

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MATO GROSSO “Carlos Alberto Reyes
Maldonado”**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GENÉTICA E MELHORAMENTO DE
PLANTAS**

MARCOS CORBELLINI

**Adaptabilidade geográfica para otimização da recomendação de
cultivares de soja em Mato Grosso**

SINOP

MATO GROSSO - BRASIL

JULHO - 2023

MARCOS CORBELLINI

Adaptabilidade geográfica para otimização da recomendação de cultivares de soja em Mato Grosso

Dissertação apresentada à UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MATO GROSSO, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento de Plantas, para a obtenção do título de “Mestre”.

Orientador:

Prof. Dr. Flávio Dessaune Tardin

Coorientador:

Dr. Lenio Urzeda Ferreira

SINOP

MATO GROSSO - BRASIL

JULHO - 2023

Luiz Kenji Umeno Alencar CRB 1/2037

CORBELLINI, Marcos.

C789a Adaptabilidade Geográfica para Otimização da
Recomendação de Cultivares de Soja em Mato Grosso / Marcos
Corbellini – Alta Floresta/Cáceres/Tangará da Serra, 2023.
50 f.; 30 cm. (ilustrações) Il. color. (não)

Trabalho de Conclusão de Curso
(Dissertação/Mestrado) – Curso de Pós-graduação Stricto Sensu
(Mestrado Acadêmico) Genética e Melhoramento de Plantas,
Faculdade de Ciências Biológicas e Agrárias, Multicampi,
Universidade do Estado de Mato Grosso, 2023.

Orientador: Flávio Dessaune Tardin

Coorientador: Lenio Urzeda Ferreira

1. Produtividade. 2. Glycine Max. 3. Adaptação. 4. Fatores
Climáticos. 5. Covariáveis Ambientais. I. Marcos Corbellini.
II. Adaptabilidade Geográfica para Otimização da Recomendação
de Cultivares de Soja em Mato Grosso: .

CDU 633.34(817.2)

MARCOS CORBELLINI

Adaptabilidade geográfica para otimização da recomendação de cultivares de soja em Mato Grosso

Dissertação apresentada à UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MATO GROSSO, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento de Plantas, para a obtenção do título de “Mestre”.

Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 FLAVIO DESSAUNE TARDIN
Data: 27/08/2023 22:49:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Presidente: Orientador Prof. Dr. Flávio Dessaune Tardin
(EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária)

Documento assinado digitalmente
 THIAGO ALEXANDRE SANTANA GILIO
Data: 06/09/2023 21:28:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Thiago Alexandre Santana Gilio
(UFMT – Universidade Federal de Mato Grosso)

Documento assinado digitalmente
 LENIO URZEDA FERREIRA
Data: 07/09/2023 00:09:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Lenio Urzeda Ferreira
(Syngenta Seeds)

Documento assinado digitalmente
 JOSE FRANCISCO FERRAZ DE TOLEDO
Data: 06/09/2023 16:41:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. José Francisco Ferraz de Toledo
(EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária)

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida e pela oportunidade em realizar esse mestrado.

À minha esposa e companheira de vida Débora, por juntos formarmos uma família unida, onde encontro apoio e verdadeira felicidade. Ao meu filho Joaquim, que me leva constantemente a uma grande jornada interior de aprendizado e transformação. Aos meus pais, Nilo e Suely, pela minha origem e criação. Com vocês, aprendo todos os dias, na prática, a conjugar o verbo amar.

À Universidade do Estado de Mato Grosso “Carlos Alberto Reyes Maldonado” (UNEMAT) e ao Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento de Plantas (PGMP), em especial aos meus professores, pela formação, ensinamentos e oportunidade de desenvolvimento acadêmico e científico.

Ao Orientador, Prof. Dr. Flávio Dessaune Tardin, por todo o apoio, confiança, dedicação e ajuda na elucidação das dúvidas que surgiram. Ao Coorientador, Prof.Dr. Lenio Urzeda, por transmitir de forma clara, objetiva e direta as orientações necessárias na elaboração do projeto, pelo incentivo durante minha busca de aprimoramento profissional e também por seu exemplo de profissionalismo. A vocês meu muito obrigado.

À Syngenta Seeds, por autorizar o uso dos dados experimentais para realização deste estudo e pela oportunidade de colaborar cientificamente para o desenvolvimento da agricultura brasileira.

Aos companheiros de trabalho e amigos de Lucas do Rio Verde-MT, Agenor Melo, Daniel Bobek, Carlos Rosa, José DiOliveira, Dra. Karen Rodrigues Toledo e Dr. Diego Fraga, pelo companheirismo e apoio.

Aos membros da banca examinadora, pela disponibilidade e flexibilidade para a avaliação dessa tese.

BIOGRAFIA

MARCOS CORBELLINI, nascido no dia 29 de julho de 1987, na cidade de Campo Erê - SC, filho de Nilo José Corbellini e Suely Corbellini. Bacharel em Agronomia pela Faculdade Centro Mato-grossense - FACEM, Sorriso - MT no ano de 2020. Em março de 2021, iniciou o curso de Mestrado pelo Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento de Plantas, na linha de pesquisa em Melhoramento Genético Vegetal na Universidade do Estado de Mato Grosso - UNEMAT, Alta Floresta, MT.

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2. REVISÃO DE LITERATURA..... | 3 |
| 2.1 Importância do melhoramento de plantas..... | 3 |
| 2.2 Interação de genótipo com ambiente..... | 4 |
| 2.3 Adaptabilidade e estabilidade..... | 5 |
| 2.4 Caracterização ambiental: covariáveis edafoclimáticas..... | 7 |
| 2.5 Geoestatística aplicada à experimentação..... | 9 |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS..... | 11 |
| 3.1 Caracterização da região e abrangência do estudo..... | 11 |
| 3.2 Experimento e dados fenotípicos..... | 12 |
| 3.3 Covariáveis ambientais..... | 12 |
| 3.4 Análises estatísticas..... | 13 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 15 |
| 4.1 Efeitos das covariáveis ambientais sobre a adaptação das cultivares..... | 17 |
| 4.2 Distribuição geoespacial da produtividade..... | 24 |
| 4.3 Recomendação otimizada de cultivares..... | 27 |
| 5. CONCLUSÕES..... | 30 |
| 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 31 |
| APÊNDICES..... | 39 |

RESUMO

CORBELLINI, MARCOS; M. Sc.; UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MATO GROSSO; julho 2023; **Adaptabilidade geográfica de soja para otimização da recomendação de cultivares de soja em Mato Grosso**; Orientador: Prof. Dr. Flávio Dessaune Tardin; Coorientador: Dr. Lenio Urzeda Ferreira.

Ensaio multambientais associados a técnicas de geoestatística, com o auxílio de variáveis ambientais, podem subsidiar a compreensão de complexas interações genótipo por ambiente (GxA) e, conseqüentemente, dos limites adaptativos de cultivares de soja. Assim, objetiva-se com este trabalho compreender o efeito das covariáveis ambientais sobre a adaptação da soja, bem como prever o comportamento de cultivares sob variações ambientais e com isso, recomendar cultivares de soja nos ambientes mais favoráveis visando à maximização da produtividade média. Ensaio de rendimento foram conduzidos no delineamento em Blocos Casualizados (DBC), com três repetições, ao longo de três safras, em 28 localidades. Avaliou-se um conjunto de 32 cultivares em cada ensaio, as quais representam diferentes grupos de maturidade (7.5 – 8.5). Adotou-se como descritores ambientais as covariáveis: precipitação acumulada (PrAc), temperatura mínima (Tmin), temperatura média (Tmed), temperatura máxima (Tmax), fotoperíodo (FTP), umidade relativa do ar (UR), teor de argila (TAR), disponibilidade hídrica no solo (DHS) e altitude (ALT). Após ajuste de médias das cultivares, por Modelo Linear Misto (MLM), aplicou-se a Regressão-Krigagem para espacialização da produtividade, utilizando-se as variáveis ambientais como preditores. Verificou-se que variáveis ambientais explicam 32,54% da interação GxA, sendo que a DHS é a covariável que mais impacta a adaptação das cultivares de soja, contribuindo com 7,80%. Mapas de produtividade de cada cultivar foram obtidos e, por fim, elaborou-se um mapa de recomendação visando à maximização da produtividade.

Palavras-chave: produtividade, *Glycine max*, adaptação, fatores climáticos, covariáveis ambientais, geoestatística.

ABSTRACT

CORBELLINI, MARCOS; M. Sc.; FEDERAL UNIVERSITY OF MATO GROSSO; July 2023; **Geographic adaptability for optimization of soybean cultivar recommendation to Mato Grosso**; Advisor: Dr. Flávio Dessaune Tardin; Co-advisor: Dr. Lenio Urzeda Ferreira.

Yield multi-location trials associated to geostatistical techniques, with environmental covariables, might provide a better understanding of G x E interactions and, consequently, of adaptation limits of soybean cultivars. Then, the main objective of this study is understanding the environmental covariables effects on soybean adaptation, as well as predicting the adaptation of soybean under environmental variations and, with that, recommend each soybean cultivars to favorable environments aiming maximize the average yield. The trials were conducted in randomized complete block (RCB) design, with three replicates, over three years, in 28 locations. A group of 32 cultivars (commercial and pre-commercial) were evaluated in each trial, which represents different maturity groups (7.5-8.5). The covariables adopted as environmental descriptors were accumulated rainfall, minimum temperature, mean temperature, maximum temperature, photoperiod, relative humidity, soil clay content, soil water content and altitude. After adjusting means through Mixed Linear Model, the Regression-Kriging procedure was applied to spacialize the yield, using environmental covariables as predictors. The covariables explained 32,54% of the interaction GxE, being the soil water content the most important to the adaptation of soybean cultivars, contributing with 7,80%. Yield maps of each cultivar were obtained and, hence, the yield maximization map based on cultivar recommendation was elaborated.

Key words: yield; *Glycine max*; adaptation; climatic factors, environmental covariables, geostatistics.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor de soja (*Glycine max* (L) Merrill) do mundo, com plantio total de, aproximadamente 156 milhões de toneladas, o que corresponde a 42% da produção mundial, considerando-se a Safra 2022/23. A área semeada no país totalizou em, aproximadamente, 44 milhões de hectares, apresentando um aumento proporcional ao dobro da área cultivada ao longo dos últimos quinze anos (CONAB, 2023; USDA, 2023). Dentre os estados brasileiros, o Mato Grosso é o maior produtor com 45,5 milhões de toneladas, correspondendo a 29% da produção do país. Neste estado, a área semeada na safra 2022/23 foi de 12 milhões de hectares (CONAB, 2023).

Esse aumento expressivo em área cultivada se deve aos avanços tecnológicos no manejo cultural e principalmente, ao melhoramento genético, mediante a adaptação de novas cultivares as baixas latitudes. Atualmente, a produção de soja abrange praticamente todas as regiões do país, tanto tropicais quanto subtropicais, o que resulta em elevada diversidade ambiental para produção. De tal modo, atinge extensões territoriais com amplitude superior a 30° de latitude, sob inúmeras condições edafoclimáticas e diferentes sistemas de produção (Ferreira, 2018).

O ambiente exerce grande influência no comportamento fenotípico da soja, especialmente por meio de fatores edafoclimáticos, tais como: disponibilidade de água, temperatura e fotoperíodo (Embrapa, 2013). Do mesmo modo, as diferentes normas de reação demonstradas por cada genótipo, em variados ambientes de cultivo, resultam em uma elevada complexidade da interação GxA, o que dificulta sobremaneira a seleção de cultivares superiores e adequada recomendação em regiões-alvo.

Um dos principais objetivos do melhoramento de plantas é o desenvolvimento de novas cultivares que acumulem elevada produtividade e adaptação ampla aos diferentes ambientes de cultivo (Carvalho *et al.*, 2002). O uso de informações ambientais na análise de ensaios de rede pode proporcionar uma melhor interpretação da interação genótipos por ambientes (GxA), de modo a possibilitar a predição do comportamento de cultivares em ambientes não amostrados, mediante a estimativa das normas de reação de cada genótipo (Malosetti *et al.*, 2013; Costa Neto *et al.*,

2020; Resende *et al.*, 2020). Assim, a norma de reação (que vem do alemão, *reaktionsnorm* = curva de padrão de resposta) é a responsividade do genótipo em relação à alguma variação ambiental (Rauw e Gomez-Raya, 2015).

Para a avaliação e seleção de cultivares, inicialmente, elege-se um conjunto de ambientes para alocação dos ensaios de rendimento. Geralmente, a escolha de locais visa representar a variação ambiental relevante, adotando-se ambientes-alvo para recomendação de cultivares de soja. Uma das principais causas de redução da produtividade é a baixa assertividade na recomendação de cultivares, sobretudo em relação à regionalização e aspectos fitotécnicos. Muitas vezes, há a extrapolação da extensão geográfica de adaptação de determinada cultivar, o que resulta em baixo rendimento (Ferreira, 2018). Igualmente, ocorre grande dificuldade em se compreender tais limites, pois há complexas interações GxA provenientes de uma infinidade de efeitos ambientais que modulam, simultaneamente, a expressão gênica e, por conseguinte, o comportamento da cultivar. Além disso, comumente se utiliza limites políticos de estados e municípios como direcionadores para caracterização ambiental e subsequente recomendação de cultivares. Contudo, é pouco provável que os limites geográficos territoriais se coincidam com as variações ambientais relevantes para adaptação da soja.

Experimentos multiambientes associados as técnicas de geoestatística, com o auxílio de variáveis ambientais, podem subsidiar a compreensão da interação GxA e dos limites adaptativos de cultivares de soja, mediante a modelagem de normas de reação ao longo de diferentes ambientes. Objetivando-se, deste modo, simular o comportamento de cultivares em ambientes não incluídos na rede experimental.

Dentre várias técnicas que podem ser utilizadas para a modelagem espacial das normas de reação, destaca-se a Regressão-Krigagem, que consiste na espacialização de determinada variável mediante o procedimento de Krigagem e regressão múltipla de preditores. Nesse contexto, objetivou-se com o presente estudo: (i) compreender a adaptação de cultivares de soja no estado de Mato Grosso, por meio da espacialização da produtividade, de modo a conhecer os limites geográficos adaptativos de cultivares de soja; (ii) Estimar os efeitos do posicionamento geográfico e de variáveis ambientais sobre a adaptação de cultivares de soja nessa região; (iii) elaborar mapas de recomendação de cultivares, visando à maximização da produtividade.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Importância do melhoramento de plantas

Em espécies cultivadas o melhoramento atua através de características que busquem aumentar o rendimento e produtividade, harmonizando com boas práticas de manejo das culturas, promovendo facilidade na colheita e melhorando a palatabilidade (Smýkal *et al.*, 2018). Características relacionadas ao melhoramento variam entre populações de uma espécie cultivada por atributos como adaptação a uma determinada região, viabilidade a práticas agrícolas modernas e qualidade dos materiais. Em todas as etapas, o processo de domesticação é baseado na seleção visual, variação ambiental e interações genótipo em ambiente (Smýkal *et al.*, 2018; Turner-Hissong *et al.*, 2020). Isto influencia qualidades importantes para o melhoramento das culturas como mudanças fenotípicas, herdabilidade e a eficiência de seleção do ganho genético (Larson *et al.*, 2014).

O melhoramento de plantas é uma ciência baseada em diversos conhecimentos genéticos e agronômicos, que servem de suporte para o melhorista decidir quais genitores serão cruzados, qual método de seleção será empregado e qual cultivar lançado no mercado (Borém, 2017). No melhoramento genético da soja, por exemplo, estão envolvidas várias fases, desde o desenvolvimento das populações, processos de seleção e avaliações das linhagens (Almeida e Kiihl, 1998). Esta oleaginosa é instrumento de pesquisa em diversas instituições públicas e privadas que visam o aumento da produtividade de grãos e expansão de seu cultivo (Bornhofen *et al.*, 2015). A biotecnologia moderna tem consolidado o sucesso destas pesquisas devido ao maior conhecimento sobre os genes e descoberta da estrutura do DNA, permitindo grandes avanços no melhoramento genético de plantas.

As técnicas de melhoramento de plantas para aumentar o rendimento agrícola são bem-sucedidas e têm sido amplamente utilizadas na agricultura, principalmente nas últimas cinco décadas. Além disso, sob variadas condições ambientais, o melhoramento genético é ainda mais necessário para o desenvolvimento de cultivares resistentes a múltiplos estresses ambientais. Dentre os objetivos básicos do melhoramento genético de plantas, destacam-se o aumento da produtividade, melhoria da qualidade nutricional dos alimentos, precocidade, uniformidade, longevidade da lavoura (espécies perenes), compatibilidade com colheita mecanizada

(arquitetura da planta) e introdução de resistência a pragas e doenças (Amabile, 2018).

2.2 Interação de genótipo com ambiente

A interação genótipos por ambientes (GxA) é um fenômeno relevante e amplamente estudado no melhoramento de plantas, podendo influenciar diretamente o ganho genético ao longo dos ciclos de seleção. Em um programa de melhoramento de soja, devido à biologia desta espécie, especialmente pela fotossensibilidade e responsividade às variações térmicas, demanda-se um elevado número de locais de teste para uma adequada estimativa da interação GxA. Evidentemente, o número de locais de avaliação depende da magnitude da variância ambiental existente em determinada região (Yan, 2015), sendo, via de regra, essa etapa a mais cara e trabalhosa. Assim, geralmente, programas de melhoramento apresentam um número limitado de locais de teste devido à restrita capacidade de avaliação experimental. Uma adequada avaliação da interação GxA pode proporcionar informações para se contornar os posicionamentos indesejáveis e aproveitar os efeitos benéficos às cultivares, resultando em recomendações mais expressivas (Chaves, 2001).

