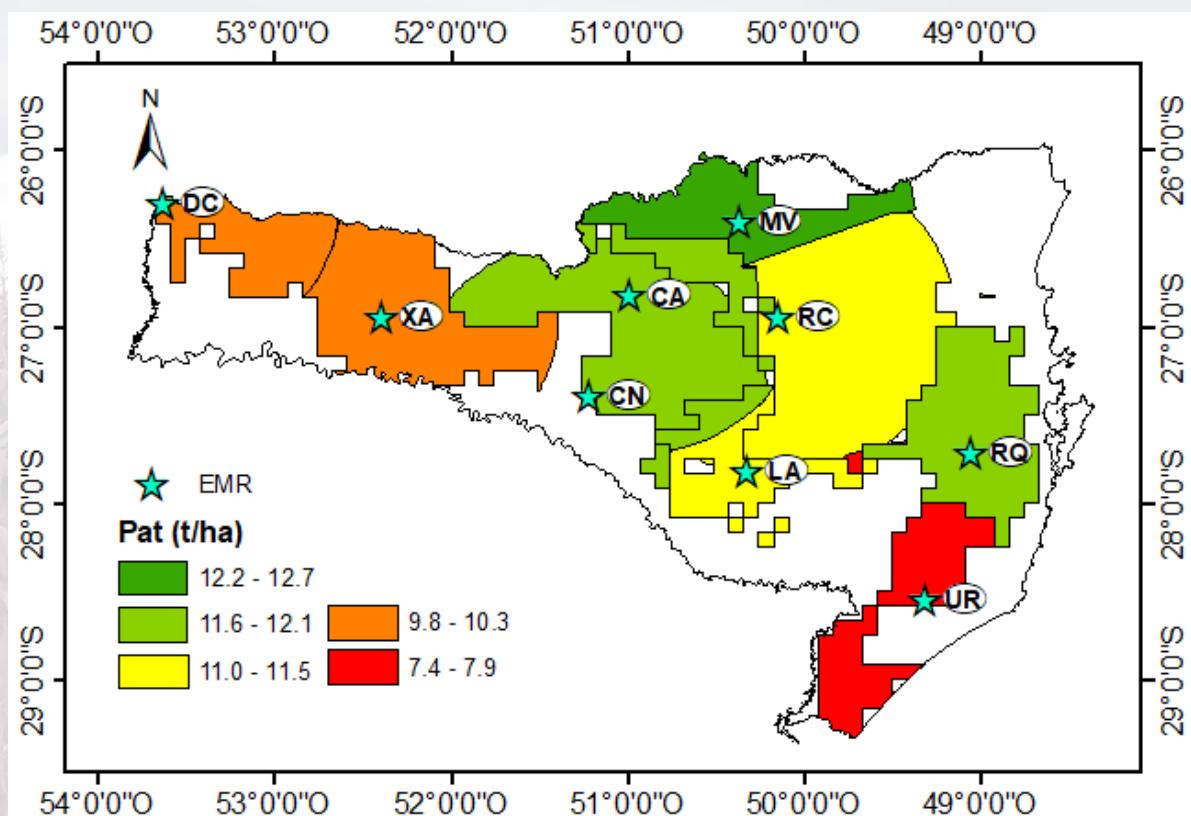
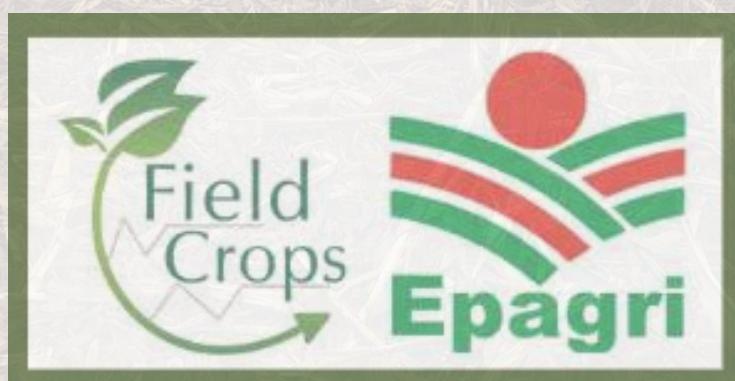


Figura 18. Produtividade atingível (Pat) de milho em Santa Catarina (em toneladas por hectare).



PRODUTIVIDADE MÉDIA DE MILHO EM SANTA CATARINA

Considerando os dados médios das últimas cinco safras (2017 - 2021) no Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a produtividade média de milho em Santa Catarina variou de 4,4 a 8,5 t/ha (Figura 19). A menor produtividade média ocorre na *buffers zone* representada pela estação de Rancho Queimado (RQ). Os dados de manejo levantados para realizar as simulações com o *Hybrid-Maize* indicam que esta é a região com semeadura mais cedo no Estado. Isso faz com que o enchimento de grãos, estágio mais sensível a restrição de radiação solar, ocorra nos meses onde a radiação solar disponível é menor.

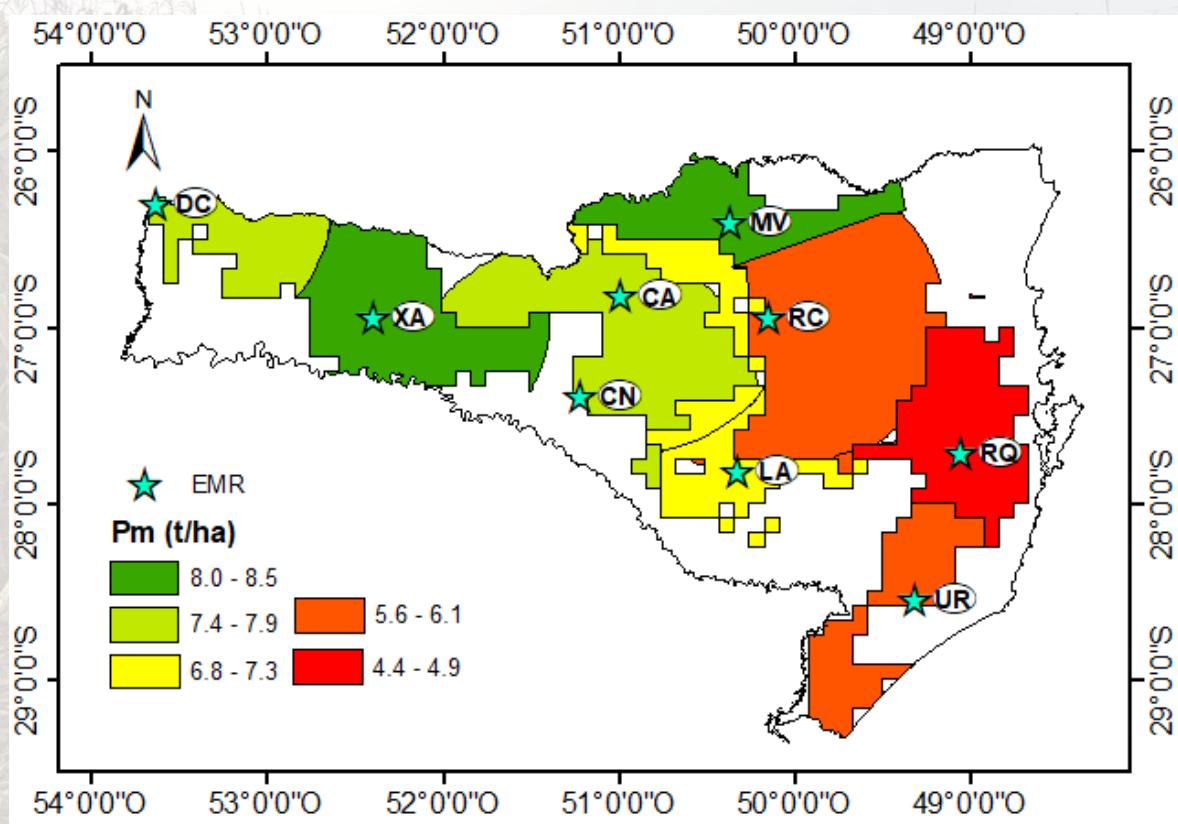


Figura 19. Produtividade média (Pm) de milho em Santa Catarina (em toneladas por hectare).

LACUNA DE PRODUTIVIDADE POR ÁGUA EM SANTA CATARINA

A lacuna de produtividade de milho por água em Santa Catarina (Pp - Ppa) varia de 4 a 31% do Pp e coeficiente de v (Figura 20). Lages tem a maior lacuna de produtividade por água (28 a 31% do Pp). Esta é a região em que, na média de 15 anos, durante a estação de cultivo de milho, a evapotranspiração ficou mais próxima da precipitação, o que mostra uma maior chance de ocorrência de déficit hídrico. O mês em que ocorreu déficit hídrico foi próximo ao florescimento da cultura. Nesse estágio, a umidade é fundamental para a viabilidade do grão de pólen e para que ocorra a fertilização.