A interação GxA pode ser definida como a resposta diferencial de genótipos em diferentes ambientes, sendo que o efeito dessa interação pode indicar que os indivíduos mais produtivos em um ambiente podem ter comportamento distinto em outro. Isso torna a seleção de linhagens mais complexa (Resende, 2007), uma vez que a interação GxA influencia diretamente na expressão fenotípica de um determinado caráter (Comstock e Moll, 1963). Pode ocorrer de duas formas: simples, proporcionada pela resposta diferencial dos genótipos diante da melhoria ambiental, alterando apenas a magnitude da resposta; ou complexa, através da qual é compreendida quando há comportamentos diferenciais dos genótipos em diferentes condições de ambiente, alterando a magnitude e a classificação dos genótipos em virtude das diferenças ambientais (Robertson, 1959).

A variação dos ambientes altera a resposta relativa dos genótipos sob duas maneiras: previsíveis e imprevisíveis. As variações previsíveis do ambiente alteram densidade, época de semeadura, manejo cultural adotado, latitude, altitude, entre outros. As imprevisíveis estão ligadas às variações de natureza temporal, como a

disponibilidade hídrica e distribuição de chuvas, temperatura, intensidade luminosa etc. Portanto, o efeito do ambiente representa, na realidade, uma mistura de efeitos de fatores fixos (previsíveis) e aleatórios (imprevisíveis) (Allard e Bradshaw, 1964).

Para recomendação e predição do rendimento de cultivares é necessário o conhecimento das relações entre fatores ambientais e expressão fenotípica. O conhecimento aprofundado acerca da interação GxA e consequentes variações adaptativas das cultivares pode minimizar prejuízos decorrentes de estresses e maximizar o rendimento nos cultivos. Uma cultivar de soja deve apresentar alta produtividade e estabilidade de produção, bem como ampla adaptação aos mais diversos ambientes existentes na região onde é recomendada (França Neto *et al.*, 2010). Entretanto, em soja, este é um grande desafio, devido à biologia da espécie que impõe limitações ambientais para recomendação e uso de cultivares.

2.3 Adaptabilidade e estabilidade

A seleção de linhagens produtivas e adaptadas a vários ambientes é um dos objetivos básicos do melhoramento genético de plantas. Entretanto, esta seleção se torna complexa devido à interação GxA, a qual promove manifestação variável do comportamento de cultivares em função de alterações ambientais. O conhecimento e estimativa da interação GxA não proporciona informações detalhadas sobre o comportamento de cada cultivar em relação às variações ambientais, sendo necessário, geralmente, realizar análises de adaptabilidade e estabilidade. Essas análises têm diferentes fundamentações e podem ser baseadas em análises de regressão, métodos não-paramétricos e métodos multiplicativos (Cruz e Regazzi, 2001; Resende, 2007). O estudo da adaptabilidade e estabilidade contribui para identificação de genótipos de comportamento previsível e que sofram poucas alterações de acordo com as variações ambientais, garantindo a seleção dos materiais com melhor estabilidade e previsibilidade de produção dentro da região-alvo. Teoricamente, assume-se que é, praticamente, impossível que um determinado genótipo seja superior em todas as localidades em análises de ensaios de rendimento multiambientes (Allard e Bradshaw, 1964; Eberhart e Russell, 1966). Assim, faz-se necessário compreender a interação GxA detalhadamente e, deste modo, direcionar cada cultivar aos ambientes que lhe são mais favoráveis.

Inúmeras são as definições para adaptabilidade e estabilidade encontradas na literatura, apesar de não ter um consenso científico sobre seu conceito, sugere-se que adaptabilidade é a capacidade dos genótipos aproveitarem vantajosamente o estímulo do ambiente, e, para estabilidade, classifica-se os genótipos que possuem comportamento previsível em função das variações ambientais (Eberhart e Russell, 1966; Cruz e Carneiro, 2006). A estabilidade é dividida em três tipos, sendo: “tipo I”, variância entre ambientes, é pequena (invariância) e medida pelo quadrado médio da variação do desempenho da cultivar/ambiente; “tipo II”, consiste em se mensurar o comportamento paralelo ao desempenho médio das cultivares analisadas e “tipo III”, tem como base a previsibilidade do comportamento de uma cultivar diante das pressões ambientais medida por um coeficiente de determinação ou pelo quadrado médio dos desvios da regressão (Lin *et al.* 1986).

O método estabelecido por Eberhart e Russel (1966), oferece informações sobre o desempenho relativo de cada genótipo em relação à média dos ambientes, utilizando índices ambientais, bem como coeficiente de regressão angular, que define a adaptabilidade do genótipo. Neste método, considera-se, primeiramente, a média geral do genótipo. O coeficiente de regressão linear (β_i) define a adaptabilidade do genótipo, deste modo genótipos com coeficiente superior a 1,0 tem adaptação específica a ambientes favoráveis. Aqueles com coeficientes de regressão inferiores a 1,0 são adaptados a ambientes específicos desfavoráveis ou de estresse, sendo considerados menos exigentes. Ainda, genótipos com coeficiente igual a 1,0 apresentam resposta média à variação ambiental e são mais adaptados a ambientes médios (Chaves, 2001).

Outro método estatístico tradicionalmente utilizado é análise de variância integrada à análise de componentes principais: modelo AMMI (*Additive Main effects and Multiplicative Interaction analysis*). Essa técnica integra duas análises em uma só (componentes aditivos, de genótipos e ambientes e componentes multiplicativos da interação GxA). A principal vantagem desse método é a identificação de cultivares com adaptação específica, pela eficiência da análise em identificar genótipos vencedores em cada local.

O efeito da interação GxA pode ser reduzido em diferentes modos, (i) identificando cultivares mais estáveis entre ambientes, (ii) realizando o agrupamento de regiões semelhantes com base no microambiente ou (iii) identificando cultivares

específicas para cada ambiente (Ramalho *et al.*, 1993). Um melhor aproveitamento da interação genótipo com ambiente é obtido quando os genótipos identificados como os mais produtivos e adaptados em um ambiente específico podem ser recomendados para estes ambientes (Ramalho *et al.* 1993). Segundo Júnior (2013), isso pode aumentar a produção total de regiões específicas, pois as linhagens selecionadas resultam na obtenção de cultivares com maior estabilidade e produtividade em uma determinada região.

Métodos para entendimento e compreensão da adaptabilidade e estabilidade, que ajudem no processo de tomada de decisão, possuem baixa capacidade de prever um comportamento fenotípico ao longo de um gradiente geográfico e difícil interpretação dos conceitos genético-quantitativos. Em decorrência dessas limitações, comumente, realiza-se a recomendação de cultivares com base apenas na média fenotípica do caráter prioritário, não levando em consideração informações adicionais sobre sua adaptação. Nesse sentido, estratégias focadas na compreensão de fatores de importância ecofisiológica, junto a modelos biométricos para estudo da adaptação fenotípica, podem oferecer novas oportunidades de seleção de genótipos superiores.

2.4 Caracterização ambiental: covariáveis edafoclimáticas

Os processos de crescimento, desenvolvimento e reprodução vegetal são direcionados por um conjunto de eventos biológicos os quais são denominados, em síntese, como ambiente. Do ponto de vista do melhoramento, os fatores ambientais podem ser classificados como previsíveis e imprevisíveis. Os fatores ambientais previsíveis (fixos ou repetíveis) são os determinísticos, tais como a latitude, longitude, altitude e o tipo de solo. Já os imprevisíveis (aleatórios ou não-repetíveis) constituem as variações sazonais, em intensidade e frequência, dos fatores de propriedade estocástica (Allard e Bradshaw, 1964; Mirzawan *et al.*, 1994). Contudo, os fatores imprevisíveis podem apresentar interação com aqueles previsíveis e tornar a interação GxA altamente complexa.

Eberhart e Russel (1966) destacam a dificuldade em avaliar a adaptabilidade, dada a notória variabilidade genética existente, quanto também pela complexidade dos fatores que influenciam os ambientes naturais, sendo esses os mais influentes na resposta dos genótipos. Sendo assim, o uso de covariáveis ambientais atrelado às

médias produtivas em cada ambiente pode ser útil para encontrar os fatores intrínsecos da diferença entre os genótipos, os quais compõem majoritariamente a interação GxA.

Fatores ambientais podem afetar o crescimento e o desenvolvimento das plantas de diferentes maneiras e em diversos estádios do ciclo da cultura. (Camargo *et al.*, 1986). Dos elementos ambientais que exercem maior influência no comportamento das cultivares de soja, podemos citar: a precipitação, a temperatura, o fotoperíodo, a disponibilidade hídrica, a umidade relativa do ar e o teor de argila, esses fatores são os que mais afetam o desenvolvimento e a produtividade da cultura da soja. Nos últimos anos, a ambientalização tem sido incorporada à predição do genoma completo com o objetivo de melhor modelar a interação GxA a partir de covariáveis, permitindo uma compreensão mais profunda das possíveis variações na fonte de erro ou resíduo, podendo explicar melhor a plasticidade fenotípica dos organismos (Costa Neto, 2021).

A cultura da soja está sujeita a contínuos e variados tipos de estresse durante seu ciclo de vida, sendo que, cada estresse vai acumulando danos que vão se refletir na produtividade e qualidade do produto final (Neumaier *et al.*, 2000). A disponibilidade hídrica nas fases vegetativa e reprodutiva constitui-se, ainda, a principal limitação para a produtividade de soja. O estresse hídrico prejudica a taxa fotossintética pela abertura e fechamento dos estômatos, diminuindo assim a produção de fotos assimilados (Embrapa, 2010). Os períodos mais críticos em relação ao déficit hídrico, compreende a germinação/emergência e a floração/enchimento de grãos (Farias *et al.*, 2021). Seu excesso também promove consideráveis perdas, principalmente no enchimento de grão e maturação plena, gerando perdas qualitativas e quantitativas a cultura.

O ciclo da soja, é intensamente afetado pela temperatura e fotoperíodo (Cober *et al.*, 2001), desse modo, a responsividade fenotípica a esses fatores são diferentes entre cultivares (Setiyono *et al.*, 2007), desempenhando papel importante em sua adaptação nas diferentes latitudes, altitudes, épocas e densidades adequadas de semeadura. A soja é considerada uma planta de dias curtos, devido sua sensibilidade ao fotoperíodo, característica que restringe a adaptabilidade mais ampla da cultivar (Farias *et al.*, 2021).

Os atributos produtivos de uma cultivar de soja só poderão ser máximos se as condições ambientais forem as melhores possíveis, entretanto, sabe-se que em campo isso não é factível, pois há uma infinidade de fatores bióticos e abióticos que acometem a cultura, isoladamente ou interativamente, fazendo com que não tenhamos as condições mais desejadas (Neumaier *et al.*, 2000).

2.5 Geoestatística aplicada à experimentação

No Brasil, são poucas as abordagens que interpretam a adaptabilidade como a responsividade dos genótipos frente à variação ambiental de uma região geográfica (Costa Neto *et al.*, 2020). Dentre as principais contribuições do país podemos citar o uso de ferramentas SIG (Sistemas de Informações Geográficas), permitindo a coleta e processamento de covariáveis geográficas e produção de mapas temáticos e especializados de produtividade e adaptabilidade (Cardoso Júnior, 2013; Costa Neto, 2017). Com esse tipo de abordagem, é possível conhecer, mediante análise matemática, a interferência de cada variável ambiental na produtividade de cada genótipo, além da possibilidade de realizar previsões.

Os níveis de produção de soja nas diferentes regiões do país variam substancialmente de acordo com o posicionamento geográfico, nível tecnológico, sistema de produção e variáveis ambientais. Esses fatores podem resultar em lacunas de rendimento de magnitude considerável. Recomendação de cultivares com base em rendimentos amostrados, juntamente com auxílio de covariáveis ambientais para espacializar a produtividade a ponto de entender quais os limites adaptativos de uma cultivar, podem maximizar as estimativas e projeções de rendimentos futuros para diferentes regiões, associadas a cada genótipo, melhorando a recomendação das cultivares. Sendo assim, o uso das tecnologias como a geoestatística proporciona apoiar tecnicamente decisões estratégicas e complexas em relação a recomendação de cultivares e seus efeitos ambientais na produtividade.

A estatística clássica utiliza parâmetros como média e desvio padrão para representar um fenômeno, baseado na hipótese principal que as variações acontecem aleatoriamente de um local para outro (Srivastava, 1996). Krige (1951), indica que somente referências obtidas pela variância seriam incapazes para explicar o fenômeno em estudo. Para isso, seria imprescindível levar em consideração a

distância entre as observações. Com isso, surge o conceito da geoestatística, que considera a localização geográfica e a dependência espacial.

Para analisar a variabilidade espacial (valores para locais não medidos), a ferramenta de análise geoestatística é considerada ideal, possibilitando a construção de mapas contínuos a partir dos dados espacializados (Vieira, 2000). A partir de dados geoestatísticos pode-se estimar o valor de uma dada amostra para um ambiente onde não foi inferido, através da função de correlação espacial entre os dados com variância mínima (Vieira, 2000). Comumente, para estimar esses valores usa-se o método de regressão-krigagem, cujo nome foi dado em homenagem a Daniel G. Krige. O método de regressão-krigagem, consiste em uma técnica de interpolação espacial que combina regressão de uma variável dependente (regionalizada), utilizando-se de variáveis auxiliares, com a krigagem aplicada aos resíduos. Ademais, a krigagem normalmente oferece, estimativas não tendenciosas e com variância mínima. Tal uso indica em um melhor entendimento da influência de covariáveis edafoclimáticas nas respostas da cultura e resultados quantitativos mais facilmente interpretáveis apresentados por meio de mapas. A krigagem compreende um conjunto de técnicas geoestatísticas de ajustes usadas para aproximar dados pelo princípio que: fixado um ponto no espaço, os pontos no seu entorno são mais relevantes do que os mais afastados. Isto pressupõe a existência de dependência entre os dados, exigindo saber até onde espacialmente esta correlação importa (Isaaks e Srivastava, 1989).

Entretanto, é incontestável o benefício dessa abordagem na avaliação de genótipos em ensaios multiambientais, o que justifica o uso na atualidade por meio de uma agricultura informada. Esse método descrito não é concorrente, mas sim complementar, pois proporcionam diferentes compreensões dos padrões ambientais na adaptação fenotípica.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da região e abrangência do estudo

Os dados utilizados neste estudo são provenientes de ensaios de rendimento do programa de melhoramento genético de soja da Syngenta Seeds, conduzidos em 28 localidades do Estado de Mato Grosso, em regiões relevantes na produção de soja, abrangendo as Região edafoclimáticas (REC) 401, 402 e 403 (Apêndice A) (Figura 1). Os ensaios foram conduzidos por três anos, ao longo das safras agrícolas de 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022. A região alvo do estudo, destaca-se por sua grande extensão territorial e inserção em três biomas: Amazônia, Cerrado e Pantanal, refletindo alta heterogeneidade devido diferentes condições edafoclimáticas e bióticas presentes nos ambientes dessa região. Apresenta duas estações bem definidas: Chuvosa e seca, sendo a chuvosa, de outubro a abril e a seca, de maio a setembro. As médias anuais de precipitações no estado, variam de 1.200 a 2.200 mm, em média, com maiores valores ao norte do estado.

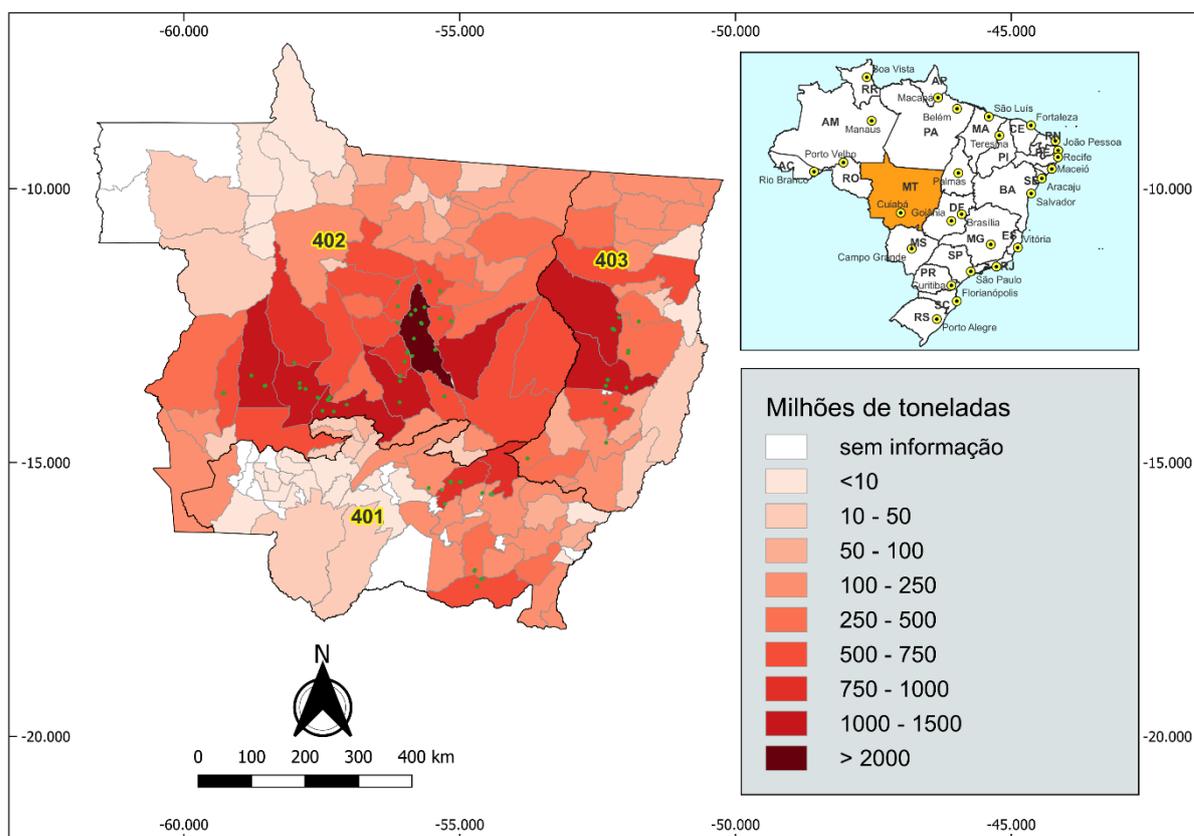


Figura 1. Distribuição geográfica dos locais de ensaio de campo (pontos verdes), nas safras de 2019/2020 a 2021/2022. Os destaques em escala laranja indicam a produção de soja, em milhões de toneladas, por municípios, ao longo do estado mato-grossense (IBGE, 2021).