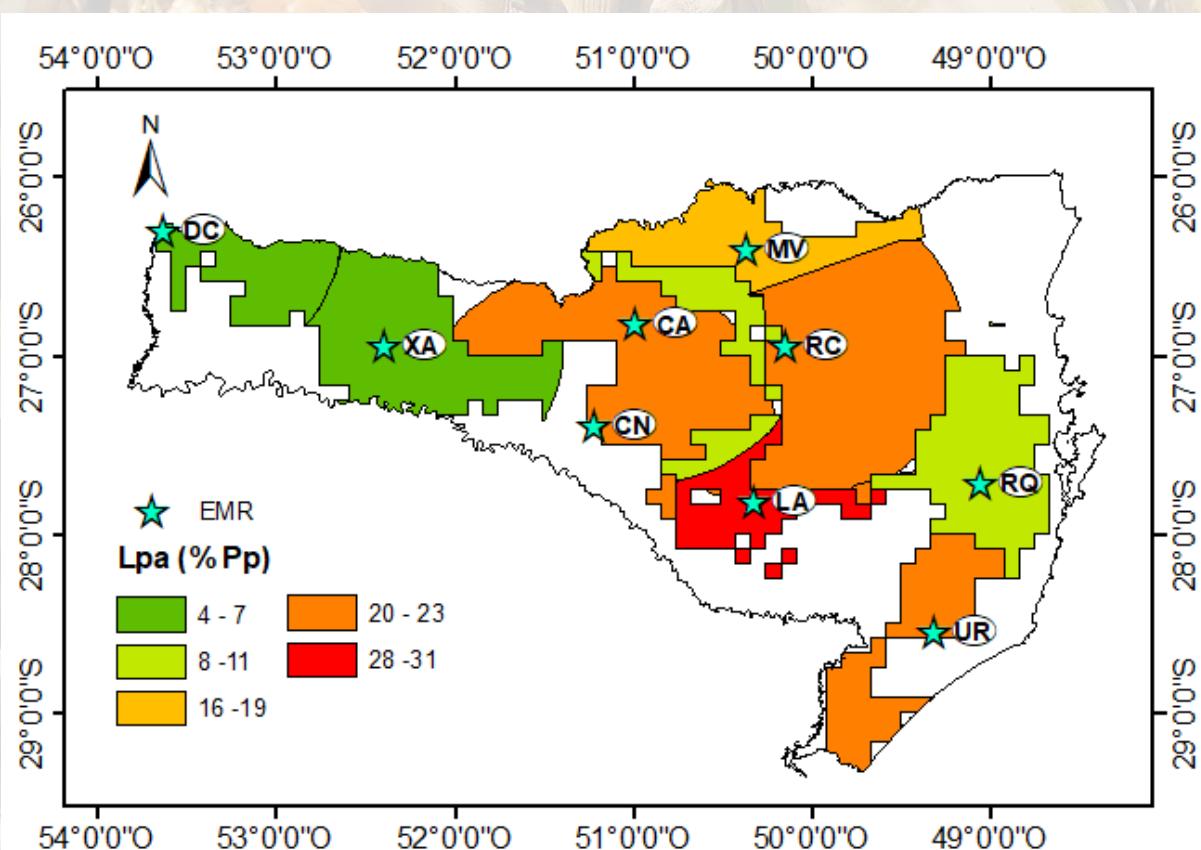


Figura 20. Lacuna de produtividade por água (Lpa) de lavouras de milho em Santa Catarina (em porcentagem do potencial de produtividade).

LACUNA DE PRODUTIVIDADE ATINGÍVEL DE MILHO EM SANTA CATARINA

A lacuna de produtividade atingível de milho em Santa Catarina (Pat - Pm) varia de 16 a 47% do potencial de produtividade limitado por água (Figura 21). Os valores absolutos de Lpat para as regiões é de: 4,6 t/ha (CA), 4,4 t/ha (CN), 2,6 t/ha (DC), 3,9 (LA), 4,2 (MV), 7,3 (RQ), 5,3 (RC), 1,8 (UR) e 2,2 (XA). Regiões com maiores lacunas de produtividade atingível são aquelas que necessitam maiores investimentos em transferência de informação e tecnologia, pois é nesses locais que podemos aumentar significativamente a produção pela intensificação, ou seja, sem necessidade de expandir a área plantada. Vale ressaltar que essa lacuna atingível é para a época de semeadura considerada nesse estudo. Ajustes na interação entre época de semeadura e ciclo de desenvolvimento podem alterar a lacuna atingível, abrindo caminhos para uma maior intensificação.

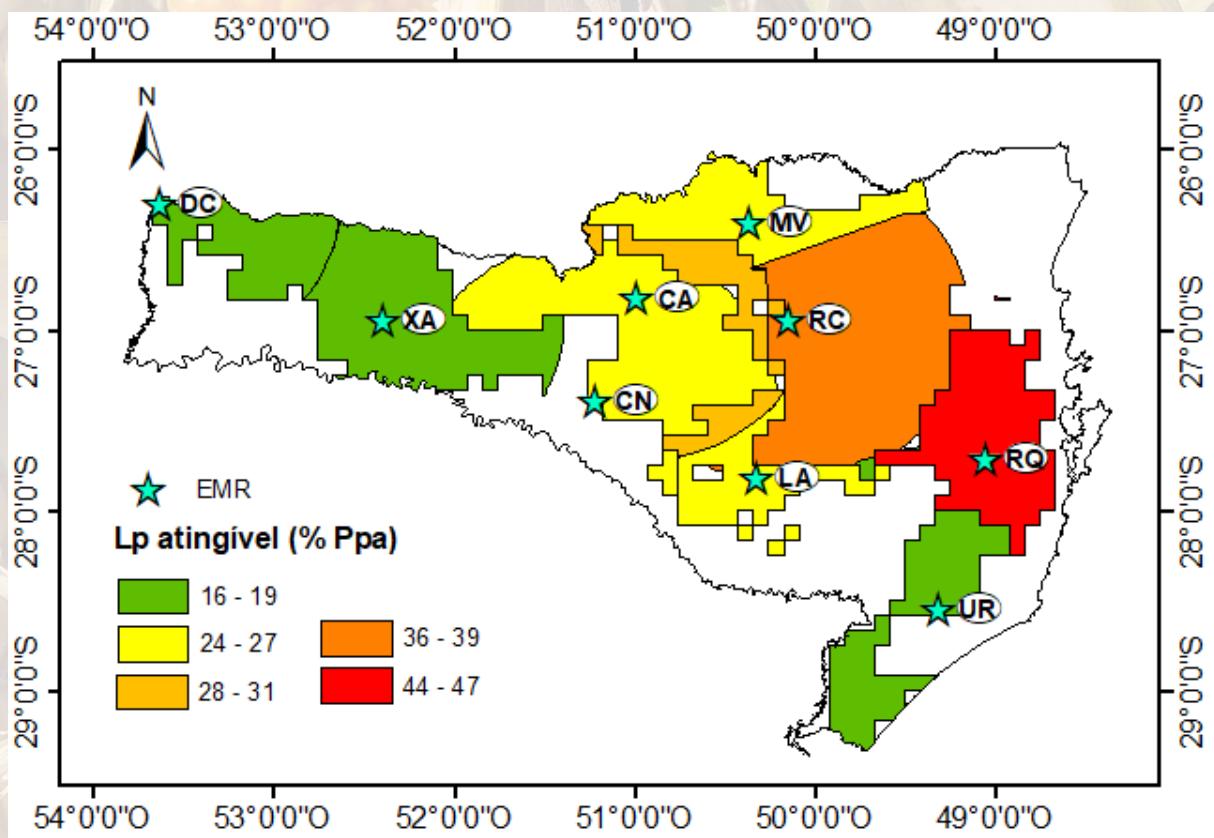


Figura 21. Lacuna de produtividade atingível (Lpat) nas lavouras de milho de Santa Catarina (em porcentagem do potencial de produtividade limitado por água).

POTENCIAIS E LACUNAS DE PRODUTIVIDADE DE MILHO EM SANTA CATARINA

Fazendo a média ponderada dos valores de potencial, potencial limitado por água, produtividade atingível e produtividade média, com a área de colheita de cada *Buffer Zone*, identificamos os potenciais e lacunas médias para Santa Catarina (Figura 22). O potencial de produtividade médio de milho em Santa Catarina é de 17,4 t/ha, o potencial de produtividade limitado é de 14,9 t/ha, a produtividade atingível é de 10,4 t/ha e a produtividade média é de 6,9 t/ha. Assim, a lacuna de produtividade atingível (Pat - Pm) de milho em Santa Catarina, ou seja, o quanto é possível aumentar com melhorias no manejo, sem o uso de irrigação é de 4,2 t/ha. Isso significa que somente com a melhoria de manejo na atual área agricultável (246 mil ha) é possível aumentar a produção de milho em 1,04 milhões de toneladas por ano agrícola.

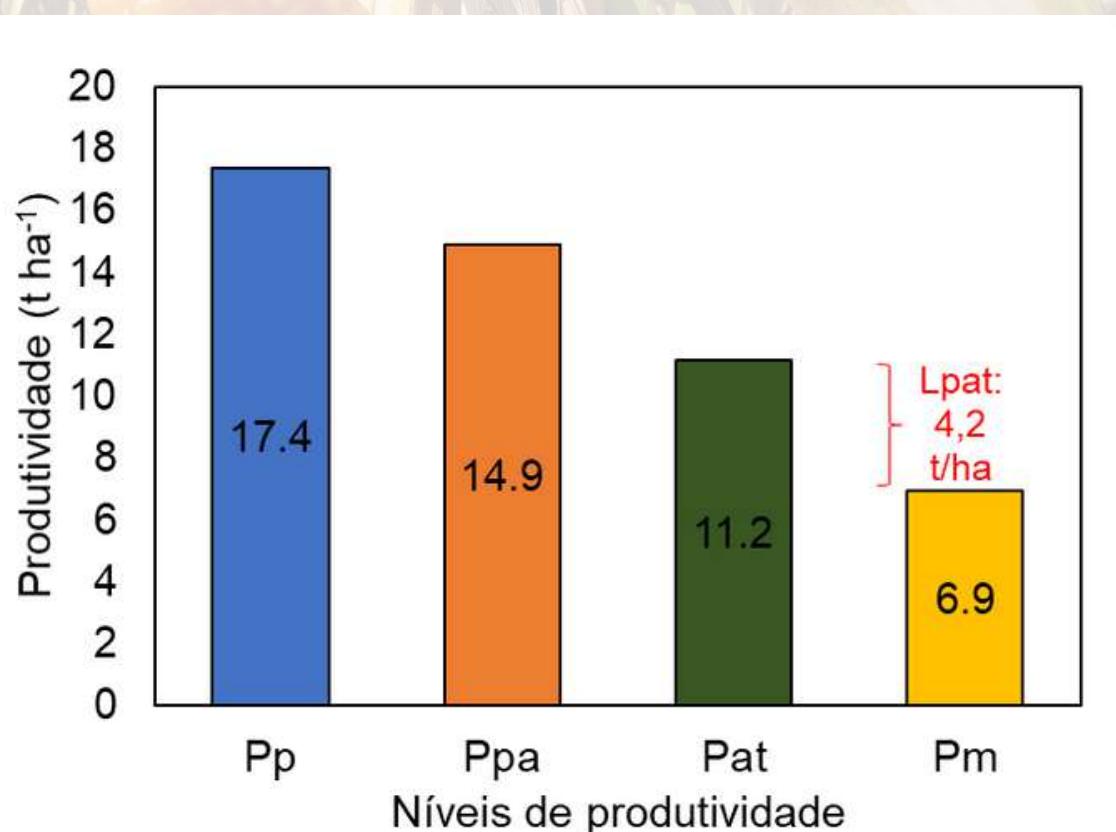


Figura 22. Potencial de produtividade (Pp), potencial de produtividade limitado por água (Ppa), produtividade atingível (Pat) e produtividade média (Pm) de milho para Santa Catarina.