3.2 Experimento e dados fenotípicos

Os ensaios foram conduzidos no Delineamento em Blocos Completos (DBC), casualizados em três repetições. Avaliou-se um conjunto de 32 cultivares (comerciais e pré-comerciais) de soja em cada experimento, as quais representam diferentes grupos de maturidade (7.5 – 8.5). Cada repetição foi constituída por quatro fileiras de 5 m de comprimento, espaçadas em 0,5 m. A área útil da parcela foi de 10 m², sendo determinada a produtividade de grãos, colhendo toda a parcela. Então, calculou-se as produtividades (kg.ha⁻¹), à umidade de 13% (b.u).

O manejo dos experimentos foi realizado conforme as recomendações técnicas previstas para a cultura da soja no Brasil (Embrapa, 2020). Em todos os casos, a semeadura foi realizada nas épocas adequadas para cada região, dentro das recomendações do Zoneamento Agrícola de Risco Climático – ZARC para o estado do Mato Grosso (MAPA, 2023).

3.3 Covariáveis ambientais

As covariáveis ambientais foram obtidas no sistema Meteoblue (2022). Após prévia seleção de covariáveis, com base no nível de redundância, analisado par a par, e na correlação com a produtividade. Deste modo, as covariáveis geográficas e ambientais consideradas nesta abordagem foram: precipitação total (PrAc), temperatura mínima (Tmin), temperatura média (Tmed), temperatura máxima (Tmax), fotoperíodo (FTP), umidade relativa do ar (UR), teor de argila (TAR), disponibilidade hídrica no solo (DHS) e altitude (ALT) (Tabela 1).

Para obtenção das covariáveis, primeiramente construiu-se um polígono (arquivo vetorial) com grade quadriculada de 10 km x 10 km, totalizando 15.113 pontos ao longo da extensão do estado de Mato Grosso. Posteriormente, realizou-se a interpolação de cada variável, adotando-se o método IDW (*Inverse Distance Weighting*). Destaca-se que foi adotado o intervalo de 01/outubro a 15/março para a delimitação da janela útil de soja ao longo dos três anos. Portanto, as covariáveis representam adequadamente as condições ambientais ocorrentes nas safras.

Em relação à variável TAR, considerou-se uma camada de 0-15 cm de profundidade. Para tanto, assumiu-se comportamento estático para essa variável,

entendendo-se que essa informação apresente variações ao longo dos três anos considerados no estudo. Quanto à altitude, utilizou-se o “modelo digital de elevação” – SRTM (Weber *et al.*, 2004), com uma resolução similar às demais variáveis.

Tabela 1. Covariáveis ambientais relevantes para adaptação da soja utilizadas no estudo

| Covariável | Abreviação | Fonte de dados | Unidade |
|---------------------------------|------------|--------------------|---------|
| Precipitação total | PrAc | CHIPS2 (5.0km) | mm |
| Disponibilidade hídrica no solo | DHS | ERA5 (30.0km) | Decimal |
| Fotoperíodo | FTP | ERA5 (30.0km) | Minutos |
| Temperatura máxima | Tmax | ERA5 (30.0km) | °C |
| Temperatura média | Tmed | ERA5 (30.0km) | °C |
| Temperatura mínima | Tmin | ERA5 (30.0km) | °C |
| Umidade Relativa ¹ | UR | ERA5 (30.0km) | % |
| Teor de Argila ² | TAR | SOILGRIDS (0.25km) | % |
| Altitude | ALT | NASA | metros |

¹Observação a dois metros acima do solo; ²camada de 0-15 cm de profundidade.

3.4 Análises estatísticas

Inicialmente, aplicou-se o Modelo Linear Misto (LMM) [1] e, em seguida, a respectiva análise de *deviance*, adotando-se 5% de significância. Posteriormente, obteve-se as produtividades médias ajustadas de cada cultivar, bem como os efeitos associados às fontes de variação genótipo e interação genótipo x ambiente. Para isso, utilizou-se o software R (R Core Team, 2021), com o auxílio do pacote lme4, para o ajuste deste modelo.

$$Y_{ijk} = u + a_i + b_{j/i} + g_k + ga_{ik} + e_{ijk} \quad [1]$$

em que:

Y_{ijk} : produtividade observada em cada parcela;

u : intercepto do modelo;

a_i : efeito aleatório de ambiente;

$b_{j/i}$: efeito aleatório e hierárquico de bloco dentro de ambiente;

g_k : efeito aleatório de cultivares;

ga_{ik} : efeito aleatório da interação entre genótipo e ambiente;

e_{ijk} : erro experimental, assumido $e_{ijk} \sim N(0, \sigma^2)$.

Após o ajuste de médias de cada cultivar, em nível local, aplicou-se o método de Regressão-Krigagem (Hengl *et al.* 2004) para a espacialização da variável produtividade mediante uso de covariáveis ambientais, conforme equação [2]:

$$\hat{z}(s_0) = \hat{m}(s_0) + \hat{e}(s_0) \quad [2]$$

$$= \sum_{k=0}^p \hat{\beta}_k \cdot \hat{q}_k(s_0) + \sum_{i=1}^n \hat{\lambda}_i \cdot e(s_i)$$

em que:

$\hat{z}(s_0)$: predição da variável regionalizada numa posição não amostrada s_0 ;

$\hat{m}(s_0)$: é o ajuste parcial, por regressão, em determinada vizinhança (*trend*);

$\hat{e}(s_0)$: é o resíduo interpolado por krigagem;

$\hat{\beta}_k$: são as estimativas ($k = 0, 1, 2, \dots, p$) de quadrados mínimos generalizados dos coeficientes de regressão parciais, associados às p variáveis preditoras selecionadas;

$\hat{q}_k(s_0)$: são os valores assumidos pelas variáveis preditoras (covariáveis ambientais) na posição s_0 , com $\hat{q}_0(s_0) = 1$;

$\hat{\lambda}_i$: são os ponderadores derivados da estrutura espacial de resíduos;

$e(s_i)$: é o resíduo da regressão linear múltipla numa posição amostrada s_i .

Para isso, inicialmente realizou-se a espacialização da interação ga_{ik} e, posteriormente, os valores obtidos foram somados aos efeitos principais de genótipos e intercepto. Deste modo, adotou-se o preditor $Y_{ij} = u + g_i + ga_{ij}$ para obtenção das médias em cada coordenada geográfica. Este procedimento foi realizado mediante o software SAGA (Conrad *et al.*, 2015) e software R (R Core Team, 2021), explorando-se o pacote *rsaga* (Brenning, 2010), assim como a elaboração dos mapas posteriormente, utilizando o software Quantum GIS (QGIS Development Team, 2021).

A espacialização da produtividade foi realizada apenas para as oito cultivares mais produtivas, conforme média geral em todos os locais amostrados. Posteriormente, obteve-se uma camada representando quais as delimitações adaptativas de cada cultivar com base nos valores máximos de produtividade. Desse modo, elaborou-se o mapa otimizado para recomendação das cultivares.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na análise de *deviance* para produtividade de grãos (Tabela 2), constatou-se diferenças significativas ($p < 0,05$) para os fatores G, A e para a interação GxA. A significância do fator G indica que há diferenças entre as produtividades das cultivares, em nível genético, ao longo de todos os ambientes amostrados. Por outro lado, diferenças significativas em interação GxA ($p < 0,05$) evidenciam um comportamento diferencial das cultivares, nos diferentes ambientes. Isso sugere diferentes capacidades adaptativas das cultivares em resposta às variações ambientais. A significância do fator A indica variações do comportamento das cultivares, independentemente das interações GxA. Portanto, são diferenças ambientais que resultam em alterações fenotípicas médias sobre todas as cultivares.

Os efeitos ambientais (A) representam 31,5% da variação fenotípica observada para produtividade. Enquanto os efeitos principais de natureza genética (G) representaram 16,29% e efeitos da interação (GxA) totalizaram 16,61%. Assim, a relação entre GxA/G é de 51%, o que indica níveis adaptativos razoáveis das cultivares ao longo dos ambientes amostrados. A quantificação destes valores são elementos chaves para entendimento da adaptação fenotípica (Charmet *et al.*, 1997) e regionalização da recomendação de cultivares. Comportamento similar da variação fenotípica, entre esses fatores, foram observadas por (Marchiori *et al.*, 2016; Matei *et al.*, 2017; Kocaturk *et al.*, 2019; Mwiinga *et al.* 2020).

Tabela 2. Resultados da análise de *deviance*, componentes de variância e coeficientes de determinação (R^2) referentes à análise conjunta para produtividade de grãos de 32 cultivares de soja, avaliadas ao longo de três safras subsequentes (2019/2020 a 2021/2022) em 89 ambientes do estado de Mato Grosso

| Fatores ¹ | <i>Deviance</i> | LRT(χ^2) | AIC | Variância | Desvio-padrão | R^2 |
|----------------------|-----------------|-----------------|--------|-----------|---------------|--------|
| <i>Genótipos (G)</i> | 210054 | 557,12* | 210066 | 53578,73 | 231,47 | 16,29% |
| <i>Ambiente (A)</i> | 210504 | 1006,78** | 210516 | 200288,54 | 447,54 | 31,50% |
| <i>Interação GxA</i> | 212400 | 2903,3* | 212412 | 55650,96 | 235,90 | 16,61% |
| <i>Bloco</i> | 210911 | 1414,5* | 210923 | 44831,90 | 211,74 | 14,91% |
| Resíduo | - | - | - | 86388,07 | 293,92 | 20,69% |
| Modelo | 224486 | - | - | - | - | - |

¹ G, GxA correspondem aos efeitos genéticos e de interações entre genótipos x ambientes; *e** valores significativos pelo teste qui-quadrado, a 5% ou a 1% de probabilidade.

A sensibilidade da soja ao fotoperíodo e à temperatura, entre outros fatores, contribuem substancialmente para o aumento da variância associada à interação GxA. O que resulta em maior número de cultivares necessárias para cobrir adequadamente uma região-alvo para a maximização da produtividade. Diferentemente de outras espécies, tais como milho (Singamsetti *et al.*, 2021), algodão (Nascimento *et al.*, 2020) e cana (Montes *et al.*, 2021), que apresentam menor interação GxA e, conseqüentemente, maior amplitude adaptativa que a soja. Além disso, espécies cujos materiais usados para cultivo apresentam maior nível de heterose ou ploidia, geralmente apresentam maior capacidade adaptativa (homeostasis), seja pela variabilidade alélica ou pelo número de cópias de cada alelo (Vrijenhoek e Lerman, 1982; Fridman, 2015).

Nota-se considerável proximidade das produtividades médias, isso decorre do fato de que o conjunto de cultivares se resume às oito mais produtivas. Observa-se que a cultivar mais produtiva foi a G-19 (Tabela 3). Contudo, considerando-se somente a média predita para todos os ambientes, não é possível visualizar a distribuição da produtividade dessa cultivar ao longo da extensão geográfica de Mato Grosso.

Diferentemente, dentre as oito, a cultivar G-07 apresentou a menor produtividade média. Entretanto, mesmo que a cultivar G-19 tenha sido a mais produtiva na média de todas as localidades amostradas, há considerável proporção de localidades nas quais esse comportamento não se repete. Assim como a G-25, que apesar de apresentar a segunda menor produtividade média, em ambientes específicos, apresentou a maior produtividade individual. Portanto, é necessário compreender as delimitações adaptativas de cada cultivar para uma adequada recomendação de uso.

Diversas características podem influenciar a capacidade adaptativa de uma cultivar, especialmente a maturidade relativa (Alliprandini *et al.*, 2009; Sentelhas *et al.*, 2015). Entretanto, neste caso, não se observou uma associação direta entre RM e produtividade média ($r = -0,09^{ns}$), diferentemente do que foi observado por (Bello *et al.*, 2012; Dubey *et al.*, 2018; Ferreira, 2018). Em nível de adaptabilidade e estabilidade, é possível que os materiais mais tardios apresentem comportamento mais favorável, conforme observado por Ferreira (2018) correlação positiva entre agrupamentos de cultivares de maior maturidade em relação às produtividades

($r=0,4168$; $p<0,05$), indicando que materiais tardios tendem a ser, predominantemente, mais produtivos.

Tabela 3. Produtividades médias ($\hat{u}+\hat{g}$), em Kg.ha⁻¹, e efeitos genéticos referentes às oito melhores cultivares de soja, ao longo de três safras subsequentes (2019/2020 a 2021/2022) de cultivo em 89 ambientes do Mato Grosso.

| Código ¹ | RM | \hat{g} | $\hat{u}+\hat{g}$ | %Vitória ² |
|---------------------|----------|-----------|-------------------|-----------------------|
| G-19 | 8.2 | 363,05 | 4.213,80 | 28,09% |
| G-06 | 7.6 | 275,62 | 4.126,37 | 17,98% |
| G-11 | 7.8 | 316,84 | 4.167,59 | 11,24% |
| G-17 | 8.1 | 267,37 | 4.118,12 | 8,99% |
| G-20 | 8.0 | 199,80 | 4.050,55 | 7,87% |
| G-22 | 8.3 | 240,29 | 4.091,04 | 12,36% |
| G-25 | 8.4 | 248,04 | 4.098,79 | 7,87% |
| G-07 | 7.6 | 122,58 | 3.973,33 | 5,62% |
| Intercepto | 3.850,75 | | | |

¹Códigos de referência das cultivares avaliadas; ²Proporção de localidades nas quais uma cultivar se apresentou como a mais produtiva;

4.1 Efeitos das covariáveis ambientais sobre a adaptação das cultivares

A caracterização ambiental é essencial para o entendimento da adaptação fenotípica. Métodos analíticos vinculados a ensaios em rede, detalhados com efeitos ambientais (caracterização ambiental), podem suportar o processo de tomada de decisão, de modo a permitir predições do desempenho produtivo ao longo de um gradiente geográfico (Xu, 2016; Costa Neto *et al.*, 2020). Para isso é necessário compreender qual a interferência de cada variável ambiental na produtividade das cultivares, no objetivo de conhecer os limites adaptativos diante de variações ambientais. Van Eeuwijk *et al.* (1996) sugeriram o uso de covariáveis ambientais em regressão fatorial para explicar a interação GxA.

Observando-se os coeficientes médios (Tabela 04), nota-se que todas as variáveis ambientais foram significativas ($p<0,05$) em relação à produtividade. Entretanto, há variações na magnitude e significância dos efeitos das covariáveis ambientais em nível de cultivar, sendo que algumas variáveis são mais relevantes para cultivares específicas. Esses coeficientes representam diretamente as normas de reação, de cada cultivar, associadas aos diferentes fatores ambientais. Matematicamente, representam as ponderações dos efeitos de cada covariável sobre

a produtividade. Assim, multiplicando-se cada coeficiente pelo valor da covariável respectiva em uma dada posição espacial, obtém-se a norma de reação predita.

Tabela 4. Coeficientes lineares, gerais e detalhados por cultivares, associados às variáveis ambientais consideradas na regressão linear múltipla

| Variável ¹ | Cultivares | | | | | | | | |
|-----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------|
| | G-06 | G-07 | G-11 | G-17 | G-19 | G-20 | G-22 | G-25 | Geral |
| ALT | 1,4614* | 0,4009* | 0,4088* | 0,2589 ^{ns} | 0,9259* | -0,2470 ^{ns} | 0,3112 ^{ns} | 0,5026* | 0,4658* |
| DHS | 3,8238* | 2,7094 ^{ns} | 3,7397 ^{ns} | 6,6260* | 6,2002* | 9,0234* | 4,7691* | 3,7899 ^{ns} | 4,7510* |
| FTP | 4,4811* | 1,0843 ^{ns} | 2,7859* | 1,6255 ^{ns} | 1,2693 ^{ns} | 2,5223* | 5,2680* | 2,0357* | 2,2897* |
| PrAc | 1,0334 ^{ns} | 2,7330* | 0,5615 ^{ns} | 1,2453 ^{ns} | 1,3040* | 3,4971* | 2,1356* | 2,3715* | 1,6121* |
| TAR | 1,9418 ^{ns} | 3,1945* | 2,5289* | 2,3124* | 2,5200* | 1,9758 ^{ns} | 1,6528 ^{ns} | 2,5436* | 2,2911* |
| Tmax | -4,0196* | -4,0643* | -1,0542 ^{ns} | -1,4128* | -0,6406 ^{ns} | 4,1951* | -1,8829* | -3,6742* | -2,1475* |
| Tmed | 1,0997 ^{ns} | -1,2756 ^{ns} | 1,6585* | 7,4065* | 3,2933* | 3,0928* | 0,6009 ^{ns} | 1,0019 ^{ns} | 1,7906* |
| Tmin | 1,6937* | 0,8017 ^{ns} | 1,1386* | 2,5862* | -2,2580* | 2,0745* | 1,0507 ^{ns} | 0,6129 ^{ns} | 1,3651* |
| UR | 0,2484 ^{ns} | 1,7926* | 1,9524* | 2,9199* | 0,5207 ^{ns} | 1,9836* | 1,2339 ^{ns} | 3,5303* | 1,3559* |

¹ALT – altitude; DHS - disponibilidade hídrica no solo; FTP – fotoperíodo; PrAc - precipitação acumulada; TAR - teor de argila no solo; Tmax - temperatura máxima do ar; Tmed - temperatura média do ar; Tmin - temperatura mínima do ar; UR - umidade relativa do ar. Mensuração da UR com base em dois metros de altura do nível do solo; *e**: valores significativos a 5% ou a 1% de probabilidade; e ^{ns}: valores não significativos.

O comportamento da soja pode ser influenciado pela ALT de cultivo, principalmente devido à relação indireta entre essa variável em relação à temperatura atmosférica média. Sabe-se que, quanto maior a elevação, menores temperaturas médias são observadas. Regiões de baixas altitudes tendem a apresentar, predominantemente, maiores temperaturas. Fisiologicamente, a soja depende de um acúmulo de unidade térmica, ou graus-dias, para o avanço regular dos estádios fenológicos. Portanto, cultivares mais tardias tendem a demandar maior acúmulo térmico, enquanto cultivares mais precoces apresentam comportamento diferente nas mesmas condições. Assim, faz-se necessário compreender as características de cada ambiente e recomendar a cultivar de resposta mais favorável.

Em relação à ALT, nota-se um coeficiente igual a 0,4658 ($p < 0,05$), isso sugere que um aumento gradual de 100m em altitude implica em um aumento médio em produtividade de, aproximadamente, 46 kg.ha⁻¹. Dentre as cultivares, a G-06 apresentou maior responsividade as variações da altitude, com um coeficiente de 1,4614 ($p < 0,05$) (Tabela 04). Alliprandini *et al* (2009) e Ferreira (2018) também observaram respostas significativas e distintas entre cultivares ao comparar diferentes grupos de maturidade, quando cultivados em diferentes altitudes.

Uma suficiente DHS, conforme demanda cultural, é essencial para se obter elevadas produtividades em soja. Contudo, observa-se elevada variação dos níveis

de água no solo ao longo dos anos, devido às variações meteorológicas, bem como ao longo das estações do ano. Comumente, em sistemas de produção em sequeiro, busca-se fazer a semeadura em épocas que coincidam com disponibilidade hídrica suficiente. Portanto, a data de semeadura da soja deve resultar em uma sincronia entre as variações nos níveis de DHS e demanda hídrica da cultura, considerando-se cultivares adaptadas a uma determinada região-alvo. O coeficiente da regressão associado à DHS foi de 4,7510 ($p < 0,05$) (Tabela 04), indicando que o acréscimo de 10% na DHS resulta no aumento em produtividade de, aproximadamente, 47 kg.ha⁻¹. Sentelhas *et al.* (2015) observaram, principalmente na região Sul do Brasil, redução superior a 1.600 kg.ha⁻¹ no rendimento da cultura devido à DHS. Adicionalmente, Battisti *et al.*, (2018) ao estimar variações em produtividade decorrentes de estresse hídrico, constatou perdas em torno de 46%. No presente estudo, ao longo dos anos considerados, não foram constatadas condições tão extremas compatíveis com perdas dessas magnitudes.

O FTP é o fator ambiental mais preponderante para adaptação da soja, pois pode afetar substancialmente a dinâmica de crescimento e desenvolvimento da planta. Este comportamento decorre da fotossensibilidade da soja, a qual resulta na indução de florescimento sobre condições de dias curtos. Contudo, a cultura da soja apresenta um intervalo temporal, nos primeiros estádios fenológicos, no qual se apresenta fotoneutra, denominado período juvenil. Assim, para que uma cultivar seja adaptada a uma região, apresentando porte e produtividades razoáveis, deve haver um ajuste entre o comprimento do período juvenil e a ocorrência do fotoperíodo crítico na região de cultivo. A ampla adaptabilidade da cultura a diferentes latitudes é devido à variação genética associada a genes que controlam o período juvenil e impactam, juntamente a outros, o florescimento e a maturação (Staniak *et al.*, 2023). Em relação à FTP, nota-se um coeficiente médio de 2,2897 ($p < 0,05$), o qual indica que variações em fotoperíodo em torno de 2h, resulta em variações produtivas próximas a 5 kg.ha⁻¹. Dentre as cultivares, a G-22 se apresentou como a mais responsiva a variações em FTP, cujo coeficiente foi de 5,2780 (Tabela 04). Gupta *et al.*, (2021) constataram a importância da descoberta da variabilidade e controle genético do período juvenil como o fator mais relevante para o avanço da soja no Brasil, o qual possibilitou o desenvolvimento de cultivares adaptadas a baixas latitudes.

A PrAc, naturalmente, apresenta forte relação com variações em DHS, Tmed e UR, entre outros fatores. Assim, a precipitação pluviométrica resulta em complexos efeitos entre diferentes fatores ambientais. O estresse hídrico desencadeia diversos processos fisiológicos, tais como inibição da fotossíntese, da transpiração e da condutância estomática, os quais afetam o crescimento, o desenvolvimento e, conseqüentemente, o rendimento das culturas (Souza *et al.*, 2013). Em relação à PrAc, observa-se um coeficiente médio igual a 1,6121 ($p < 0,05$). Tomando como exemplo uma precipitação média acumulada de 100mm/mês, temos um incremento de, aproximadamente, 160 kg.ha⁻¹ em produtividade. Dentre as cultivares avaliadas, a G-20 apresentou maior responsividade, com um coeficiente igual a 3,4971 ($p < 0,05$) (Tabela 04). Neste estudo, todos os ensaios foram conduzidos em sequeiro, sendo que, em todos os casos, as sementeiras foram realizadas em período recomendado conforme Zoneamento Agrícola de Risco Climático – ZARC (MAPA, 2023). De Souza Nóia e Sentelhas (2020) constataram que o déficit hídrico é a principal causa da defasagem de produtividade da soja no Brasil, o estudo revelou que em Mato Grosso seria possível aumentar a produtividade média em 927,5 kg.ha⁻¹, em condições isentas de estresse hídrico.

O TAR impacta principalmente a dinâmica de nutrientes e fluxo hídrico no solo, interferindo nos níveis de fertilidade, variação térmica e evaporação do solo. Deste modo, a soja se adapta melhor aos solos de textura média, preferencialmente a solos com TAR entre 30% e 35% (Prado, 2007). Cultivares mais exigentes, responsivas em ambientes de maior qualidade, tendem a apresentar melhores resultados nestes níveis de argila no solo. Em relação à TAR, nota-se um coeficiente médio de 2,2911 ($p < 0,05$). Dentre as cultivares, a G-07 apresentou o maior coeficiente, sendo 3,1945 ($p < 0,05$) (Tabela 04). Assumindo que os TAR nas principais regiões agricultáveis de Mato Grosso estão entre 15% e 60%, tem-se variações, aproximadamente, entre 45 e 180 kg.ha⁻¹. Evidentemente, os efeitos de TAR são mais expressivos em condições extremas de DHS, contudo efeitos de interação entre covariáveis não foram abordados neste estudo. Segundo Alovisei *et al.* (2021), ambientes com maior TAR apresentaram elevada reserva de nutrientes e, conseqüentemente, melhores rendimentos para cultura da soja. Oliveira (2013) também constatou efeito significativo TAR sobre a produtividade de cana-de-açúcar, sendo responsável por 28,96% dos efeitos da interação GxA. Diferentemente, Inácio (2023) analisando a correlação entre

textura do solo e produtividade em soja, constatou melhores resultados em áreas arenosas, entretanto, com uso suplementar de fertilizantes e condições ótimas de DHS. Trabalho realizado para avaliar os impactos das mudanças climáticas no desenvolvimento da cultura da soja, os autores realizaram simulações de estresse hídrico e térmico e observaram que no cenário de menor precipitação, o solo da região, caracterizado pelo alto teor de argila, armazenou quantidade de água suficiente para desenvolvimento regular da soja e, conseqüente, manutenção dos níveis de produtividade (Moreira *et al.*, 2023).

No geral, a cultura da soja, assim como as demais espécies vegetais, apresenta uma determinada demanda térmica para um regular desenvolvimento. Contudo, temperaturas extremas, sejam altas ou baixas, podem resultar em estresse térmico altamente desfavorável à cultura. Temperaturas excessivamente altas causam excesso evapotranspiratório com conseqüente desidratação e redução da eficiência fotossintética (Thuzar, 2010; Zhu *et al.*, 2010; Dos Santos *et al.*, 2022). De modo análogo, estresse por baixas temperaturas limita os processos de crescimento e desenvolvimento das plantas, devido à redução do metabolismo. Esse tipo de estresse afeta ainda outros processos fisiológicos, tais como fluidez das membranas, absorção de água e nutrientes, conformação de proteínas e ácidos nucleicos (Latef *et al.*, 2016; Staniak *et al.*, 2023). Em relação às covariáveis Tmax, Tmed e Tmin, nota-se um comportamento geral significativo ($p < 0,05$), com coeficientes iguais a -2,1475; 1,7906 e 1,3651, respectivamente (Tabela 04). Nota-se que somente a Tmax apresentou coeficiente negativo, indicando que o aumento da temperatura máxima implica na redução da produtividade, possivelmente por extrapolar os limites adaptativos da cultura. Siebers *et al.* (2015) avaliando o efeito do estresse térmico na soja, mediante a elevação da temperatura atmosférica, constataram redução no número de vagens e de sementes por planta. Estudos similares, realizados por Ogunkanmi *et al.*, (2021) em casa de vegetação, para determinar o efeito de variáveis climáticas, mostraram que as altas temperaturas contribuíram para a perda de biomassa e produtividade de grãos.

Os modelos de predição de respostas das culturas ao aumento da temperatura sugerem que um futuro aquecimento no clima deverá ser prejudicial à produtividade na maioria das regiões relevantes para produção de soja (Wang *et al.*, 2020). Entretanto, ocorrem incertezas acerca destas predições baseadas em

variações espaciais e temporais no aumento das temperaturas ao longo das safras (Zhu *et al.*, 2021). Neste contexto, o melhoramento genético voltado para o desenvolvimento de cultivares tolerantes a estresses abióticos, sobretudo ao excesso térmico, é uma das mais importantes ferramentas para viabilizar cultivos em cenários de aquecimento global (Rose *et al.*, 2016; Wamsler *et al.*, 2016).

A UR, apesar de apresentar estreita relação com PrAc e DHS, apresenta elevado impacto sobre aspectos fitossanitários da cultura. A UR modula, em diversos casos, as relações patógeno-hospedeiro, oportunizando ou não um ambiente favorável a ocorrência de doenças. Entretanto, observa-se um coeficiente médio positivo ($p < 0,05$), igual a 1,3559. Dentre as cultivares, a G-25 apresenta maiores respostas às variações em UR, com coeficiente de 3,5303 ($p < 0,05$) (Tabela 04). Assumindo-se que a UR média na estação de cultivo é igual a 80%, com reduções a níveis próximos de 40% sob períodos de estiagem, essa covariável pode resultar, em média, em variações entre 54,4 e 108,4 kg.ha⁻¹, aproximadamente. Neste caso, é possível que os efeitos dessa covariável sejam complementares àqueles associados à DHS e PrAc. Zhao *et al.* (2018) observaram que UR acima de 80% são favoráveis ao rendimento da soja, entretanto, nessas condições ambientais, observou-se também um ambiente favorável para o ataque de patógenos.

Nota-se que a proporção da interação GxA explicada pelas covariáveis é de 32,54% (Tabela 5). Supõe-se, então, que outras covariáveis, não consideradas neste estudo, estejam associadas à proporção complementar da interação GxA, bem como possíveis interações complexas entre estas. Também, no procedimento de regressão linear múltipla, assume-se que os efeitos são lineares e aditivos. Assim, qualquer comportamento distinto não é capitalizado no ajuste do modelo. Além disso, há uma infinidade de variáveis associadas ao manejo da soja que variam em nível local e que não foram abordadas na metodologia deste estudo. Becker e Leon (1998) verificaram que, geralmente, apenas uma proporção menor da interação GxA pode ser atribuída a fatores ambientais conhecidos, sendo que a maior proporção permanece incompreendida em análises de ensaios rendimento em múltiplos locais. Cardoso Júnior (2013), utilizando regressão fatorial, considerou três variáveis ambientais (precipitação acumulada, evapotranspiração acumulada e latitude) para a decomposição da interação GxA, ao analisar ensaios de rendimento na Macrorregião sojícola 3. Então, constatou que 41% da interação depende dessas covariáveis.

Entretanto, Verhulst *et al.* (2011) e Ortiz *et al.* (2007) observaram resultados superiores, alcançando proporções de 90,20% e 91,16% da interação GxA explicada por covariáveis ambientais, nas culturas do trigo e tomate, respectivamente.

Verifica-se, na Tabela 05, diferenças entre coeficientes de determinação médios (R^2), relacionados a cada covariável, os quais correspondem à proporção da variação observada em produtividade considerando-se todas as cultivares. Em média, a DHS apresentou a maior relação (7,80%), enquanto a UR a menor relação com a produtividade (4,64%). Observa-se ainda considerável diferença em valores de R^2 , relacionados a cada covariável, entre cultivares. O que é devido às diferentes respostas que cada cultivar apresenta diante de uma variação ambiental. Portanto, diferenças também são observadas no R^2_{acum} , que corresponde à variação total explicada pelas covariáveis, por cultivar. Neste caso, a cultivar G-22 apresentou o menor valor (18,49%), enquanto a G-20 o maior (42,73%).

Tabela 5. Coeficiente de determinação (R^2) das variáveis ambientais (preditores) sobre a produtividade das cultivares de soja avaliadas

| Covariável ¹ | G-06 | G-07 | G-11 | G-17 | G-19 | G-20 | G-22 | G-25 | R^2 médio |
|-------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------|
| ALT | 10,86% | 5,92% | 5,63% | - | 7,21% | - | - | 6,28% | 7,18% |
| DHS | 6,55% | - | - | 8,87% | 7,91% | 10,10% | 5,58% | - | 7,80% |
| FTP | 5,12% | - | 4,19% | - | - | 4,01% | 5,77% | 3,23% | 4,46% |
| PrAc | - | 4,13% | - | - | 3,99% | 6,49% | 5,15% | 5,80% | 5,11% |
| TAR | - | 8,65% | 6,54% | 5,15% | 5,27% | - | - | 6,29% | 6,38% |
| Tmax | 8,17% | 7,90% | - | 2,15% | - | 6,14% | 2,39% | 7,51% | 5,59% |
| Tmed | - | - | 3,19% | 9,73% | 4,44% | 4,20% | - | - | 5,39% |
| Tmin | 4,14% | - | 4,21% | 6,18% | 5,33% | 7,43% | - | - | 5,46% |
| UR | - | 3,72% | 3,35% | 4,82% | - | 4,36% | - | 6,93% | 4,64% |
| R^2_{acum} . | 34,84% | 30,32% | 27,11% | 36,60% | 34,15% | 42,73% | 18,49% | 36,04% | 32,54% |

¹ALT – altitude; DHS - disponibilidade hídrica no solo; FTP – fotoperíodo; PrAc - precipitação acumulada; TAR - teor de argila no solo; Tmax - temperatura máxima do ar; Tmed - temperatura média do ar; Tmin - temperatura mínima do ar; UR - umidade relativa do ar. Mensuração da UR com base em dois metros de altura do nível do solo; - Valores em branco correspondem a correlações não significativas ($p > 0,05$).

A Figura 2 dispõe de uma representação gráfica da contribuição de cada variável sobre a variação fenotípica observada em produtividade. Neste caso, é possível visualizar, claramente, consideráveis diferenças entre a contribuição média de cada covariável, sobre todas cultivares, em relação às contribuições em nível de cultivar. Isso indica que algumas cultivares são mais influenciadas por fatores ambientais que outras.

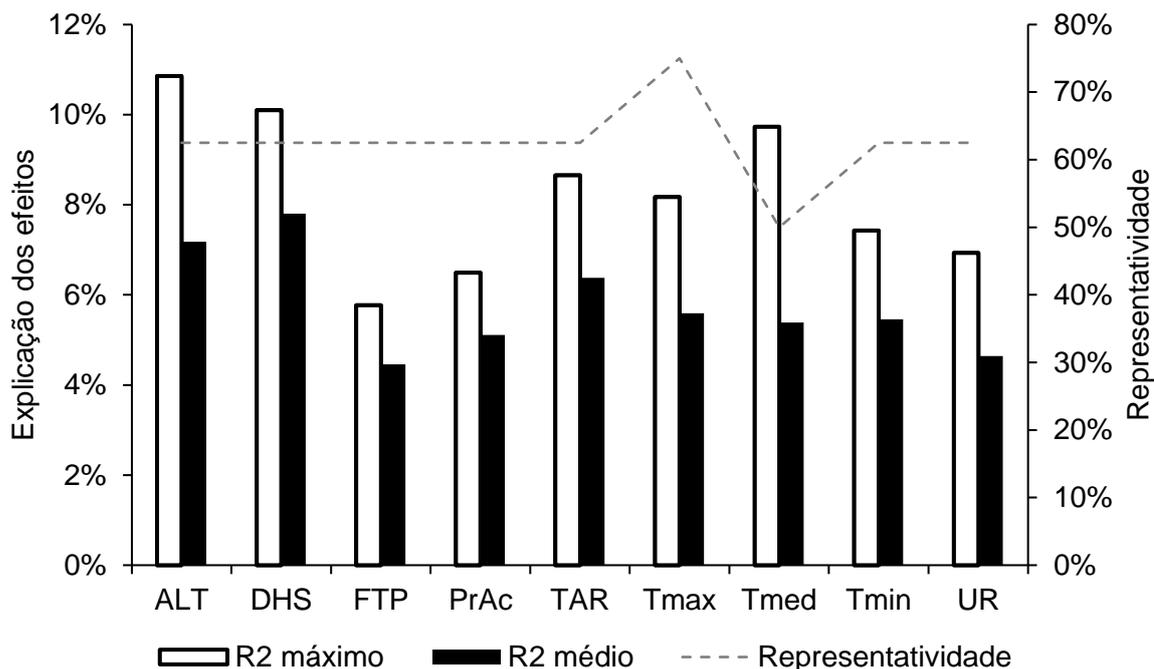


Figura 2. Percentual máximo de contribuição dos efeitos ambientais significativos seguidos por suas médias, representado no eixo a esquerda. O eixo a direita, refere-se à representatividade dos efeitos significativos, observados nos oito genótipos de soja, avaliados na Macrorregião Sojícola 4 do Brasil.