Manejo para altas produtividades em lavouras de milho de Santa Catarina

Na construção de lavouras de altas produtividades é fundamental que compreendamos a interação entre genótipo, manejo e ambiente e suas consequências na produtividade de grãos de milho. Para isso, vamos detalhar os manejos e exigências climáticas da cultura do milho para altas produtividades nas diferentes fases de desenvolvimento, relacionando com o momento de definição dos componentes de produtividade. As 293 lavouras acompanhadas durante as safras 2020/2021 e 2021/2022, em Santa Catarina, foram divididas em tercis de acordo com a produtividade indicada nos questionários. Lavouras do tercil superior (produtividade $> 7,9$ t/ha) foram consideradas lavouras de altas produtividades, já as lavouras do tercil inferior (produtividade $< 5,7$ t/ha) foram consideradas lavouras de baixas produtividades. Foram realizados testes estatísticos para identificar os manejos que diferem entre lavouras de altas e baixas produtividades (Tabela 1). A produtividade média do tercil superior (AP) foi de 9,7 t/ha e do tercil inferior (BP) foi de 4,1 t/ha. É importante ressaltar que para essa análise, o tercil médio (produtividade entre 7,9 e 5,7) não é considerado.



Tabela 1. Médias dos fatores de manejo para lavouras de alta produtividade (AP) e baixa (BP). A diferença entre AP e BP (AP-BP) foi testada por teste t, teste de Wilcoxon (quando a distribuição se desviou da normalidade) ou teste de qui-quadrado (para variáveis categóricas), com significância de 1% (representado na tabela por ***), 5% (**) ou 10% (*). O n é o número de lavouras testadas para cada fator de manejo. NS é usado para fatores que não tiveram significância estatística.

Fator de manejo	n	Unidade	Produtividade (t ha ⁻¹)		AP	BP	AP - BP
			9.7	4.1			
Data de semeadura	197	Dia	20/09	4/10	-14.0	***	
População estabelecida	155	mil plantas ha ⁻¹	68.2	63.4	4.8	**	
Tempo entre as aplicações de calcário	189	anos	2.8	3.4	-0.6	***	
Dose de N	194		202.8	192.0	10.8	*	
Dose de P ₂ O ₅	187	kg ha ⁻¹	117.0	99.0	18.0	**	
Dose de K ₂ O	174		83.2	61.5	21.8	**	
pH	106	-	5.8	5.4	0.4	**	
Herbicida	165	Nº de aplicações	2.5	2.1	0.4	***	
Inseticida	166	Nº de aplicações	2.9	2.2	0.7	***	
1º inseticida	154	Nº de folhas	1.2	2.6	-1.4	***	
Fungicida	92	Nº de aplicações	1.0	0.4	0.6	***	
1º fungicida	51	Nº de folhas	8.4	7.1	1.3	NS	
<i>Sistema de preparo</i>							
Direto	140	% de lavouras	59.3	40.7	18.6	**	
Convencional	51		33.3	66.7	-33.3	**	



Após identificar as práticas de manejo que diferiram entre lavouras de altas e baixas produtividades, usando todo o conjunto de dados (incluindo as lavouras do tercil médio), foi construído o diagrama denominado árvore de regressão (Figura 23). A árvore de regressão possibilita uma análise hierárquica dos fatores que constroem altas produtividades. Na nossa análise, identificamos que os principais fatores que possibilitam altas produtividades em lavouras de milho de Santa Catarina são: população de plantas estabelecidas, dose de potássio, data de semeadura e tempo entre as aplicações de calcário.

Por exemplo, podemos observar que 5,1% das lavouras tem produtividade superior a 10,0 t/ha e que nessas lavouras a população estabelecida é superior a 71,6 mil plantas/ha e a dose de K₂O utilizada é superior a 113 kg/ha, sendo esses os principais fatores que diferiram de lavouras que estão produzindo menos de 10 t/ha. Já 5,9% das lavouras estão colhendo menos que 4,4 t/ha. Essas lavouras tem população estabelecida menor que 71,6 mil plantas/ha e semeiam após sete de novembro. A grande maioria das lavouras de milho de Santa Catarina avaliadas nesse estudo possui produtividade média de 6,3 t/ha (53,2% dos dados), tem população estabelecida inferior a 71,6 mil plantas/ha, semeia antes de sete de novembro e utiliza dose de K₂O inferior a 98 kg/ha.



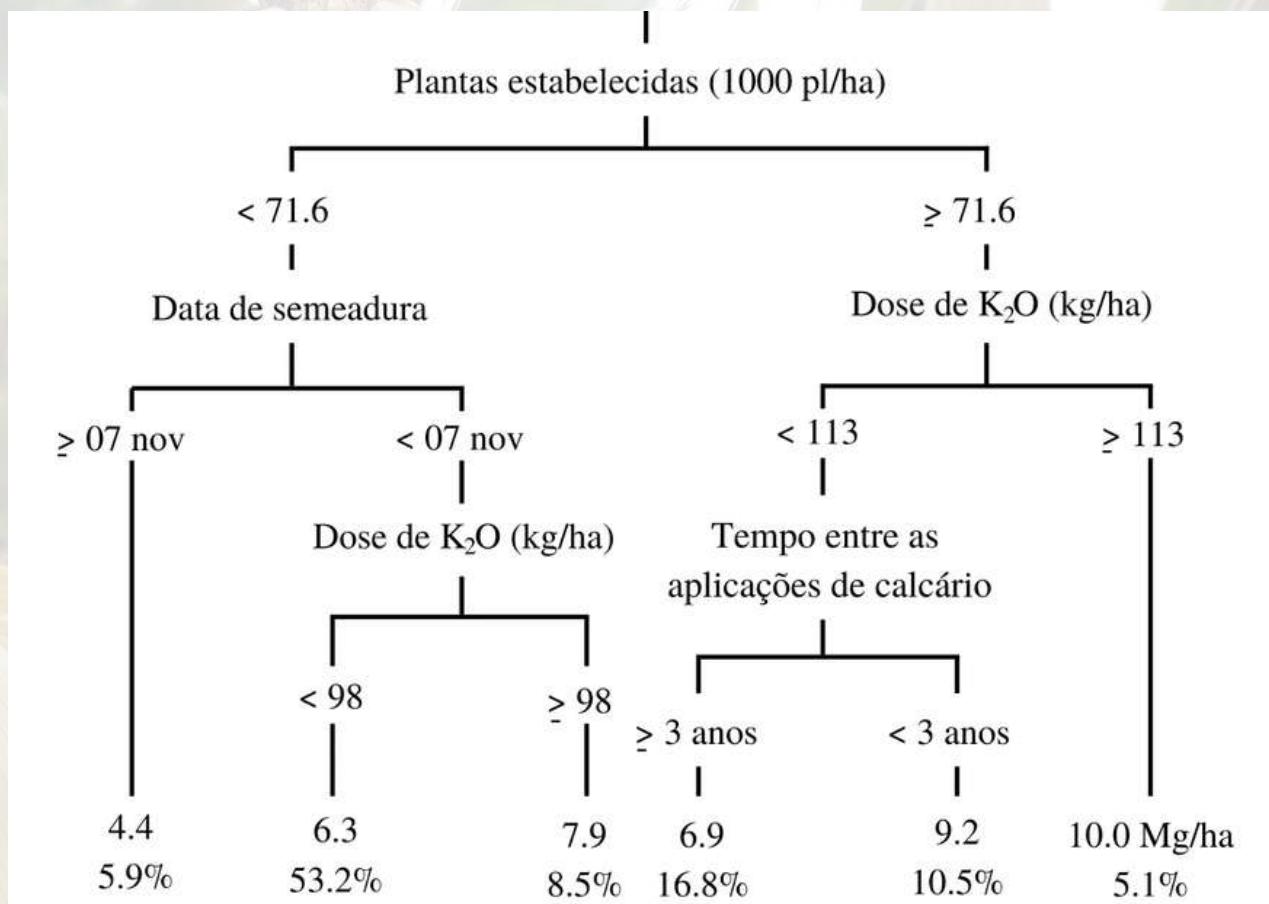


Figura 23. Diagrama árvore de regressão para lavouras de milho de Santa Catarina. Na análise, 80% dos dados (293 lavouras de milho) foi utilizado para construção do diagrama e o restante (20%) foi utilizado para sua avaliação.



Após a identificação das principais práticas de manejo que diferem entre as lavouras que estão obtendo altas e baixas produtividades, nós avaliamos de forma individual os fatores: data de semeadura, população de plantas estabelecidas, pH do solo, adubação e manejo fitossanitário, dando enfoque ao manejo de insetos-praga, devido a grande importância da cigarrinha-do-milho nas safras avaliadas.

A ordem dos resultados apresentados é de acordo com os fatores que definem, limitam e reduzem o potencial de produtividade. Dentro desses três grupos, os manejos para altas produtividades serão apresentados o mais próximo possível da ordem cronológica em que ocorrem dentro da lavoura.



Ao analisar os dados de 293 lavouras, identificamos que a faixa de semeadura que proporciona altas produtividades (superior a 12 t/ha) em Santa Catarina é de 01/09 a 01/10 (Figura 24). Além disso, verificamos que semeaduras antes do dia 31/08 estão sujeitas a perdas de produtividade de 200 kg por hectare por dia de antecipação, o que se relaciona, principalmente, a possibilidade de ocorrência de geadas. Além disso, baixas temperaturas do solo fazem com que a emergência da cultura seja mais lenta, de forma que a semente permaneça exposta a patógenos e insetos por mais tempo, podendo reduzir a população de plantas estabelecida. Em semeaduras após 02/10 foi identificada perda de produtividade de 120 kg por hectare por dia de atraso na semeadura. No Rio Grande do Sul, avaliando 220 lavouras de milho também foi identificada uma perda de 84,5 kg por hectare por dia de atraso após 20 de setembro.