4.2 Distribuição geoespacial da produtividade

Uma vez que alguns coeficientes de regressão, associados às covariáveis, foram significativos, torna-se possível prever a adaptação das cultivares avaliadas na rede experimental, em ambientes não amostrados. Considerando-se para isso as normas de reação de cada cultivar, bem como efetuando-se a espacialização da produtividade.

Comumente, no Brasil, faz-se a recomendação de cultivares de soja orientada à estados e municípios, utilizando-se, direta ou indiretamente, limites políticos como indicadores de estruturação da variação ambiental. Isso traz simplicidade para a recomendação, entretanto, pode resultar em baixa assertividade técnica na definição da região adaptativa de cada cultivar. Diante dessa dificuldade, a recomendação por meio da espacialização da produtividade, suportada pelo uso de covariáveis, resulta em maior precisão para recomendação de cultivares, uma vez que a variação ambiental é indicada pelas tendências espaciais de produtividade e pelas variações nos valores de cada covariável.

Supondo que há uma posição geográfica na qual a produtividade de uma cultivar seja maximizada, ponto de maior adaptação, à medida que se distancia deste, a produtividade tende a se reduzir, indicando que a cultivar está se afastando do centro adaptativo. Com base neste comportamento, pode-se elaborar mapas de recomendação. Assim, nota-se na Figura 3, a distribuição geográfica adaptativa de cada cultivar. Destaca-se que, para a maioria das cultivares, a região Sul de Mato Grosso, apresentou os maiores níveis de produtividade preditos. Evidentemente, que isso decorre da maior qualidade ambiental observada naquela região. Verifica-se ainda que as maiores produtividades, no geral, tendem a se concentrar nas regiões de maior concentração no cultivo de soja. Isso justifica o comportamento migratório do cultivo de soja sobre algumas regiões, conforme aptidão para cultivo.

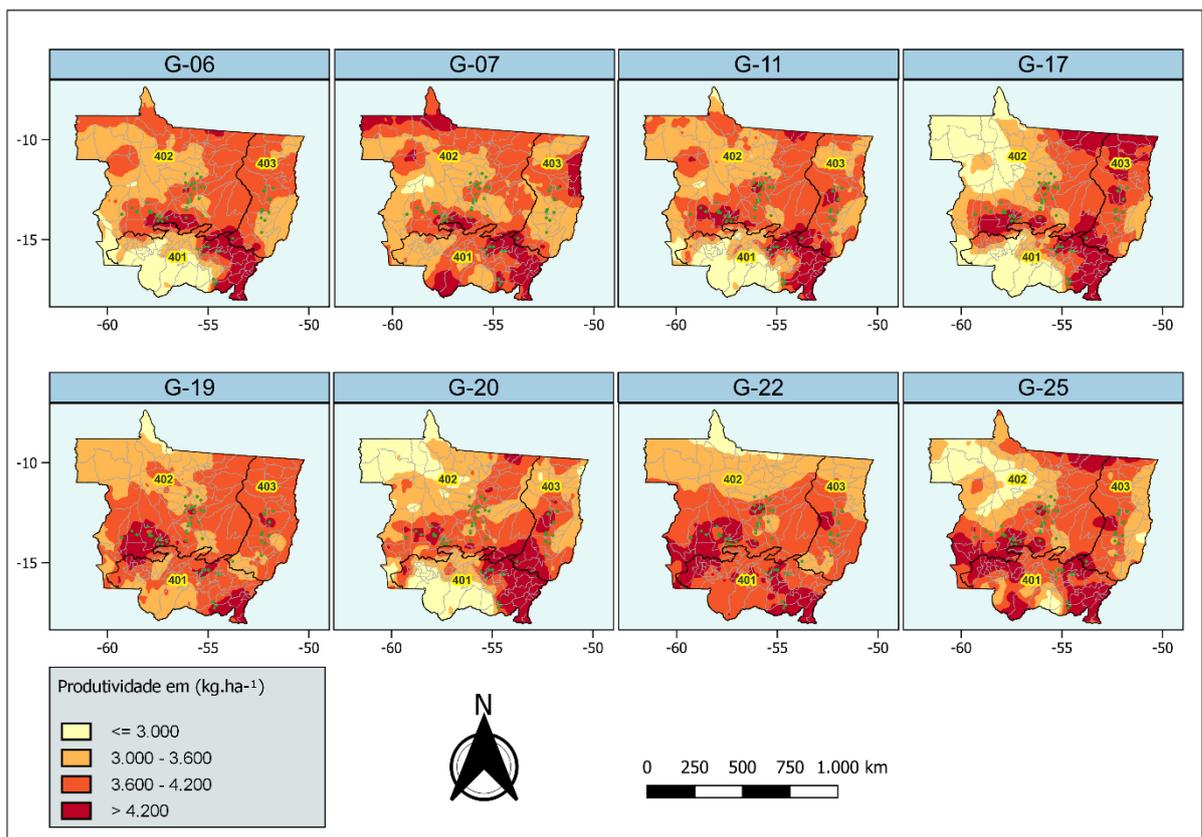


Figura 3. Representação gráfica da adaptabilidade produtiva, expressa em $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, de oito genótipos de soja, avaliados na Macrorregião Sojícola 4 do Brasil, modelada com uso de variáveis ambientais climáticas e geográficas. A adaptação dos genótipos foi classificada usando um gradiente de cores claras (baixa adaptação) a escuras (alta adaptação), detalhes maiores, consultar apêndice B e C.

Como esperado, nota-se na figura 3, diferentes ideótipos em relação ao gradiente de adaptação regional. Isso decorreu devido a sensibilidade diferencial dos

genótipos frente aos fatores ambientais considerados. Os mapas de cada genótipo apresentaram comportamentos distintos entre si, assim, pela análise visual, podem ser distinguidas as melhores zonas de adaptação dos genótipos, diante da variação espacial do ambiente, ao longo do gradiente geográfico de abrangência do estudo.

Os genótipos G-19 e G-22, apresentaram melhor adaptabilidade à produtividade, por apresentarem pouca variação nas classes de adaptabilidade produtiva. Pelo mapa percebe-se que esses dois genótipos foram bem adaptados as três microrregiões (401,402 e 403) com produtividade de grãos média predita, acima dos 3.000 kg.ha⁻¹. Ambos apresentaram predição superior à média dos oito melhores genótipos (4.105 kg.ha⁻¹) para os ambientes das microrregiões do Parecis, Tangará da Serra, Alto Guaporé, Alto Araguaia, Primavera do Leste e Rondonópolis, principalmente.

Com base nos mapas preditivos, os genótipos G-06 e G-11, apresentaram limite crítico de produtividade, abaixo dos 3.000 kg.ha⁻¹, para os ambientes da mesorregião Centro-Sul e Sudoeste mato-grossense, correspondentes as microrregiões de Alto Guaporé, Alto Pantanal, Cuiabá e Jauru, sendo essas regiões de baixa produção. Diversamente, na mesorregião Sudeste, correspondentes as microrregiões de Alto Araguaia, Primavera do Leste, Rondonópolis e Tesouro, bem como uma parte da microrregião do Parecis, situada na mesorregião Norte Mato-grossense, apresentaram bom desempenho, superando a média dos 4.200 kg.ha⁻¹, conforme observado na figura 3.

Em relação a mesorregião Nordeste Mato-grossense, situada na macrorregião 403, correspondentes as microrregiões do Norte Araguaia, Médio Araguaia e Canarana, destacou-se o genótipo G-17 com melhor desempenho produtivo predito, além dessas regiões esse material também teve bom desempenho nas microrregiões de Colíder, Primavera do Leste, Tesouro, Alto Araguaia e parcialmente nas microrregiões de Rondonópolis, Parecis, Tangará da Serra e Paranatinga. Os ambientes com limite adaptativo para esse material foram as microrregiões de Alto Guaporé, Alto Pantanal, Aripuanã, Jauru e parcialmente Alta Floresta, Arinos, Cuiabá e Tangará da Serra.

Entende-se que a Interação GxA é um fator que surge dos processos eco fisiológicos, particular de cada genótipo. Sabendo que as respostas dos genes variam

ao longo dos ambientes, então, é possível pegar essas variações ambientais e associar a essas respostas e encontrar a norma de reação de cada genótipo.

Pela grande variação observada entre as normas de recomendação de cada genótipo, dificulta-se em demasia obter modelos preditivos para a espécie que descrevam a resposta produtiva da soja em função de variáveis do ambiente que se pretende plantar, tornando-se necessário trabalhos semelhantes ao aqui desenvolvido que possibilite uma recomendação mais assertiva dos melhores cultivares para cada ambiente de cultivo.

4.3 Recomendação otimizada de cultivares

Devido à interação GxA é comum que algumas cultivares se apresentem melhores que outras em determinadas localidades. Entretanto, os métodos de análise de ensaios de rendimento multilocais, geralmente, possibilitam interpretações pontuais, em nível de local, ou em nível de agrupamento ambiental. Ao se adotar abordagens geoespaciais para uma melhor compreensão da variação da produtividade, ao longo das extensões geográficas nas regiões de produção, tem-se maior visibilidade acerca do comportamento das cultivares. Além disso, com o auxílio de covariáveis ambientais, é possível ainda prever o potencial adaptativo de cultivares de soja em outras regiões de cultivo e orientar extensão de uso.

Adotando-se a abordagem “quem-ganhou-onde” (*Who-Won-Where*), nota-se quais são as regiões de maior adaptação de cada cultivar (Figura 4). Deste modo, é possível otimizar a recomendação das melhores cultivares, em cada posição geográfica, ao longo do território de Mato Grosso, visando a maximização da produtividade.

Observa-se ainda, na Figura 04, proporções do mapa cobertas por cada cultivar, as quais são, de certo modo, indicadores %vitória, porém em abordagem distinta da Tabela 3. Comumente, o %vitória é calculado em proporção simples (Tabela 3), considerando-se apenas os locais amostrados. Essa análise pode resultar em equívocos, pois se assume neste caso que um agrupamento de ambientes em uma região representa toda a variação ambiental existente.

Nota-se, na tabela 03, que a cultivar com maior %vitória é a G-19, com 28,09%. Contudo, ao se comparar com a Figura 4, observa-se que a G-22 apresentou

maior %vitória ao longo de Mato Grosso. É válido ressaltar que nem toda a extensão do mapa de Mato Grosso é relevante para o cultivo de soja, além disso, há áreas no mapa (Figura 04) não cultivadas devido às limitações edafoclimáticas e, em outros casos, são destinadas à conservação ambiental.

Nota-se que o genótipo G-22 foi vencedor em 25,6% da área em estudo, com melhor adaptação em regiões de alta relevância na produção, abrangendo as microrregiões do Parecis (Sapezal, Campos de Júlio e Comodoro); Aripuanã (Brasnorte); Arinos (Nova Maringá, São José do Rio Claro e Porto dos Gaúchos); Alto Teles Pires (Nova Mutum, Santa Rita do Trivelato, Lucas do Rio Verde, Tapurah, Ipiranga do Norte, Itanhangá e norte de Sorriso); Sinop (Sinop e Vera); Paranatinga (Gaúcha do Norte); Canarana (Leste de Querência e Canarana) e Rondonópolis (Itiquira e Rondonópolis).

A cultivar G-20, apresentou melhor adaptação em 15,6% do território de Mato Grosso, com destaque nas microrregiões Parecis (Campo Novo do Parecis e Campos de Julio); Alto Teles Pires (Santa Rita do Trivelato e Nova Ubiratã); Sinop (Sinop, Cláudia e Santa Carmem); Paranatinga (Paranatinga); Canarana (Água Boa, Canarana, Ribeirão Castanheira, Santo Antônio do Leste e Novo São Joaquim); Primavera do Leste (Campo verde e Primavera do Leste) e Alto Araguaia (Alto Garças). Possivelmente, por ser a cultivar mais adaptada às regiões limítrofes entre Mato Grosso e Goiás, essa cultivar apresenta adaptação em Goiás.

A cultivar G-07, apesar de ser a mais adaptada em 18,3% da extensão territorial de Mato Grosso, apresenta as melhores produtividades em regiões de menor relevância para cultivo de soja, suposto potencial de uso na transição entre Mato Grosso e Pará. Já a cultivar G-17 é a mais adaptada em 14,1% do território, com maior concentração na Região Edafoclimática 403, principalmente na região de Canarana e demais adjacentes. Percebe-se que a adaptação dessa cultivar pode ser extrapolada às regiões Norte e Nordeste, sentido Pará e Tocantins. Esses comportamentos adaptativos evidenciam as oportunidades de extensão de uso dessas cultivares.

A cultivar G-19 apresentou adaptação mais restrita, porém em áreas de elevada relevância para produção de soja, sendo a mais adaptada em consideráveis proporções da região do Parecis e Alto Teles Pires. Destaca-se que essa cultivar apresentou o melhor desempenho médio nos ensaios de rendimento, quando analisados pontualmente (Tabela 03).

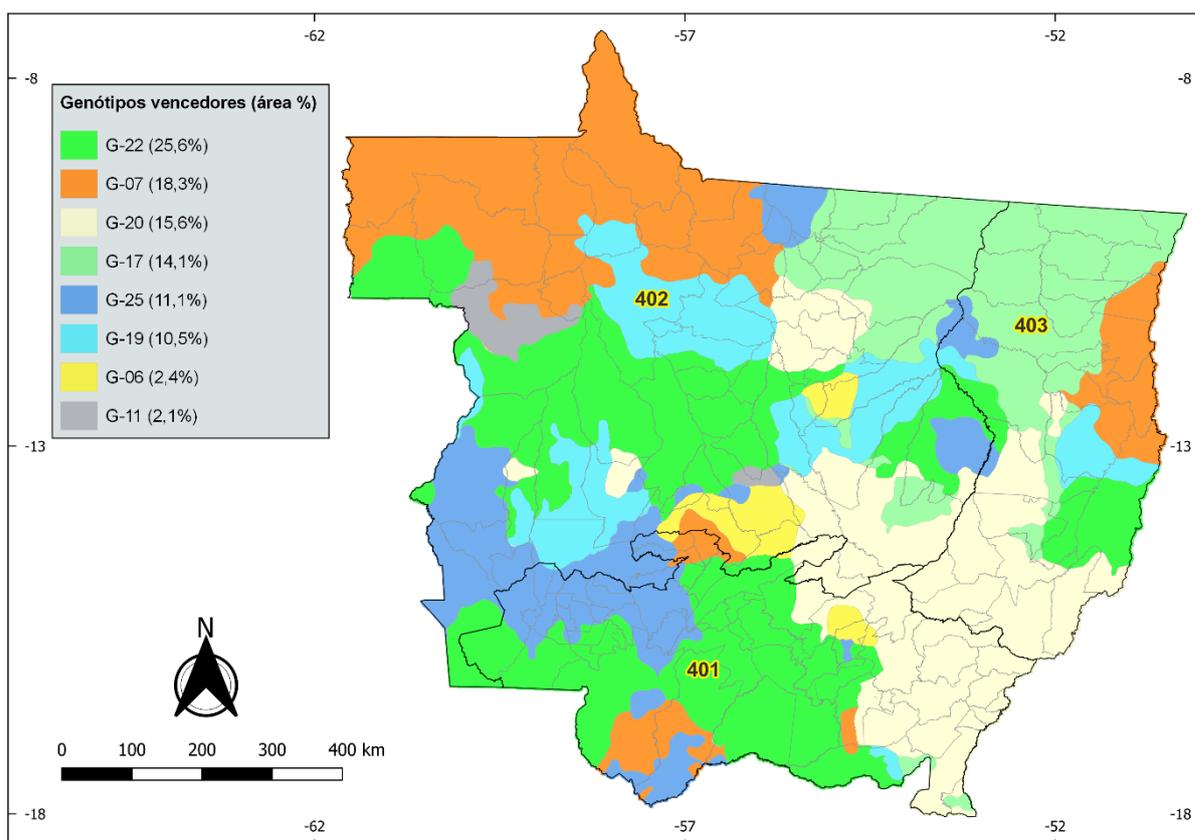


Figura 4. Representação gráfica de adaptação dos genótipos de soja vencedores no estado do Mato Grosso (mapa “quem-ganhou-onde”). Valores percentuais referem-se à proporção de área em que o genótipo foi superior aos demais na região alvo.

Considerando-se as duas abordagens, sendo (i) médias gerais das cultivares acrescida ao %vitória (Tabela 3) e (ii) abordagem analítica espacial com indicação das cultivares mais adaptadas (Figura 4), percebe-se que, o uso das diferentes abordagens pode resultar em recomendações distintas. Por exemplo, considerando-se a abordagem (i) a recomendação é direcionada à cultivar G-19, que obteve a maior média produtiva e %vitórias de 28%. Contudo, adotando-se a abordagem (ii), a recomendação predominante seria direcionada à cultivar G-22. Portanto, para uma recomendação de cultivares mais assertiva, é recomendável que a abordagem espacial seja utilizada de modo a complementar a análise pontual.

5. CONCLUSÕES

i) As covariáveis ambientais adotadas neste estudo explicam cerca de 35% da interação GxA. Assim, essa abordagem pode proporcionar melhor entendimento acerca da adaptação de cultivares e contribuir para maior assertividade na recomendação;

iii) A adaptabilidade geográfica pode complementar estratégias de seleção e recomendação de cultivares por demonstrar regiões de maior adaptação para cada cultivar, além de indicar possíveis tendências adaptativas para suportar extensões de uso;

iv) Mapas de maximização da produtividade, pelo zoneamento de uso de cultivares, podem contribuir substancialmente com estratégias de melhoramento pela maior compreensão dos níveis de competitividade das cultivares, em âmbito geoespacial. Além disso, auxilia no direcionamento de esforços para o desenvolvimento de novas cultivares adaptadas as regiões desafiadoras.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLARD, R. W.; BRADSHAW, A. D. Implications of genotype-environmental interactions in applied plant breeding. **Crop Science**, Madison, v. 4, n. 2, p. 503-508, 1964.
- ALLIPRANDINI, L. F.; ABATTI, C.; BERTAGNOLLI, P. F.; CAVASSIM, J. E.; GABE, H. L.; KUREK, A.; MATSUMOTO, M. N.; DE OLIVEIRA, M. A. R.; PITOL, C.; PRADO, L. C. Understanding soybean maturity groups in Brazil: environment, cultivar classification, and stability. **Crop Science**, New York, v. 49, n. 3, p. 801-808, 2009.
- ALMEIDA, L. A.; KIIHL, R. A. S.; MIRANDA, M. A. C.; CAMPELO, G. J. A. **Melhoramento da soja para regiões de baixas latitudes**. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/981323/1/LVsojamelhoramento.pdf>. Acesso em: 12, junho, 2022.
- ALOVISI, A. M. T., RODRIGUES, R. B., ALOVISI, A. A., TEBAR, M. M., VILLALBA, L. A., MUGLIA, G. R. P., ... & KAI, P. M. Uso do pó de rocha basáltica como fertilizante alternativo na cultura da soja. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 6, p. e33710615599-e33710615599, 2021.
- AMABILE, R. F.; VILELA, M. S.; PEIXOTO, J. R. **Melhoramento de plantas: variabilidade genética, ferramentas e mercado**. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1106825/1/Melhoramentodeplantas.pdf>. Acesso em: 14, maio, 2022.
- BALFOURIER, F.; OLIVEIRA, J. A.; CHARMET, G.; ARBONES, E. Factorial regression analysis of genotype by environment interaction in ryegrass populations, using both isozyme and climatic data as covariates. **Euphytica**, Dordrecht, v. 98, n. 1, p. 37-46, 1997.
- BATTISTI, R., SENTELHAS, P. C., PASCOALINO, J. A. L., SAKO, H., DE SÁ DANTAS, J. P., MORAES, M. F. Soybean yield gap in the areas of yield contest in Brazil. **International Journal of Plant Production**, v. 12, p. 159-168, 2018.
- BECKER, H. C.; LEON, Ji. Stability analysis in plant breeding. **Plant breeding**, v. 101, n. 1, p. 1-23, 1988.
- BELLO, LATEEF LEKAN; SHAAHU, AONDOVER; VANGE, TERKIMBI. Studies on relationship between seed yield and yield components in soybean (*Glycine max* L. Merrill). **Electronic Journal of Plant Breeding**, v. 3, n. 4, p. 1012-1017, 2012.
- BORÉM, A; MIRANDA, G. V; NETO, R. F. **Melhoramento de Plantas**. 7 ed. Viçosa: UFV, 2017. 142p.
- BORNHOFEN, E.; BENIN, G.; GALVAN, D.; FLORES, M. F. Épocas de semeadura e desempenho qualitativo de sementes de soja. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 45, p. 46-55, 2015.
- BRENNING, A. **RSAGA: SAGA Geoprocessing and Terrain Analysis in R**. Vienna: R topics documented, 2010, 98 p.

CAMARGO, M. B. P.; BRUNINI, O.; MIRANDA, M. A. C. Modelo agrometeorológico para estimativa da produtividade para a cultura da soja no estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 45, n. 2, p. 279-292, 1986.

CARVALHO, C.G.P.; ARIAS, C.A.A.; TOLEDO, J.F.F.; ALMEIDA, L.A.; KIIHL, R.A. de S.; OLIVEIRA, M.F. Interação genótipo x ambiente no desempenho produtivo da soja no Paraná. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, p. 989-1000, 2002.

CHAVES, L. J. Interação de genótipos com ambientes. In: NASS, L. L.; VALOIS, A. C. C.; MELO, I. S.; VALADARES-INGLIS, M. C. (Ed.). **Recursos genéticos e melhoramento de plantas**. Rondonópolis: Fundação MT, 2001. p. 675-712.

COBER, E. R.; STEWART, D. W.; VOLDENG, H. D. Photoperiod and temperature responses in early-maturing, near-isogenic soybean lines. **Crop Science**, New York, v. 41, n. 3, p. 721-727, 2001.

COMSTOCK, R. E.; MOLL, R. H. Genotype x environment interactions: statistical and plant breeding. **National Academy of Sciences**, Washington, v. 82, n. 2, p. 164-96, 1963.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Série histórica das safras de soja**. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras/itemlist/category/911-soja>. Acesso em: 23, junho, 2023.

CONRAD, O.; BECHTEL, B.; BOCK, M.; DIETRICH, H.; FISCHER, E.; GERLITZ, L.; WEHBERG, J.; WICHMANN, V. AND BÖHNER, J. System for automated geoscientific analyses (SAGA). **Geoscientific Model Development**, Berlin, v. 2.1.4, n. 8, p.1991-2007, 2015.

COSTA NETO, G. M. F. **Enviromics, nonlinear kernels and optimized training sets for a climate-smart genomic prediction of yield plasticity in maize**. Piracicaba: Universidade de São Paulo, 2021. 117p. (Tese de Doutorado em Genética e Melhoramento de plantas).

COSTA NETO, G. M. F. **Integrando covariáveis ambientais e mapas temáticos na análise da interação “genótipo x ambiente” em arroz de terras altas**. Goiânia: Universidade Federal de Goiás, 2017. 125 p. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento de Plantas).

COSTA NETO, G. M. F., DUARTE, J. B., DE CASTRO, A. P., & HEINEMANN, A. B. Uso de informações ambientais na modelagem e interpretação da interação genótipo x ambiente: **revisão bibliográfica**. 2020.

CRUZ, C. D.; CARNEIRO, P. C. S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 2. ed. Viçosa: UFV, 2006. V. 2. 585p.

CRUZ, C. D; REGAZZI, A. J. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 2. ed. Viçosa: Editora UFV, 2001. 390p.

DE SOUZA NÓIA, ROGÉRIO; SENTELHAS, PAULO CESAR. Yield gap of the double-crop system of main-season soybean with off-season maize in Brazil. **Crop and Pasture Science**, v. 71, n. 5, p. 445-458, 2020.

DOS SANTOS, T. B., RIBAS, A. F., DE SOUZA, S. G. H., BUDZINSKI, I. G. F., & DOMINGUES, D. S. Physiological responses to drought, salinity, and heat stress in plants: a review. **Stresses**, v. 2, n. 1, p. 113-135, 2022.

DUBEY, N., AVINASHE, H. A., & SHRIVASTAVA, A. N. Principal component analysis in advanced genotypes of soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] over seasons. **Plant Archives**, v. 18, n. 1, p. 501-506, 2018.

EBERHART, S. A.; RUSSELL, W. A. Stability parameters for comparing varieties. **Crop Science**, Madison, v. 6., n. 1, p. 36-40, 1966.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Tecnologias de produção de soja – região central do Brasil 2014**. Londrina: Embrapa Soja, 2013, 268p.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Tecnologias de produção de soja - Região Central do Brasil 2011: Sistemas de produção 14**. Londrina: Embrapa Soja. 2010. 247p.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Tecnologias de produção de soja**. 1. ed. Londrina: Embrapa Soja, 2020, 347p.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. **Ecofisiologia da soja**. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1128387/1/p.-33-54-de-SP-17-2020-online.pdf>. Acesso em: 20, julho, 2021.

FERREIRA, L. U. **Zoneamento para uso de cultivares de soja no Brasil conforme o grupo de maturação**. Goiânia: Universidade Federal de Goiás, 2018. 70p. (Tese - Doutorado em Genética e Melhoramento de plantas).

FRANÇA NETO, J. B.; KRZYZANOWSKI, F. C.; HENNING, A. A. **A importância do Uso de Sementes de Soja de Alta Qualidade**. Londrina: Informativo Abrates, 2010. v. 20, n. 12, p. 37-38.

FRIDMAN, EYAL. Consequences of hybridization and heterozygosity on plant vigor and phenotypic stability. **Plant Science**, v. 232, p. 35-40, 2015.

GUPTA, S., AGRAWAL, N., TRIPATHI, R., KUMAWAT, G., NATARAJ, V., MARANNA, S., SATPUTE G. K., RATNAPARKHE M. B., RAJESH V., CHANDRA S., JAIN, M. Long juvenility trait: A vehicle for commercial utilization of soybean (*Glycine max*) in lower latitudes. **Plant Breeding**, v. 140, n. 4, p. 543-560, 2021.

HENGL, T.; HEUVELINK, G. B.; STEIN, A. A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging. **Geoderma**, Wageningen, v. 120, n. 1-2, p. 75-93, 2004.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapeamento geográfico**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>. Acesso em: 01, junho, 2022.

INACIO, K. A. M. **Variabilidade espacial da produtividade da soja e sua correlação com atributos químicos e textura do solo**. Dourado: Universidade Federal da Grande Dourados, 2023. 46f. (Dissertação - Mestrado Programa de Pós-Graduação em Agronomia).

ISAACS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 561p.

JÚNIOR, L. A. C. **Uso de ferramentas de geoprocessamento para obtenção de mapas de recomendação de cultivares para a macrorregião sojícola 3 do Brasil**. Goiânia: Universidade Federal de Goiás, 2013. 97p. (Dissertação - Mestrado em Genética e Melhoramento de Plantas).

KASTER, M.; FARIAS, J. R. B. **Regionalização dos testes de valor de cultivo e uso e da indicação de cultivares de soja: Terceira aproximação**. Londrina: Embrapa Soja, 2012. 60 p.

KOCATURK, M., CUBUKCU, P., GOKSOY, A. T., SINCIK, M., ILKER, E., KADIROGLU, A., ... & YILDIRIM, U. A. GGE biplot analysis of genotypex environment interaction in soybean grown as a second crop. **Turkish Journal of Field Crops**, v. 24, n. 2, p. 145-154, 2019.

KRIGE, D. G. A statistical approach to some basic mine evaluation problems on the witwatersrand. **Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa**, v. 52, p. 151-163, 1951.

LARSON, G.; PIPERNO, D. R.; ALLABY, R. G.; FULLER, D. Q. Current perspectives and the future of domestication studies. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 111, p. 6139-6146, 2014.

LATEF, A. A. A. H.; JAN, S.; ABD-ALLAH, E. F.; RASHID, B.; JOHN, R.; AHMAD, P. Soybean under abiotic stress: Proteomic approach. **Plant-Environment Interaction: Resposes and Approaches to Mitigate Stress**; p.28–42, 2016.

LIN, C.S.; BINNS, M.R.; LEFKOVITCH, L.P. Stability analysis: Where do we stand? **Crop Science**, v.26, p.894-900, 1986.

MALOSETTI, M.; RIBAUT, J. M.; VAN EEUWIJK, F. A. The statistical analysis of multi-environment data: modeling genotype-by-environment interaction and its genetic basis. **Frontiers in physiology**, v. 4, p. 44, 2013.

MAPA-Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. **Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC)**. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/instrucao-normativa-spa/mapa-n-1-de-9-de-novembro-de-2021-358997272>. Acesso em: 05, janeiro, 2023.

MARCHIORI, R., HAMAWAKI, O. T., JORGE, G. L., MUNDIM, F., NOGUEIRA, A. P. O., HAMAWAKI, R. L., & DE SOUSA, L. B. Adaptability and stability of transgenic soybean lines and cultivars in the Brazilian macroregion 3 assessed by using

parametric and nonparametric methods. **African Journal of Biotechnology**, v. 14, n. 49, p. 3248-3256, 2015.

MATEI, G.; BENIN, G.; WOYANN, L. G.; DALLÓ, S. C.; MILIOLI, A. S.; ZDZIARSKI, A. D. Agronomic performance of modern soybean cultivars in multi-environment trials. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, n. 7, p. 500-511, 2017.

METEOBLUE. **Verification report for forecast and historical weather data – worldwide**. Disponível em: https://syngenta.meteoblue.com/pt/tempo/archive/dataquery/lucas-do-rio-verde_brasil_6317492. Acesso em: 10, dezembro, 2022.

MIRZAWAN, P. D. N.; COOPER, M.; DELACY, I. H.; HOGARTH, D. M. Retrospective analysis of the relationships among the test environments of the Southern Queensland sugarcane breeding programme. **Theoretical and applied Genetics**, v. 88, n. 6, p. 707-716, 1994.

MONTES, RAFAEL FERREIRA; BRESEGHELLO, FLÁVIO; DUARTE, JOÃO BATISTA. Modelling of genotype by environment interaction to improve the recommendation of sugarcane cultivars for the state of Goiás, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 56, 2021.

MOREIRA, V. S.; CANDIDO, L. A.; MOTA, M. C.; WEBLER, G.; OLIVEIRA, E. P.; ROBERTI, D. R. Impacts of climate change on water fluxes and soybean growth in southern Brazil. **Revista Ciência Agronômica**, v. 54, e20228398, 2023.

MWIINGA, B., SIBIYA, J., KONDWAKWENDA, A., MUSVOSVI, C., & CHIGEZA, G. Genotype x environment interaction analysis of soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) grain yield across production environments in Southern Africa. **Field crops research**, v. 256, p. 107922, 2020.

NASCIMENTO, M., NASCIMENTO, A. C. C., E SILVA, F. F., TEODORO, P. E., AZEVEDO, C. F., DE OLIVEIRA, T. R. A., AMARAL JUNIOR A. T., CRUZ C. D., FARIAS F. J. C., DE CARVALHO, L. P. Bayesian segmented regression model for adaptability and stability evaluation of cotton genotypes. **Euphytica**, v. 216, p. 1-10, 2020.

NEUMAIER, N; NEPOMUCENO, A. L; BARIAS, J. R. B; OYA, T. **Estresse em Soja**. Passo Fundo: Embrapa Trigo. 2000. 254p.

OGUNKANMI, LABAKE; MACCARTHY, DILYS S.; ADIKU, SAMUEL GK. Impact of extreme temperature and soil water stress on the growth and yield of soybean (*Glycine max* (L.) Merrill). **Agriculture**, v. 12, n. 1, p. 43, 2021.

OLIVEIRA, R. S. **Fatores edafoclimáticos determinantes da interação de genótipos com ambientes em cana-de-açúcar** Goiânia: Universidade Federal de Goiás, 2013. 75p. (Dissertação - Mestrado em Genética e Melhoramento de Plantas).

ORTIZ, R., CROSSA, J., VARGAS, M., & IZQUIERDO, J. Studying the effect of environmental variables on the genotype x environment interaction of tomato. **Euphytica**, v. 153, n. 1/2, p. 119-134, 2007.

PRADO, H. **Pedologia fácil**: Aplicações na agricultura. Piracicaba: H. Prado, 2007. 105 p.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS Geographic Information System**. Open Source Geospatial Foundation, 2021.

R CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2021.

RAMALHO, P. A. M.; SANTOS, J. B.; ZIMMERMANN, M. J. O. **Genética quantitativa de autógamias: Aplicações ao melhoramento do feijoeiro**. Goiânia: Ed. UFG, 1993. 271p.

RAUW, WENDY M.; GOMEZ-RAYA, LUIS. Genotype by environment interaction and breeding for robustness in livestock. **Frontiers in genetics**, v. 6, p. 310, 2015.

RESENDE, M.D.V. **Matemática e Estatística na Análise de Experimentos e no Melhoramento Genético**. 1ª edição. Colombo: Embrapa Florestas, 2007. 362p.

RESENDE, R. T.; HANS-PETER, P.; ROSA, G. J. M.; SILVA O. B.; SILVA, F. F.; RESENDE, M. D. V. Enviromics in breeding: applications and perspectives on envirotypic-assisted selection. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 134, n. 1, p. 95-112, 2020.

ROBERTSON, A. **Experimental design on the measurement of heritabilities and genetic correlations - Biometrical genetics**. New York: Pergamon Press, 1959. 186p.

ROSE, G.; OSBORNE, T.; GREATREX, H.; WHEELER, T. Impact of progressive global warming on the global-scale yield of maize and soybean. **Climate Changes**. v.134, p.417–428, 2016.

SENTELHAS, P.; BATTISTI, R.; CÂMARA, G.; FARIAS, J.; HAMPF, A.; NENDEL, C. The soybean yield gap in Brazil—magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. **The journal of agricultural science**, v. 153, n. 8, p. 1394-1411, 2015.

SETIYONO, T.; WEISS, A.; SPECHT, J.; BASTIDAS, A.; CASSMAN, K. G.; DOBERMANN, A. Understanding and modeling the effect of temperature and day-length on soybean phenology under high-yield conditions. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 100, n. 2-3, p. 257-271, 2007.