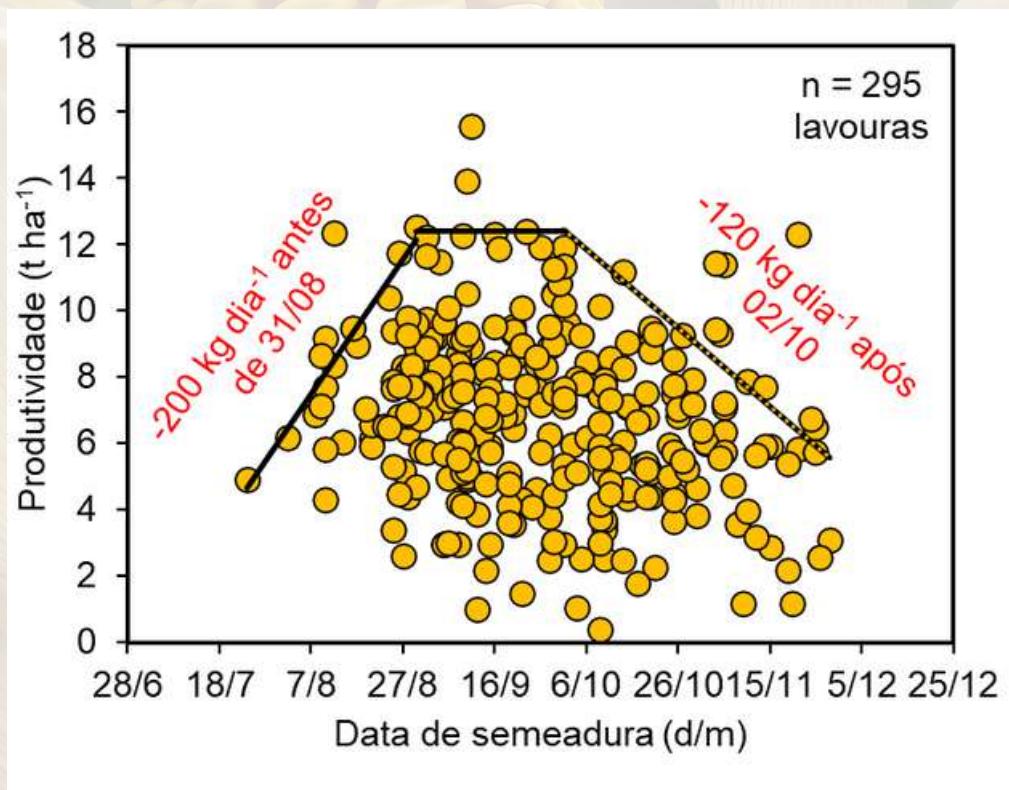


Figura 24. Relação entre a produtividade média de 293 lavouras de milho de Santa Catarina e a data de semeadura nas safras 2020/2021 e 2021/2022.

Alterar a época de semeadura e o ciclo de desenvolvimento utilizado são as formas que nós temos de ajustar a ocorrência das fases de desenvolvimento críticas e as condições ambientais adequadas. Em semeaduras realizadas em setembro, o florescimento da cultura (R1) ocorre próximo aos meses de maior disponibilidade de radiação solar no sul do Brasil (dezembro/janeiro). Estudos realizados pela Equipe FieldCrops (Ribeiro et al., 2020) mostram que a restrição de radiação solar durante o florescimento e, principalmente, enchimento de grãos, leva a perdas significativas de produtividade, sendo os componentes de rendimento mais afetado o peso de grãos e, em segundo lugar, o número de grãos por espiga. O peso de grãos é definido entre os estágio de grão bolha (R2) e maturidade fisiologia (R6). Por sua vez, o número de grãos por espiga é definido na fase vegetativa (até o pendoamento - VT), quando está sendo constituído, principalmente, o número de fileiras na espiga, e no florescimento (R1), quando é definido o número de grãos por fileira.

Outros estresse ambientais também podem ter seus efeitos minimizados pelo ajuste da época de semeadura, como os causados por temperatura e estresse hídrico. Ao avaliar o potencial de produtividade limitado por água para cada uma das regiões em diferentes datas de semeadura (de julho a dezembro), considerando híbrido de ciclo superprecoce (Figura 25), podemos perceber que em seis das nove regiões há uma queda no Ppa com o atraso da semeadura. O valor junto ao x nas equações representa a perda (quando negativo) por mês de atraso. Fazendo uma relação com a Figura 24, nessas regiões, a perda de produtividade após 02/10 pode ser explicada por condições ambientais que interferem também no Ppa. No entanto, sabemos que, mesmo em regiões onde o Ppa não reduz com atraso na época de semeadura, a produtividade média pode ser comprometida pelo atraso da semeadura devido ao aumento da pressão de pragas e doenças, como a cigarrinha-do-milho.

É importante ressaltar que estamos falando sobre época de semeadura para maximizar a produtividade de grãos. No entanto, muitas vezes a intensificação do sistema de produção é priorizada. Assim, é necessário ajustar a data de semeadura para possibilitar um maior número de cultivos por área durante uma mesma estação de cultivo (ano agrícola). Da mesma forma, muitas vezes os produtores optam por reduzir os riscos climáticos das suas lavouras, assim, recomenda-se seguir as orientações do Zoneamento de Risco Climático (ZARC) para a cultura do milho em Santa Catarina (mais informações em:

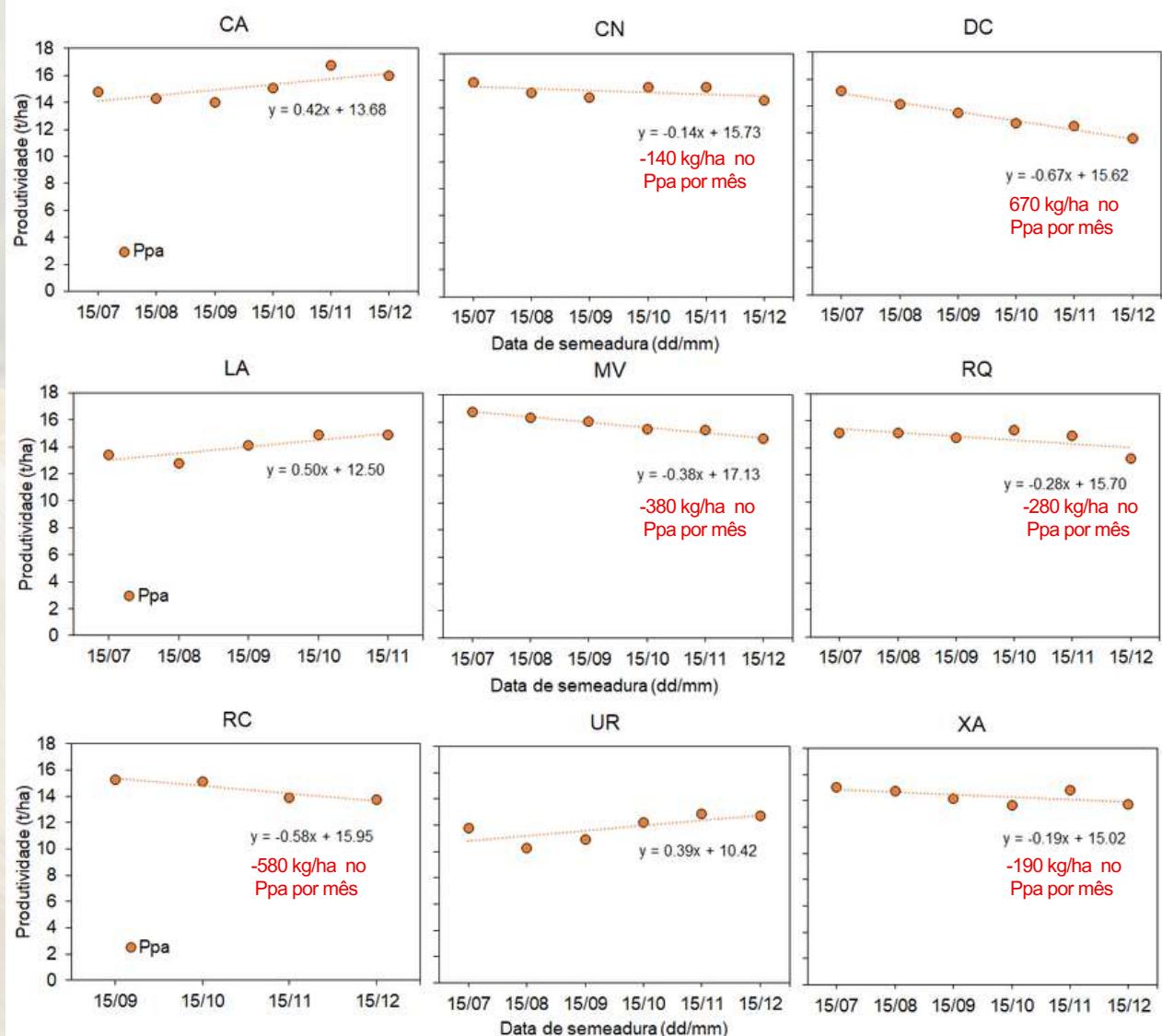
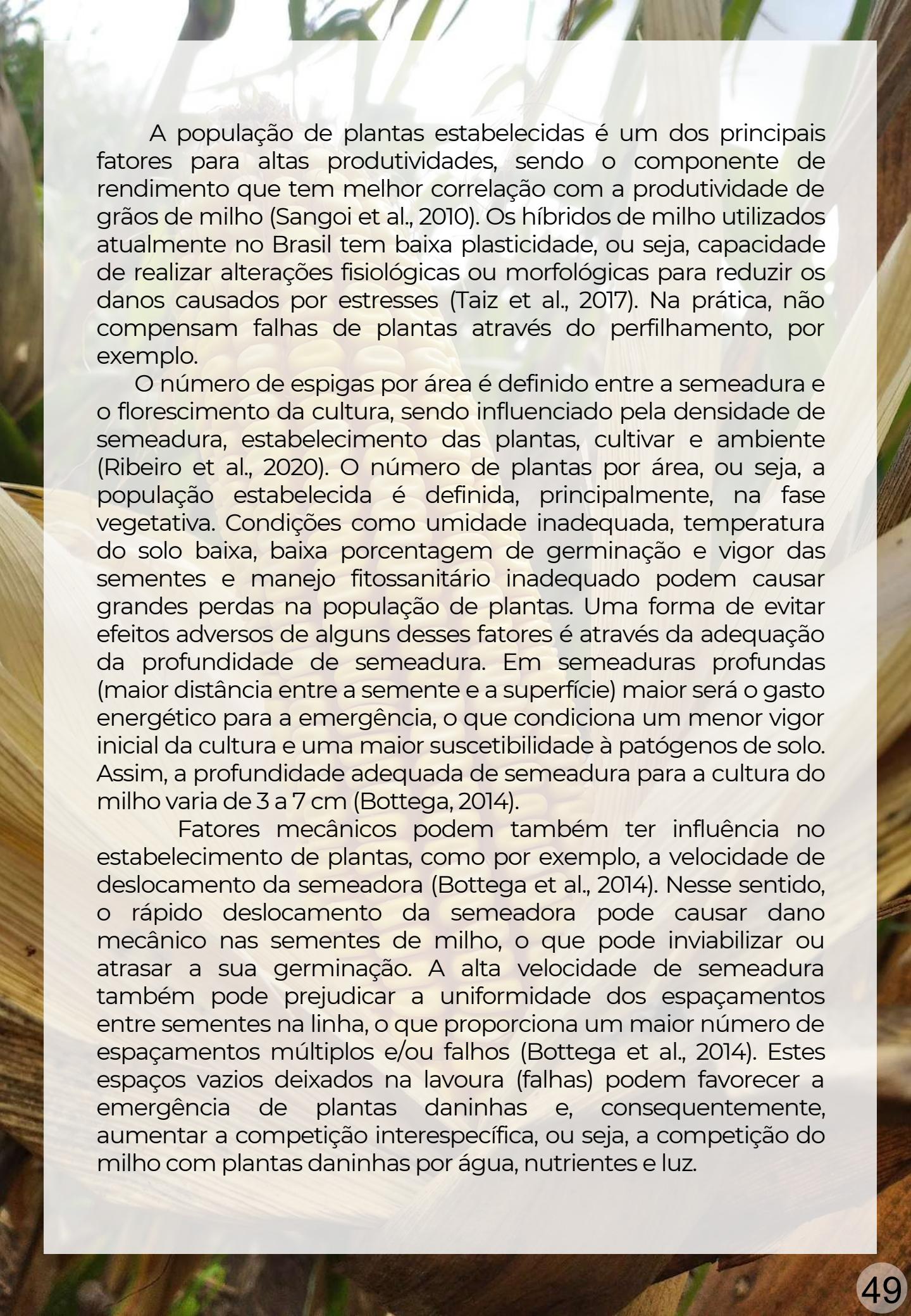


Figura 25. Potencial de produtividade limitado por água para milho nas nove *Buffers zones* de Santa Catarina para híbridos de ciclo superpecoce. Os dados de solo foram os mesmos utilizados para as simulações do potencial e potencial limitado por água, apresentados anteriormente.



A população de plantas estabelecidas é um dos principais fatores para altas produtividades, sendo o componente de rendimento que tem melhor correlação com a produtividade de grãos de milho (Sangoi et al., 2010). Os híbridos de milho utilizados atualmente no Brasil tem baixa plasticidade, ou seja, capacidade de realizar alterações fisiológicas ou morfológicas para reduzir os danos causados por estresses (Taiz et al., 2017). Na prática, não compensam falhas de plantas através do perfilhamento, por exemplo.

O número de espigas por área é definido entre a semeadura e o florescimento da cultura, sendo influenciado pela densidade de semeadura, estabelecimento das plantas, cultivar e ambiente (Ribeiro et al., 2020). O número de plantas por área, ou seja, a população estabelecida é definida, principalmente, na fase vegetativa. Condições como umidade inadequada, temperatura do solo baixa, baixa porcentagem de germinação e vigor das sementes e manejo fitossanitário inadequado podem causar grandes perdas na população de plantas. Uma forma de evitar efeitos adversos de alguns desses fatores é através da adequação da profundidade de semeadura. Em semeaduras profundas (maior distância entre a semente e a superfície) maior será o gasto energético para a emergência, o que condiciona um menor vigor inicial da cultura e uma maior suscetibilidade à patógenos de solo. Assim, a profundidade adequada de semeadura para a cultura do milho varia de 3 a 7 cm (Bottega, 2014).

Fatores mecânicos podem também ter influência no estabelecimento de plantas, como por exemplo, a velocidade de deslocamento da semeadora (Bottega et al., 2014). Nesse sentido, o rápido deslocamento da semeadora pode causar dano mecânico nas sementes de milho, o que pode inviabilizar ou atrasar a sua germinação. A alta velocidade de semeadura também pode prejudicar a uniformidade dos espaçamentos entre sementes na linha, o que proporciona um maior número de espaçamentos múltiplos e/ou falhos (Bottega et al., 2014). Estes espaços vazios deixados na lavoura (falhas) podem favorecer a emergência de plantas daninhas e, consequentemente, aumentar a competição interespecífica, ou seja, a competição do milho com plantas daninhas por água, nutrientes e luz.

Avaliando 223 lavouras de milho em Santa Catarina, identificamos que a população de plantas estabelecidas que possibilita atingir altas produtividades (próximo a 12 t/ha) nas lavouras de milho de Santa Catarina é de 73 mil plantas/ha (Figura 26). Estudos realizados pela Equipe FieldCrops (Friedrich et al., 2022) mostram que a densidade de semeadura adequada varia com o ambiente de produção e expectativa de produtividade. Para produtividade superiores a 15 t/ha, a densidade de semeadura que maximizou a produtividade foi superior a 100 mil plantas/ha. No entanto, para ambiente com expectativa de produtividade inferior a 10 t/ha, a densidade agronomia ótima é próxima a 60 mil plantas/ha. O componente de produtividade mais afetado pelo adensamento, com exceção do número de espigas por área, tanto em ambientes de alta produtividade como de baixa, foi o número de grãos por fileira. A densidade de semeadura deve estar adequada ao nível tecnológico e econômico da lavoura, uma vez que o custo com sementes, quando se utiliza híbridos, é alto.

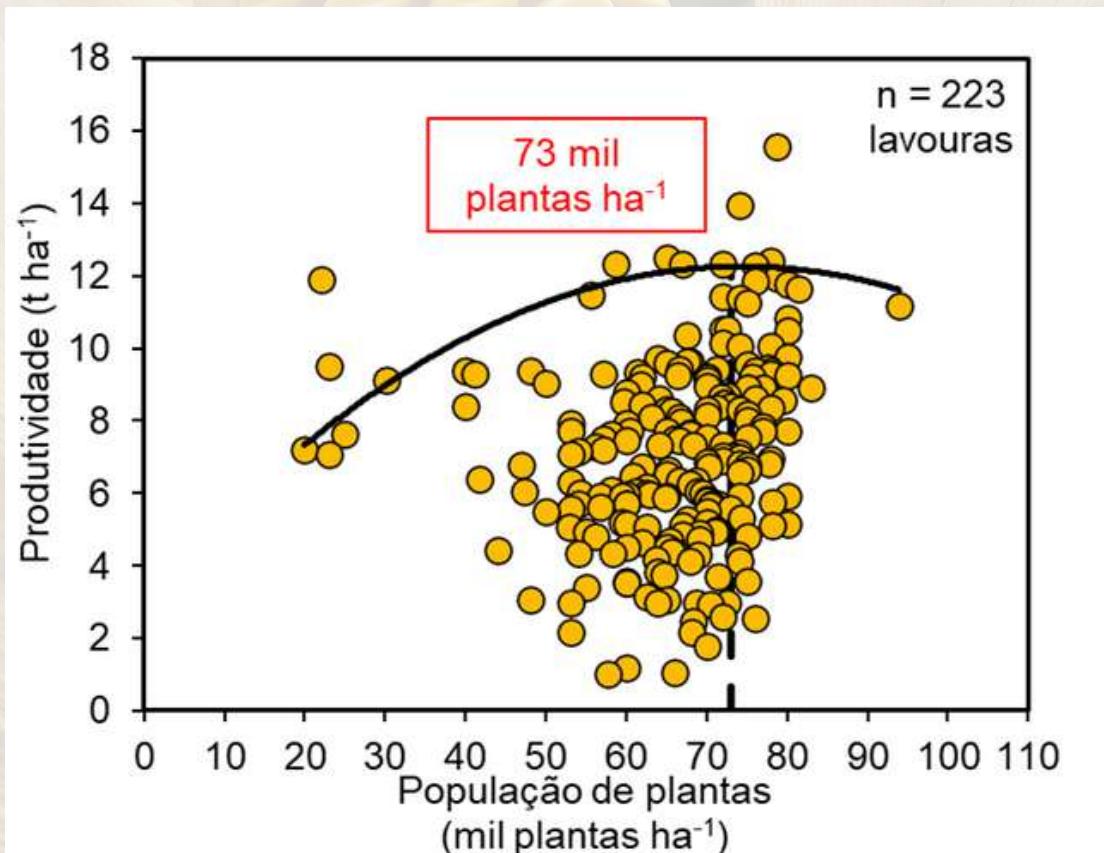


Figura 26. Relação entre a produtividade média de 223 lavouras de milho de Santa Catarina e população de plantas estabelecidas nas safras 2020/2021 e 2021/2022.

Os solos do sul do Brasil são considerados naturalmente ácidos pelo seu histórico de produção de grãos. A lixiviação de nutrientes, a exportação de nutrientes, a adubação nitrogenada e a fixação de N₂ são processos que acidificam o solo. Nesse cenário, o processo de acidificação faz com que os elementos Ca, Mg, Na e K contidos nos colóides do solo sejam substituídos por íons de hidrogênio. Além disso, altos teores de elementos tóxicos, como alumínio e manganês, levam a redução do crescimento das raízes, diminuindo o volume de solo em que estas extraem nutrientes e água.

A toxidez de Al está entre os principais limitantes químicos do solo ao aumento da produtividade da maioria das espécies vegetais cultivadas no sul do Brasil. Grande parte dos solos de Santa Catarina possuem pH inferior a 5,0, necessitando mais de 10 t/ha de calcário para elevar o pH a 6,0 (Ernani et al., 2000). Isso representa um alto custo inicial no estabelecimento das lavouras, principalmente se a calagem for feita numa só vez.



A correlação existente entre o pH do solo e a produtividade foi analisada pela função limite com dados de 146 lavouras de Santa Catarina durante as safras 2020/2021 e 2021/2022. Identificamos que a cada 0,1 de pH abaixo de 5,5, há uma redução de 489 kg/ha na produtividade de grãos (Figura 27).