SIEBERS, M.H., YENDREK, C.R., DRAG, D., LOCKE, A.M., RIOS ACOSTA, L., LEAKEY, A.D.B., AINSWORTH, E.A., BERNACCHI, C.J., ORT, D.R. Heat waves imposed during early pod development in soybean (*Glycine max*) cause significant yield loss despite a rapid recovery from oxidative stress. **Global Change Biology**. v.21, p.3114–3125, 2015.

SINGAMSETTI, A., SHAHI, J. P., ZAIDI, P. H., SEETHARAM, K., VINAYAN, M. T., KUMAR, M., SINGLA, S., SHIKHA, K., MADANKAR, K. Genotypex environment interaction and selection of maize (*Zea mays* L.) hybrids across moisture regimes. **Field crops research**, v. 270, p. 108224, 2021.

SMÝKAL, P.; NELSON, M. N.; BERGER, J. D.; VON WETBERG, E. J. B. The impact of genetic changes during crop domestication. **Agronomy**, v. 8, p. 119-141, 218.

SOUZA, G.M.; CATUCHI, T.A.; BERTOLLI, S.C.; SORATTO, R.P. Soybean under water deficit: Physiological and yield responses. In A Comprehensive Survey of International Soybean Research—Genetics, Physiology, Agronomy and Nitrogen Relationships; INTECH: **London, UK**. p. 273–298, 2013.

SRIVASTAVA, R. M. Describing spatial variability using geostatistics analysis. In: SRIVASTAVA, R. M.; ROUHANI, S.; CROMER, M. V.; JOHNSON, A. I.; DESBARATS, A. J. (Ed.). **Geostatistics for environmental and geotechnical applications**. West Conshohocken: ASTM, 1996. p. 13 -19.

STANIAK, M., SZPUNAR-KROK, E., KOCIRA, A. Responses of Soybean to Selected Abiotic Stresses—Photoperiod, Temperature and Water. **Agriculture**. v.13, p.146-174, 2023.

THUZAR, MYINT. The Effects of Temperature Stress on the Quality and Yield of Soya Bean [(*Glycine max* L.) Merrill.]. **Journal of Agricultural Science**, v. 2, 2010.

TURNER-HISSONG, S. D.; MABRY, M. E.; BEISSINGER, T. M.; ROSS-IBARRA, J.; CHRIS-PIRES, J. Evolutionary insights into plant breeding. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 54, p. 93-100, 2020.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). **World agricultural supply and demand estimate**. Disponível em: <https://www.usda.gov/oce/commodity/wasde/wasde0623.pdf>. Acesso em: 23, junho, 2023.

VAN EEUWIJK, F. A.; DENIS, J. B.; KANG, M. S. Incorporating additional information on genotypes and environments in models for two-way genotype by environment tables. In: KANG, M. S.; GAUCH, H. G. (Ed.). **Genotype-by-environment interaction**. Boca Raton: CRC Press, 1996. p. 15-49.

VERHULST, N., SAYRE, K. D., VARGAS, M., CROSSA, J., DECKERS, J., RAES, D., & GOVAERTS, B. Wheat yield and tillage–straw management system x year interaction explained by climatic co-variables for an irrigated bed planting system in northwestern Mexico. **Field Crops Research**, v. 124, n. 3, p. 347-356, Dec. 2011.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, G. R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p. 1-54. v. 1.

VRIJENHOEK, ROBERT C.; LERMAN, STEVEN. Heterozygosity and developmental stability under sexual and asexual breeding systems. **Evolution**, p. 768-776, 1982.

WAMSLER, C.; NIVEN, L.; BEERY, T.H.; BRAMRYD, T.; EKELUND, N.; JÖNSSON, K.I.; OSMANI, A.; PALO, T.; STÅLHAMMAR, S. Operationalizing ecosystem-based adaptation: Harnessing ecosystem services to buffer communities against climate change. **Ecology and Society**. v. 21, p.31-50, 2016.

WANG, X., ZHAO, C., MÜLLER, C., WANG, C., CIAIS, P., JANSSENS, I., ... & PIAO, S. Emergent constraint on crop yield response to warmer temperature from field experiments. **Nature Sustainability**. v.3, p. 908–916, 2020.

WEBER, E.; HASENACK, H.; FERREIRA, C.J.S. **Adaptação do modelo digital de elevação do SRTM para o sistema de referência oficial brasileiro e recorte por unidade da federação**. Porto Alegre, UFRGS / Centro de Ecologia. Disponível em <http://www.ufrgs.br/labgeo>. Acesso em: 05, janeiro, 2023.

XU, YUNBI. Envirotyping for deciphering environmental impacts on crop plants. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 129, p. 653-673, 2016.

YAN, WEIKAI. Mega-environment analysis and test location evaluation based on unbalanced multiyear data. **Crop Science**, v. 55, n. 1, p. 113-122, 2015.

ZHAO, Y. *et al.*, Effects of Sowing Methods on Seedling Stand and Production Profit of Summer Soybean under Wheat-Soybean System. **Crops**, v. 34, n. 4, p. 114-120, 2018.

ZHU T, DE LIMA C.F.F., DE SMET I. The heat is on: how crop growth, development, and yield respond to high temperature. **Journal of Experimental Botany**. v.72, p.7359–7373, 2021.

ZHU, XIN-GUANG; LONG, STEPHEN P.; ORT, DONALD R. Improving photosynthetic efficiency for greater yield. **Annual review of plant biology**, v. 61, p. 235-261, 2010.

APÊNDICES

Apêndice A. Safras agrícolas, locais de condução, coordenadas geográficas (Latitude, Longitude e Altitude), Região edafoclimática (REC) e época de plantio dos ensaios

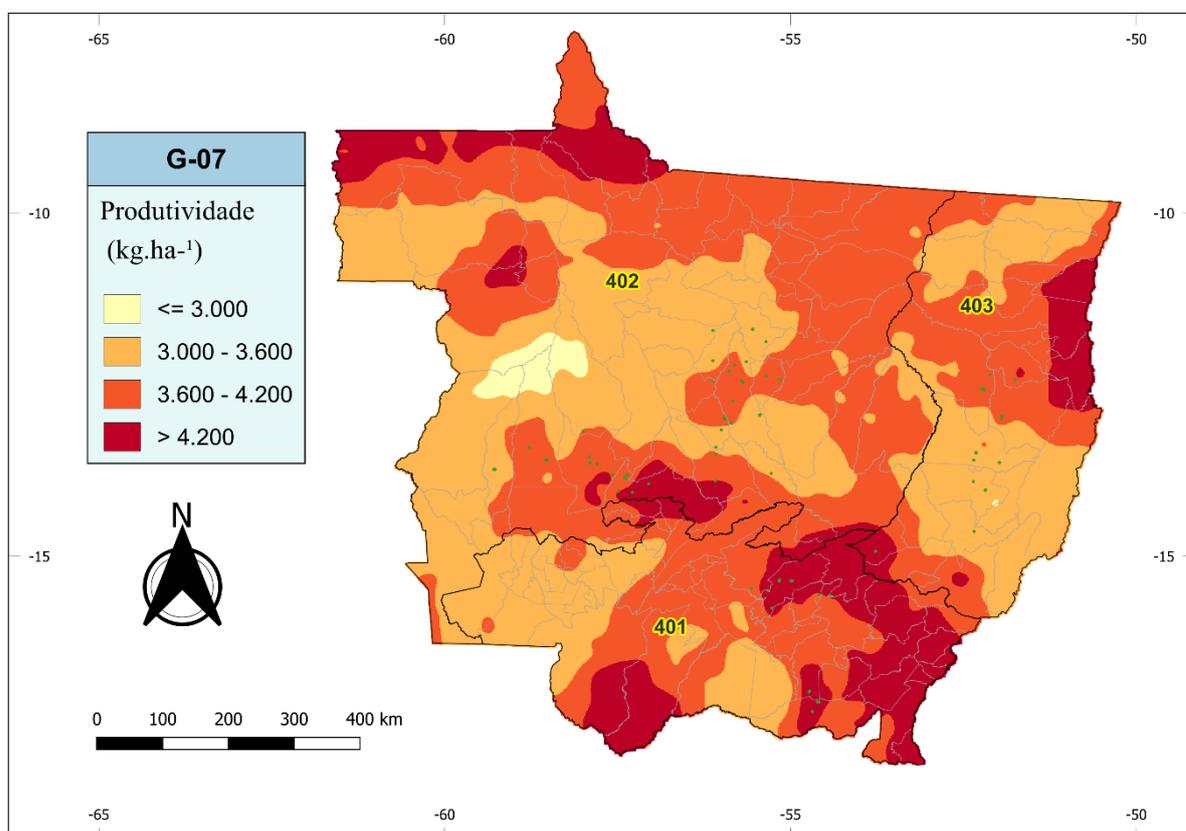
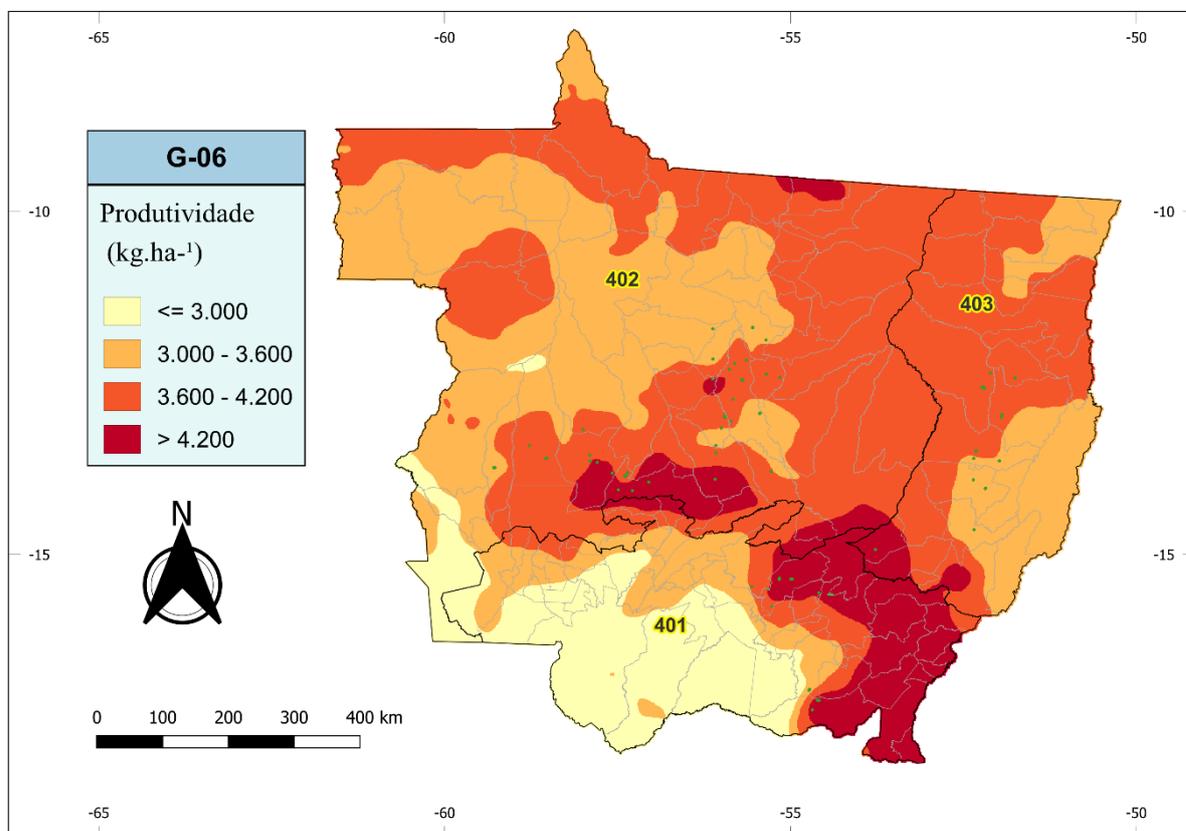
| Safra | Local | Lat. (°) | Long. (°) | Alt. (m) | REC ¹ | Data de plantio |
|-----------|-----------------------|----------|-----------|----------|------------------|-----------------|
| 2019/2020 | Água Boa | -13,9111 | -52,3569 | 370 | 403 | 11/11/2019 |
| 2019/2020 | Campo Novo do Parecis | -13,5510 | -57,9030 | 540 | 402 | 18/10/2019 |
| 2019/2020 | Campo Novo do Parecis | -13,6361 | -57,8987 | 560 | 402 | 10/10/2019 |
| 2019/2020 | Campo Novo do Parecis | -13,6569 | -57,7950 | 560 | 402 | 24/10/2019 |
| 2019/2020 | Campo Verde | -15,3447 | -55,1597 | 720 | 401 | 26/10/2019 |
| 2019/2020 | Campo Verde | -15,4997 | -55,3249 | 750 | 401 | 10/10/2019 |
| 2019/2020 | Campos de Julio | -13,7333 | -59,2903 | 630 | 402 | 06/10/2019 |
| 2019/2020 | Canarana | -13,4945 | -52,3161 | 410 | 403 | 09/11/2019 |
| 2019/2020 | Canarana | -13,6358 | -51,9795 | 445 | 403 | 02/11/2019 |
| 2019/2020 | Canarana | -13,5995 | -52,3510 | 355 | 403 | 28/10/2019 |
| 2019/2020 | Caravágio | -12,9369 | -55,4388 | 430 | 402 | 01/11/2019 |
| 2019/2020 | Chapada Guimarães | -15,4666 | -55,5629 | 750 | 401 | 07/10/2019 |
| 2019/2020 | Deciolândia | -13,8127 | -57,5769 | 560 | 402 | 02/11/2019 |
| 2019/2020 | Deciolândia | -13,8073 | -57,3574 | 550 | 402 | 21/10/2019 |
| 2019/2020 | Deciolândia | -13,8621 | -57,3835 | 560 | 402 | 27/10/2019 |
| 2019/2020 | Lucas do Rio Verde | -13,0544 | -55,8601 | 410 | 402 | 17/10/2019 |
| 2019/2020 | Nova Mutum | -13,4100 | -56,0780 | 435 | 402 | 19/10/2019 |
| 2019/2020 | Nova Xavantina | -14,6369 | -52,3461 | 300 | 403 | 30/10/2019 |
| 2019/2020 | Primavera do Leste | -15,5816 | -54,3997 | 670 | 401 | 14/10/2019 |
| 2019/2020 | Querência | -12,5562 | -52,2182 | 350 | 403 | 22/10/2019 |
| 2019/2020 | Querência | -12,5779 | -52,1968 | 340 | 403 | 18/10/2019 |
| 2019/2020 | Ribeirão Cascalheira | -12,9973 | -51,9493 | 435 | 403 | 05/11/2019 |
| 2019/2020 | Rondonópolis | -16,9628 | -54,7236 | 515 | 401 | 31/10/2019 |
| 2019/2020 | Rondonópolis | -17,1227 | -54,5847 | 540 | 401 | 18/10/2019 |
| 2019/2020 | Rondonópolis | -17,2627 | -54,6839 | 520 | 401 | 21/10/2019 |
| 2019/2020 | Santa Carmem | -11,8720 | -55,3542 | 375 | 402 | 27/10/2019 |
| 2019/2020 | Sapezal | -13,5950 | -58,5209 | 570 | 402 | 08/10/2019 |
| 2019/2020 | Sinop | -11,6873 | -55,5448 | 368 | 402 | 29/10/2019 |
| 2019/2020 | Sorriso | -12,3004 | -55,8858 | 350 | 402 | 08/10/2019 |
| 2019/2020 | Sorriso | -12,4487 | -55,7031 | 370 | 402 | 06/10/2019 |
| 2019/2020 | Sto Antônio Leste | -14,9260 | -53,7716 | 640 | 401 | 04/11/2019 |
| 2019/2020 | Vera | -12,3716 | -55,3497 | 380 | 402 | 05/10/2019 |
| 2020/2021 | Água Boa | -14,0323 | -52,1800 | 460 | 403 | 06/11/2020 |
| 2020/2021 | Campo Novo do Parecis | -13,8127 | -57,5767 | 570 | 402 | 28/10/2020 |
| 2020/2021 | Campo Novo do Parecis | -13,6382 | -57,8979 | 565 | 402 | 15/10/2020 |
| 2020/2021 | Campo Verde | -15,3521 | -55,1607 | 715 | 401 | 02/11/2020 |
| 2020/2021 | Campo Verde | -15,3570 | -54,9955 | 675 | 401 | 14/10/2020 |
| 2020/2021 | Campos de Julio | -13,7339 | -59,2729 | 635 | 402 | 09/10/2020 |
| 2020/2021 | Canarana | -13,4879 | -52,3159 | 410 | 403 | 02/11/2020 |
| 2020/2021 | Canarana | -13,5993 | -52,3516 | 360 | 403 | 03/11/2020 |
| 2020/2021 | Deciolândia | -13,8080 | -57,3576 | 550 | 402 | 30/10/2020 |
| 2020/2021 | Deciolândia | -13,8487 | -57,3835 | 560 | 402 | 17/10/2020 |
| 2020/2021 | Lucas do Rio Verde | -12,9963 | -55,9543 | 400 | 402 | 21/10/2020 |
| 2020/2021 | Lucas do Rio Verde | -12,9788 | -55,9474 | 385 | 402 | 28/09/2020 |
| 2020/2021 | Primavera do Leste | -15,5798 | -54,4393 | 660 | 401 | 27/10/2020 |
| 2020/2021 | Querência | -12,5601 | -52,2344 | 350 | 403 | 23/10/2020 |
| 2020/2021 | Rondonópolis | -16,9789 | -54,7327 | 500 | 401 | 22/10/2020 |

Apêndice A. Continuação...