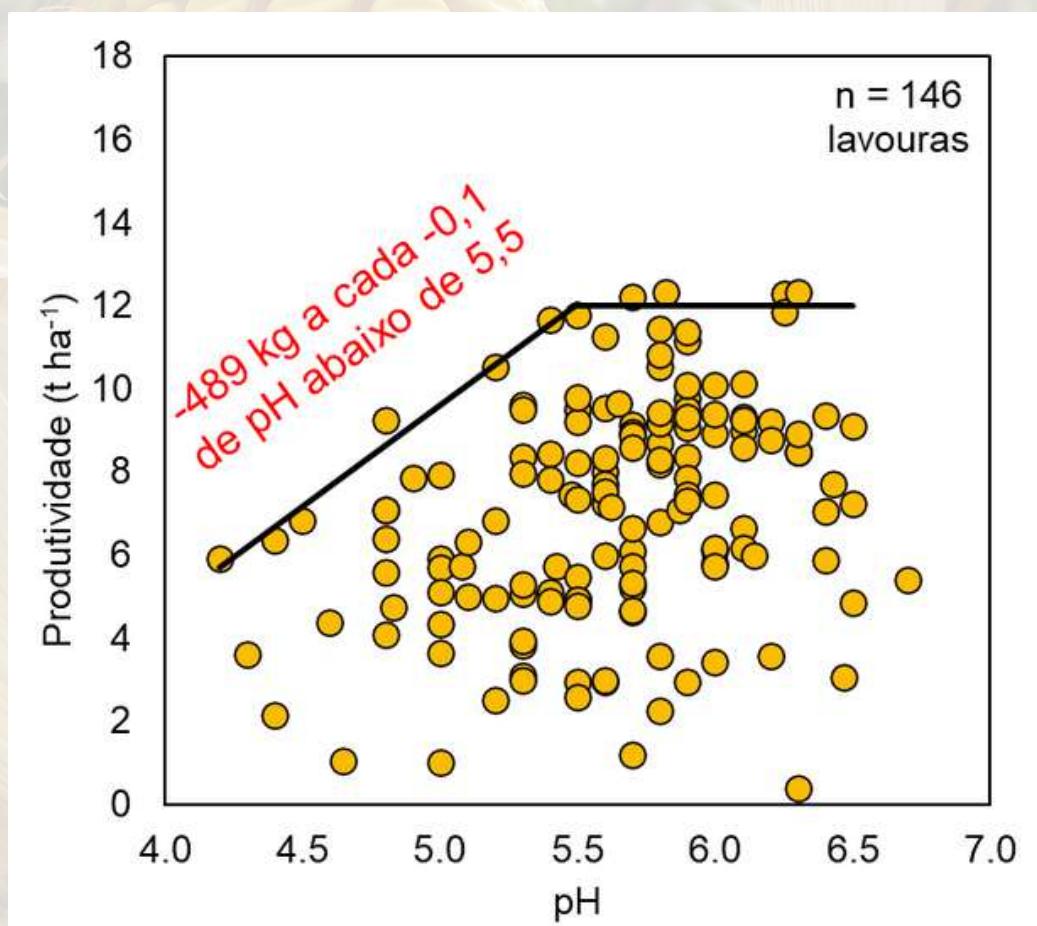


Figura 27. Relação entre a produtividade média de 146 lavouras de milho de Santa Catarina e o pH do solo.

Para atingir altas produtividades de milho é necessário que suas exigências nutricionais sejam supridas, uma vez que a planta extrai elevadas quantidades de nutrientes do solo (Godim et al., 2016). Para produzir 1000 quilogramas de grãos, o milho necessita 19 kg de N, 5 kg de P₂O₅ e 20 kg de K₂O (Ribeiro et al., 2020). As doses de nitrogênio, fósforo e potássio tiveram diferenças significativas entre lavouras de altas e baixas produtividades (Tabela 1). Além disso, a dose de potássio apareceu na árvore de regressão como um dos principais fatores que possibilitam altas produtividades nas lavouras de milho em Santa Catarina.

O nitrogênio (N) é o elemento exigido em maior quantidade pelo milho, devido a diversidade de funções que ele desempenha na planta. Devido a sua alta mobilidade na planta, os sintomas de deficiência de N ocorrem nas folhas mais velhas. Avaliando 279 lavouras, nós identificamos uma perda de produtividade de 30 kg de grãos de milho/ha para cada quilograma de N abaixo de 186 kg de N/ha (Figura 28). Doses superiores a 186 kg N/ha (ou seja, aproximadamente 400 kg ureia/ha) possibilitam atingir produtividade próximas a 12 t/ha, desde que o restante do manejo seja adequado.

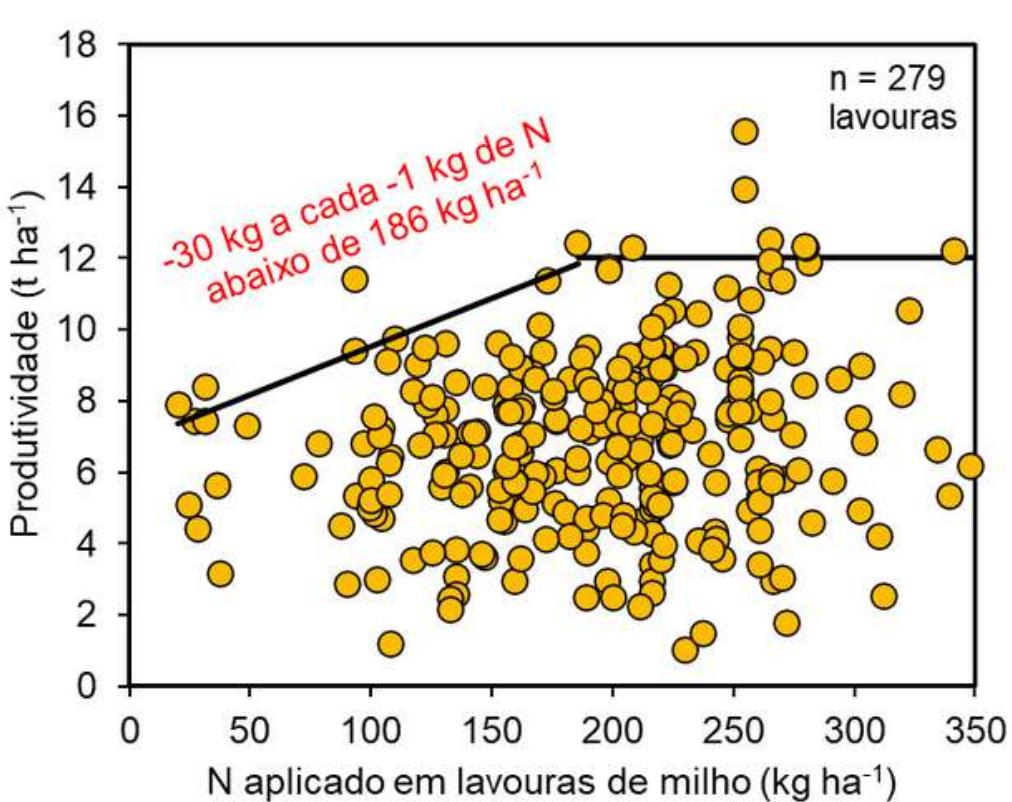


Figura 28. Relação entre produtividade e a dose de nitrogênio (em kg de N/ha) aplicada em 279 lavouras de milho em Santa Catarina.

O fósforo (P) desempenha importante papel na planta, uma vez que, entre outras funções, ele faz parte da molécula de ATP, energia utilizada durante o metabolismo (Taiz et al., 2017). No solo ele é pouco móvel, o que prejudica a absorção pelas plantas. Já na planta é um elemento móvel. Assim, os sintomas de deficiência de P ocorrem em folhas mais velhas. Avaliando 282 lavouras, nós identificamos que doses próximas a 125 kg de P_2O_5/ha maximizam as produtividades das lavouras de milho em Santa Catarina (Figura 29).

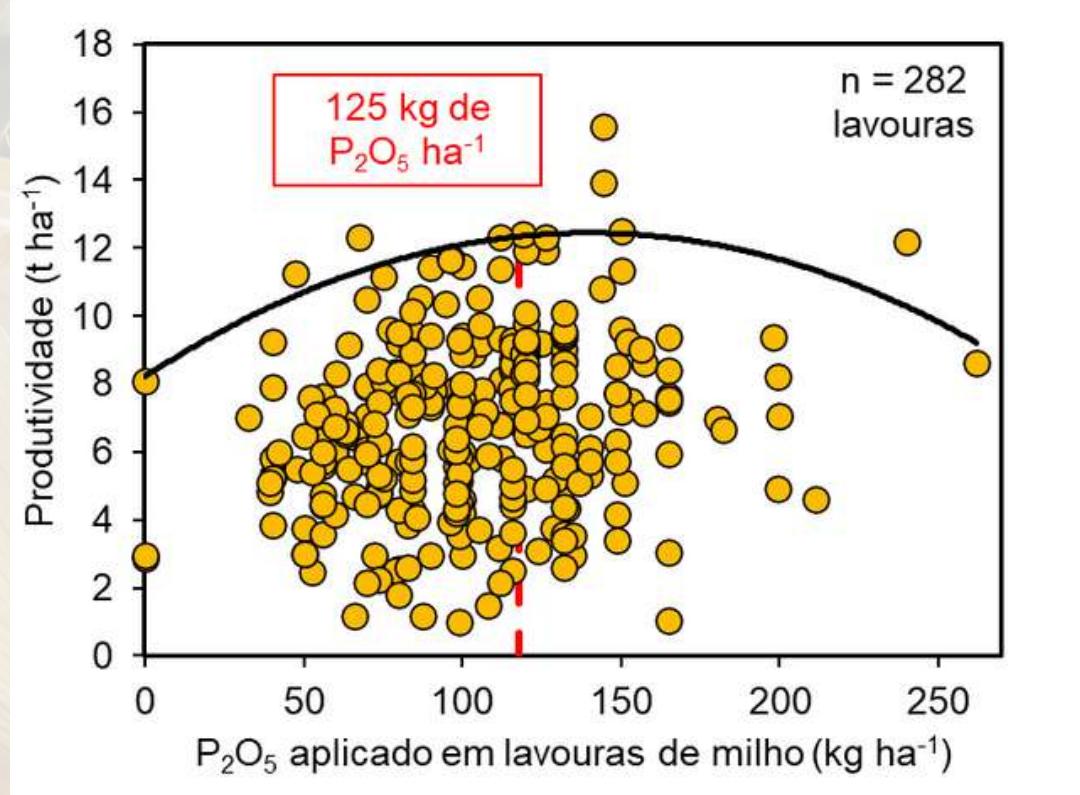


Figura 29. Relação entre produtividade e a dose de fósforo (em kg de P_2O_5/ha) aplicada em 282 lavouras de milho em Santa Catarina.

O potássio (K) atua como regulador osmótico e ativador de enzimas (catalizadores biológicos) de diversos processos, inclusive da fotossíntese. Na planta, o K é altamente móvel, por isso, assim como ocorre para N e P, o sintoma de deficiência de K se dá nas folhas mais velhas. Avaliando 155 lavouras, nós identificamos que doses próximas a 118 kg de K₂O/ha maximizam as produtividades das lavouras de milho em Santa Catarina (Figura 30). É importante evitar doses superiores a 60 kg de K₂O/ha na linha de semeadura, pois o cloreto de potássio tem efeito salino, podendo aumentar a pressão osmótica do solo e "queimar" a semente ou raiz da planta. Por isso, quando usadas doses superiores a 60 kg de K₂O/ha, os produtores realizam parte da adubação potássica em cobertura.

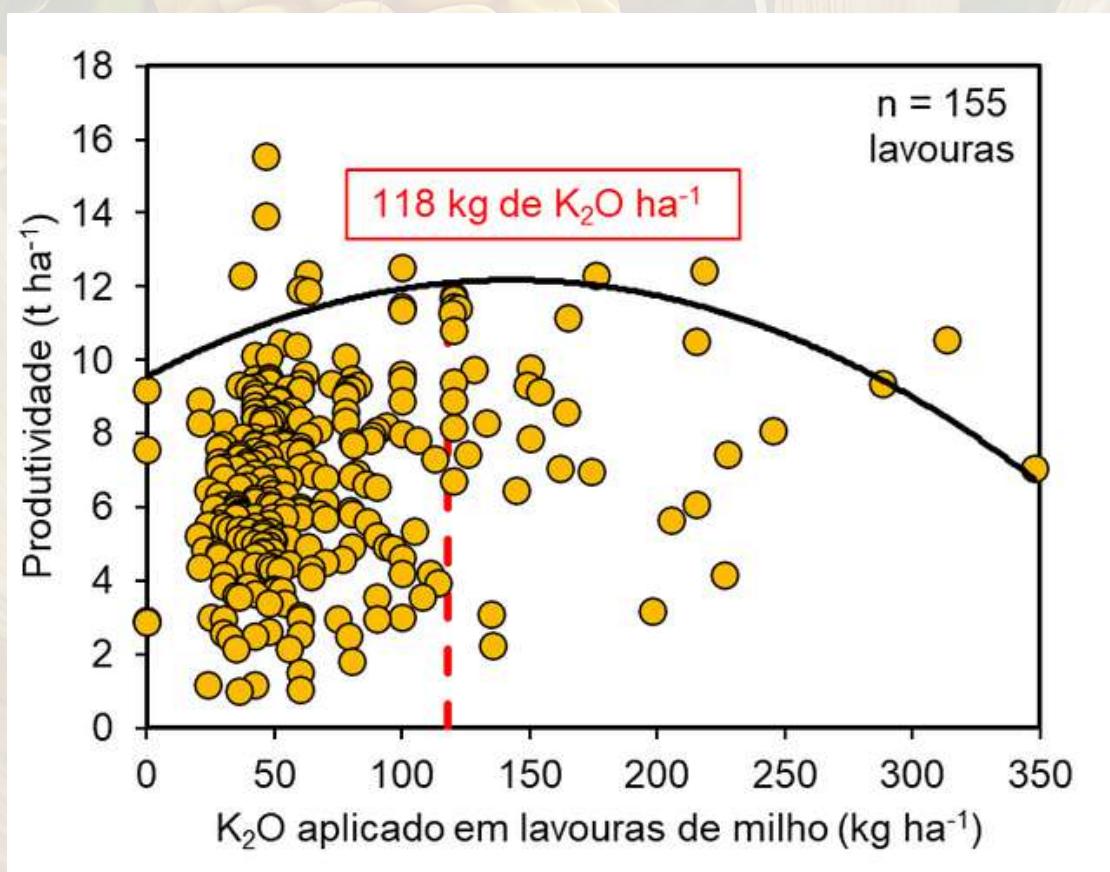


Figura 30. Relação entre produtividade e a dose de potássio (em kg de K₂O/ha) aplicada em 155 lavouras de milho em Santa Catarina.

A cigarrinha-do-milho teve destaque como a principal praga nas lavouras de milho das safras 2020/2021 e 2021/2022 (Figura 31) (Ribeiro; Canale, 2021). Esse inseto é o transmissor de doenças que fazem parte do complexo de enfezamentos, um dos principais problemas fitossanitários atuais da cultura, e que pode causar perdas de produtividade superiores a 90%, dependendo do momento de infecção, condições ambientais e suscetibilidade dos híbridos cultivados (Teixeira et al., 2013). Esses problemas são intensificadas quando não são adotadas medidas integradas de manejo, como uso de híbridos tolerantes às doenças do complexo de enfezamentos, a eliminação das plantas espontâneas de milho (“guaxas ou tigueras”) e o tratamento de sementes com inseticidas sistêmicos, em nível regionalizado (De Oliveira et al., 2007; Sabato, 2018).

A cigarrinha-do-milho ataca as plantas de milho durante todo o ciclo de desenvolvimento, mas é nos estágios fenológicos iniciais que apresenta os maiores impactos, tanto pelos danos diretos (sucção de seiva e injeção de toxinas) quanto indiretos (transmissão de fitopatógenos). Consequentemente, esse é o momento que o controle químico (associado ou não a produtos biológicos) é mais indicado (Massola et al., 1999), uma vez que compreende o período de migração do inseto para a lavoura e a disseminação primária das doenças (primeiras infecções). Assim, realizar a aplicação de inseticida no momento adequado, ou seja, no período onde a infecção pelo complexo de enfezamentos é mais prejudicial para o desenvolvimento das plantas (milho com uma ou duas folhas expandidas), é uma medida de manejo importante dentro de um programa de manejo integrado de pragas da cultura em um contexto regionalizado. Isso se aplica também a outros insetos-praga que afetam a cultura (percevejo barriga-verde e lagarta-do-cartucho, por exemplo), os quais também possuem os estágios iniciais da cultura como período crítico. Isso está de acordo com a Figura 32, que indica que as lavouras que realizaram a primeira aplicação de inseticida nos estágios iniciais da cultura tiveram altas produtividades. Vale ressaltar que o manejo fitossanitário deve ser realizado a partir do monitoramento rotineiro das lavouras, empregando os preceitos do manejo integrado de pragas, doenças e plantas daninhas.



Figura 31. Principais insetos-prata identificados nas lavouras de milho de Santa Catarina nas safras 2020/2021 e 2021/2022. Os números indicados no gráfico de pizza representam o número de lavouras que identificou cada um dos insetos-praga entre os principais de suas lavouras.

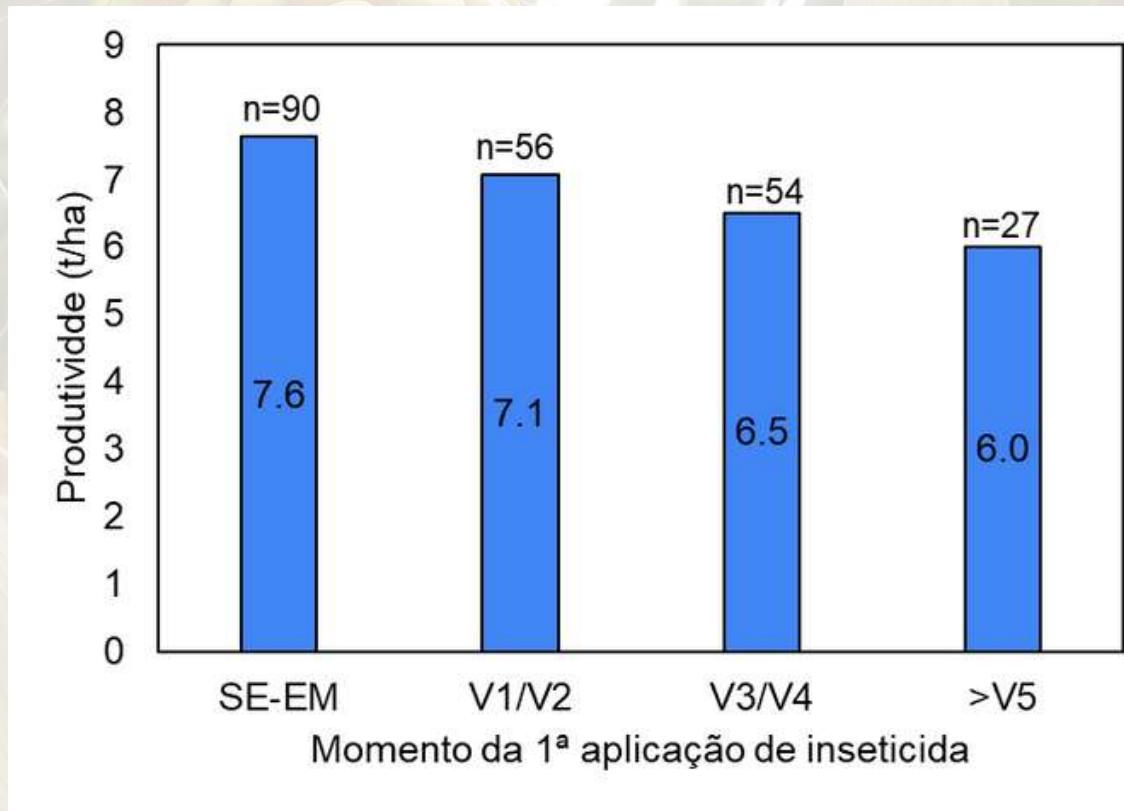


Figura 32. Produtividade de milho nas safras 2020/2021 e 2021/2022 de 227 lavouras de milho de Santa Catarina de acordo com o número de folhas expandidas das plantas de milho no momento da primeira aplicação de inseticida. O valor dentro de cada uma das barras representa a produtividade média obtida de acordo com o momento da primeira aplicação de inseticida e o n acima das barras é o número de lavouras avaliadas.

CUSTO DE PRODUÇÃO X PRODUTIVIDADE DAS LAVOURAS DE MILHO DE SANTA CATARINA

Entre os 168 produtores que informaram o preço de venda, o valor variou de R\$ 34,0 a 100,0 reais por saco, sendo o valor médio de R\$ 87,00. Em relação aos custos de produção, considerando o custo com semente, adubação e manejo fitossanitário, o maior custo da lavoura de milho de Santa Catarina é com adubação (base + cobertura + micronutrientes) (Figura 33). As lavouras de baixa produtividade tiveram os maiores custos de produção, sendo as maiores diferenças relacionadas a adubação. Vale ressaltar que as safras avaliadas (2020/2021 e 2021/2022) tiveram condições de déficit hídrico, o que pode justificar um alto investimento em adubação que não foi convertido em produtividade pelas questões ambientais serem limitantes. Outra possibilidade é o uso de insumos no momento e/ou condições inadequadas. Apesar do custo com sementes ser semelhante nos diferentes níveis de produtividade, nossas análises indicaram diferenças significativas entre a população de plantas estabelecidas. Nós identificamos que, na média, as lavouras de baixas produtividades perderam 400 plantas/ha a mais do que as lavouras de altas produtividades.

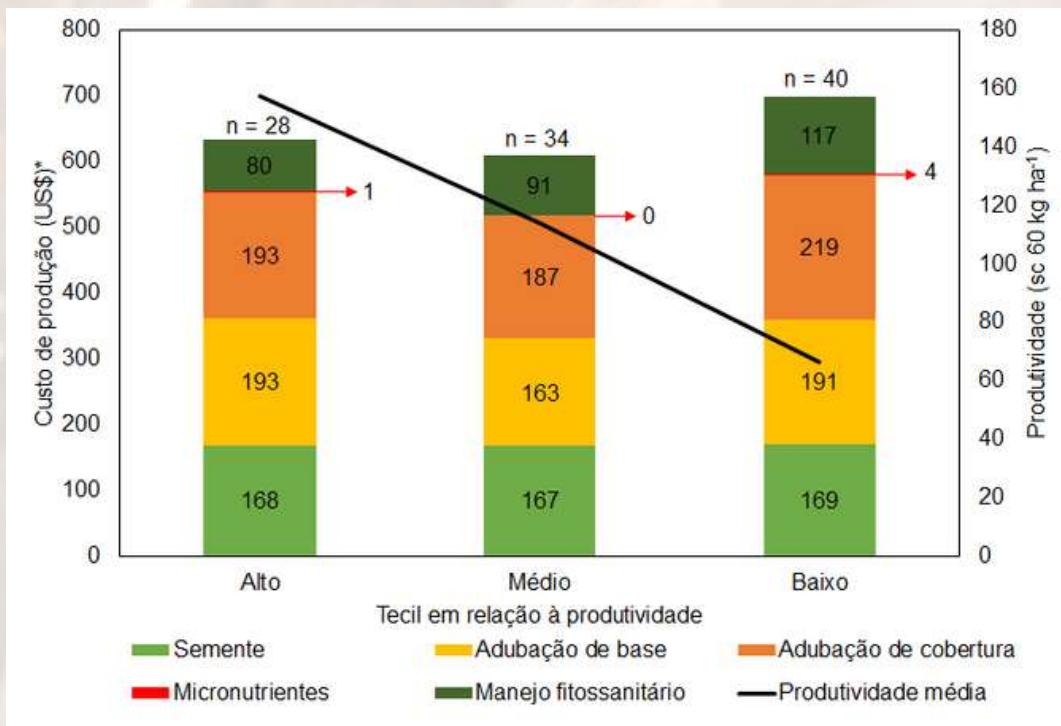


Figura 33. Custo de produção de 102 lavouras de milho de Santa Catarina nas safras 2020/2021 e 2021/2022 com semente, adubação e manejo fitossanitário.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As informações apresentadas nesse livro são resultado do esforço em conjunto dos extensionistas e pesquisadores da Epagri e da Equipe FieldCrops/UFSM, visando difundir informações e identificar caminhos para aumentar a produção de milho em Santa Catarina, aliando eficiência produtiva e lucratividade ao produtor. Os assuntos foram abordados de maneira simples e objetiva, para facilitar o entendimento do potencial de produtividade, potencial de produtividade limitado por água, das lacunas de produtividade e dos fatores de manejo que promovem perdas de produtividade nas lavouras de milho de Santa Catarina. Esperamos que os tópicos abordados nesse material sirvam pra facilitar a compreensão das interações entre genótipo, ambiente, manejo e produtor. Salientamos que, justamente por ser a interação de fatores muito complexos, cada lavoura é única, assim, as informações aqui contidas precisam ser adaptadas para cada realidade, o que só é possível a partir de um profundo conhecimento sobre a ecofisiologia da planta e do sistema de produção.

Agradecemos e parabenizamos os extensionistas e pesquisadores da Epagri pela brilhante contribuição para sustentabilidade da produção de milho de Santa Catarina. Aumentar a produção através do aumento da produtividade de grãos nas áreas já utilizadas para a agricultura é um compromisso que nós temos com as gerações futuras.



Referências bibliográficas

AGUS, F. et al. Yield gaps in intensive rice-maize cropping sequences in the humid tropics of Indonesia. *Field Crops Research*, v. 237, n. April, p. 12–22, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.04.006>

ANDREA, M. C. S. et al. Variability and limitations of maize production in Brazil: Potential yield, water-limited yield and yield gaps. *Agricultural Systems*, v. 165, n. July, p. 264–273, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.07.004>

BOTTEGA. Efeitos da profundidade e velocidade de semeadura na implantação da cultura do milho. *Pesq. agropec. pernamb.*, Recife, v. 19, n. 2, p. 74-78, jul./dez. 2014

DE OLIVEIRA, C. M. s et al. Genetic diversity in populations of *Dalbulus maidis* (DeLong and Wolcott) (Hemiptera: Cicadellidae) from distant localities in Brazil assessed by RAPD-PCR markers. *Environmental Entomology*, v. 36, n. 1, p. 204–212, 2007. Disponível em: [https://doi.org/10.1603/0046-225X\(2007\)36\[204:GDIPOD\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1603/0046-225X(2007)36[204:GDIPOD]2.0.CO;2)

DENG, N. et al. Closing yield gaps for rice self-sufficiency in China. *Nature Communications*, v. 10, n. 1, p. 1–9, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09447-9>

DI MAURO, G. et al. Environmental and management variables explain soybean yield gap variability in Central Argentina. *European Journal of Agronomy*, v. 99, n. September 2017, p. 186–194, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.04.012>

EPAGRI. Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina. Banco de dados de variáveis ambientais de Santa Catarina. Florianópolis: Epagri, 2020. 20p. (Epagri, Documentos, 310) - ISSN 2674-9521 (On-line).

EPAGRI/CEPA. Boletim Agropecuário: março/2021. Florianópolis, 2021, 46p. (Epagri. Documentos, 334).



Referências bibliográficas

- FRIEDRICH, E. D. et al. Agronomic optimal plant density for corn in subtropical environments. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, [s. l.], v. 57, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.PAB2022.V57.02963>
- GRASSINI, P. et al. Drivers of spatial and temporal variation in soybean yield and irrigation requirements in the western US Corn Belt. *Field Crops Research*, v. 163, n. July, p. 32–46, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.04.005>
- GRASSINI, P. et al. High-yield maize-soybean cropping systems in the US Corn Belt. Second Edied. Elsevier Inc., 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-417104-6.00002-9>
- GRASSINI, P.; CASSMAN, K. G.; ITTERSUM, M. Exploring maize intensification with the Global Yield Gap Atlas. *Better Crops with Plant Food*, v. 101, n. 2, p. 7–9, 2017.
- GODIM, A. R. O. et al. Crescimento inicial do milho cultivar BRS 1030 sob missão de nutritiva. *Revista Ceres*, v. 63, p. 706-714, 2016.
- ERNANI et al. Influência da combinação de fósforo e calcário no rendimento de milho. *R. Bras. Ci. Solo*, v. 24, p. 537-544, 2000
- HOU, P. et al. How to increase maize production without extra nitrogen input. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 160, n. December 2019, p. 104913, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104913>
- LOBELL, D. B.; CASSMAN, K. G.; FIELD, C. B. Crop Yield Gaps: Their Importance, Magnitudes, and Causes. *Annual Review of Environment and Resources*, v. 34, n. 1, p. 179–204, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1146/annurev.environ.041008.093740>
- MARIN, F. et al. Agricultural intensification can help protect the Amazon Forest and reduce global warming. p. 1–18, 1842.



Referências bibliográficas

MASSOLA JÚNIOR, N. S. et al. Quantificação de danos causados pelo enfezamento vermelho e enfezamento pálido do milho em condições de campo. *Fitopatologia Brasileira*, v. 24, p. 136-142, 1999.

MONZON, J. P. et al. Fostering a climate-smart intensification for oil palm. *Nature Sustainability*, v. 4, n. 7, p. 595–601, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00700-y>

RATTALINO EDREIRA, J. I. et al. Assessing causes of yield gaps in agricultural areas with diversity in climate and soils. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 247, n. April, p. 170–180, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.07.010>

RIBEIRO, B. S. M. R. *Ecofisiologia do milho visando altas produtividade*. Santa Maria: GR, 1 ed., 2020.

RIBEIRO, L. P.; CANALE, M. C. Cigarrinha-do-milho e o complexo de enfezamentos em Santa Catarina: panorama, patossistema e estratégias de manejo. *AGROPECUÁRIA CATARINENSE*, v. 34, p. 22-25, 2021.

SABATO, E. O. Manejo do risco de enfezamentos e da cigarrinha no milho. *Comunicado técnico* 226. Sete Lagoas: EMBRAPA, 2018. 18p. ISSN 1679-0162.

SANDHU, R.; IRMAK, S. Performance assessment of Hybrid Maize model for rainfed, limited and full irrigation conditions. *Agricultural Water Management*, v.242, p.106402, 2020. Disponível em: [10.1016/j.agwat.2020.106402](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106402).

SILVA, J. V. et al. Revisiting yield gaps and the scope for sustainable intensification for irrigated lowland rice in Southeast Asia. *Agricultural Systems*, v. 198, n. August 2021, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103383>

SOLTANI, A.; SINCLAIR, T. R. Modeling physiology of crop development, growth and yield. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1079/9781845939700.0000>

TAIZ, L. et al. *Fisiologia e desenvolvimento vegetal* Diversidade vegetal. 2017. v. 6 ed. TEIXEIRA, Flavia França et al. Pré-melhoramento de milho quanto à resistência a enfezamentos. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, v. 48, n. 1, p. 51–58, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2013000100007>

VAN ITTERSUM, M. K. et al. Yield gap analysis with local to global relevance-A review. *Field Crops Research*, v. 143, p. 4–17, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.009>