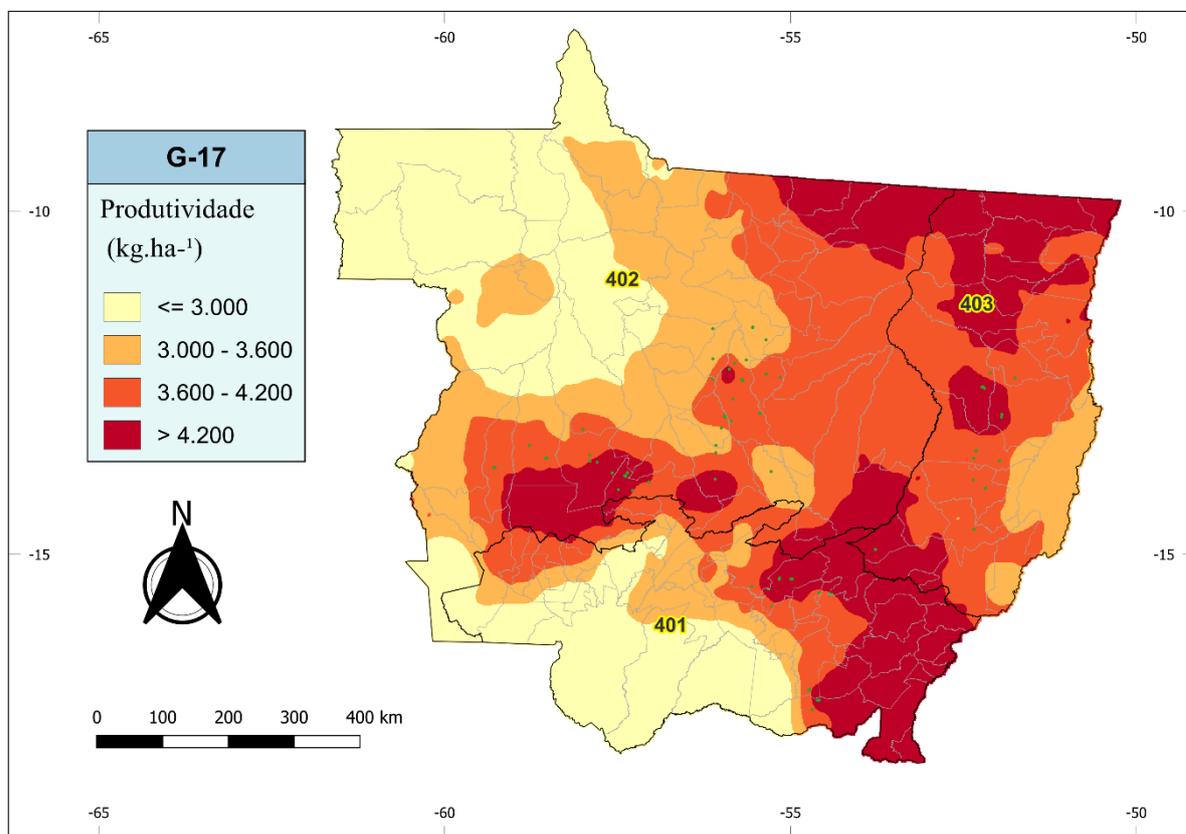
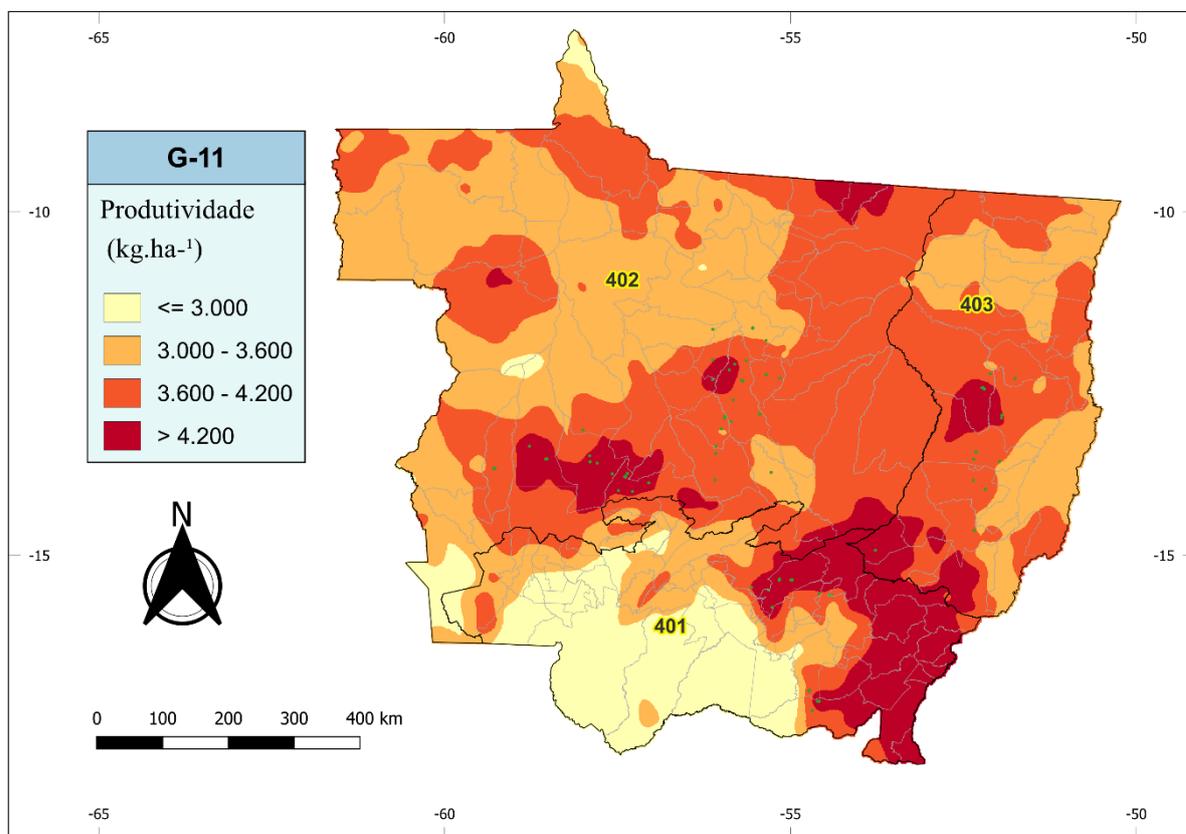
| Safra | Local | Lat. (°) | Long. (°) | Alt. (m) | REC | Data de plantio |
|--------------|-----------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------|------------------------|
| 2020/2021 | Sapezal | -13,5949 | -58,5216 | 570 | 402 | 12/10/2020 |
| 2020/2021 | Sapezal | -13,4118 | -58,7751 | 560 | 402 | 06/10/2020 |
| 2020/2021 | Sinop | -11,6937 | -55,5485 | 370 | 402 | 04/11/2020 |
| 2020/2021 | Sorriso | -12,9405 | -55,4435 | 430 | 402 | 28/10/2020 |
| 2020/2021 | Sorriso | -12,4653 | -55,6886 | 375 | 402 | 05/11/2020 |
| 2020/2021 | Vera | -12,3716 | -55,3495 | 380 | 402 | 15/10/2020 |
| 2021/2022 | Água Boa | -14,0369 | -52,1837 | 453 | 403 | 31/10/2021 |
| 2021/2022 | Brasnorte | -13,1782 | -57,9988 | 494 | 402 | 20/10/2021 |
| 2021/2022 | Campo Novo do Parecis | -13,6397 | -57,8973 | 569 | 402 | 09/10/2021 |
| 2021/2022 | Campo Verde | -15,3565 | -54,9732 | 673 | 401 | 09/10/2021 |
| 2021/2022 | Campo Verde | -15,7555 | -55,2686 | 758 | 401 | 25/10/2021 |
| 2021/2022 | Campo Verde | -15,3630 | -55,1645 | 645 | 401 | 19/10/2021 |
| 2021/2022 | Campos de Julio | -13,7335 | -59,2899 | 652 | 402 | 15/10/2021 |
| 2021/2022 | Canarana | -13,4915 | -52,3200 | 410 | 403 | 19/10/2021 |
| 2021/2022 | Canarana | -13,6342 | -51,9787 | 446 | 403 | 04/11/2021 |
| 2021/2022 | Diamantino | -13,9438 | -57,0494 | 523 | 402 | 01/10/2021 |
| 2021/2022 | Diamantino | -13,8551 | -57,3972 | 556 | 402 | 26/10/2021 |
| 2021/2022 | Diamantino | -14,0693 | -57,2844 | 591 | 402 | 27/10/2021 |
| 2021/2022 | Diamantino | -14,0559 | -57,4886 | 609 | 402 | 27/10/2021 |
| 2021/2022 | Ipiranga do Norte | -12,1498 | -56,1219 | 381 | 402 | 25/10/2021 |
| 2021/2022 | Itiquira | -17,1239 | -54,6112 | 525 | 401 | 22/10/2021 |
| 2021/2022 | Lucas do Rio Verde | -12,9929 | -55,9390 | 408 | 402 | 11/10/2021 |
| 2021/2022 | Lucas do Rio Verde | -13,1576 | -56,0001 | 414 | 402 | 22/10/2021 |
| 2021/2022 | Lucas do Rio Verde | -12,9721 | -55,9456 | 400 | 402 | 21/09/2021 |
| 2021/2022 | Nova Mutum | -13,5177 | -56,0798 | 420 | 402 | 19/10/2021 |
| 2021/2022 | Nova Mutum | -13,9012 | -56,0892 | 505 | 402 | 01/10/2021 |
| 2021/2022 | Porto dos Gaúchos | -11,7096 | -56,1230 | 372 | 402 | 20/10/2021 |
| 2021/2022 | Primavera do Leste | -15,5783 | -54,4376 | 665 | 401 | 13/10/2021 |
| 2021/2022 | Primavera do Leste | -15,5583 | -54,5894 | 649 | 401 | 17/10/2021 |
| 2021/2022 | Querência | -12,3553 | -52,1117 | 343 | 403 | 13/10/2021 |
| 2021/2022 | Querência | -12,4263 | -51,7556 | 365 | 403 | 15/10/2021 |
| 2021/2022 | Ribeirão Cascalheira | -12,9592 | -51,9435 | 417 | 403 | 01/11/2021 |
| 2021/2022 | Rondonópolis | -16,9780 | -54,7327 | 504 | 401 | 05/10/2021 |
| 2021/2022 | Sapezal | -13,5995 | -58,5398 | 574 | 402 | 04/10/2021 |
| 2021/2022 | Sinop | -11,6924 | -55,5474 | 371 | 402 | 22/10/2021 |
| 2021/2022 | Sorriso | -12,9446 | -55,4456 | 427 | 402 | 10/10/2021 |
| 2021/2022 | Sorriso | -12,2161 | -55,8056 | 375 | 402 | 01/10/2021 |
| 2021/2022 | Sorriso | -12,7368 | -55,8305 | 392 | 402 | 04/10/2021 |
| 2021/2022 | Sorriso | -12,4203 | -55,1546 | 378 | 402 | 13/10/2021 |
| 2021/2022 | Santa Rita Trivelato | -13,7924 | -55,2798 | 497 | 402 | 29/10/2021 |
| 2021/2022 | Tapurah | -12,4432 | -56,1267 | 380 | 402 | 05/10/2021 |
| 2021/2022 | Vera | -12,1657 | -55,6389 | 370 | 402 | 18/10/2021 |

¹Regionalização para cultivo de soja no Brasil, conforme Kaster e Farias (2012), adaptado pelo MAPA (2023).

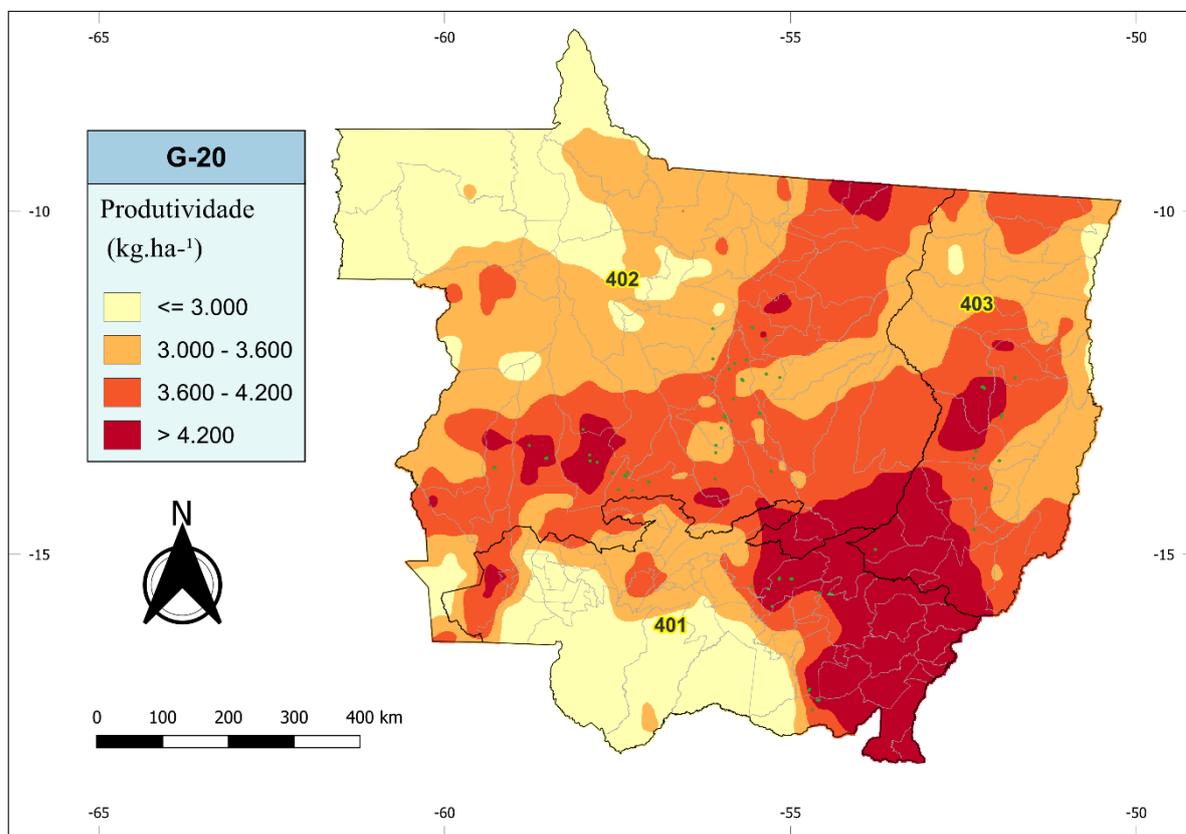
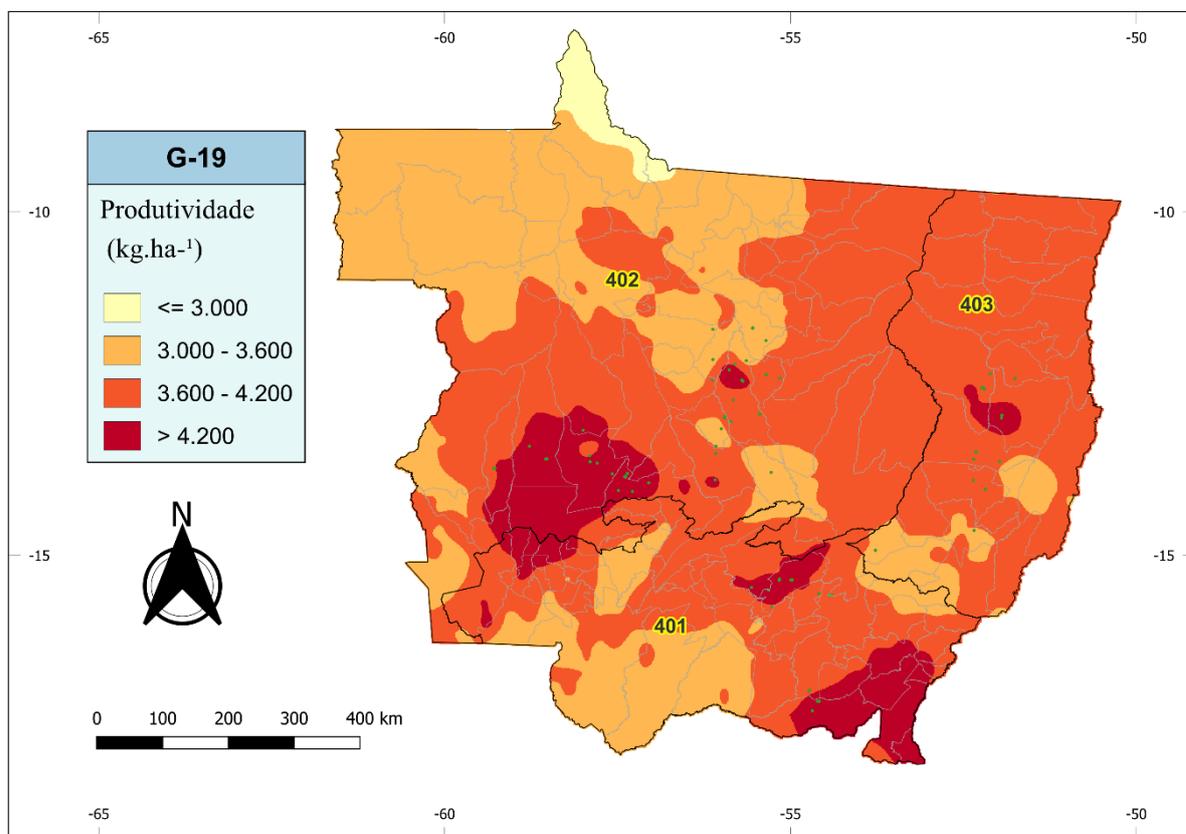
Apêndice B. Representação gráfica da adaptação produtiva, em $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, de oito cultivares de soja, avaliadas na Macrorregião Sojícola 4 do Brasil, com base na influência das variáveis ambientais.



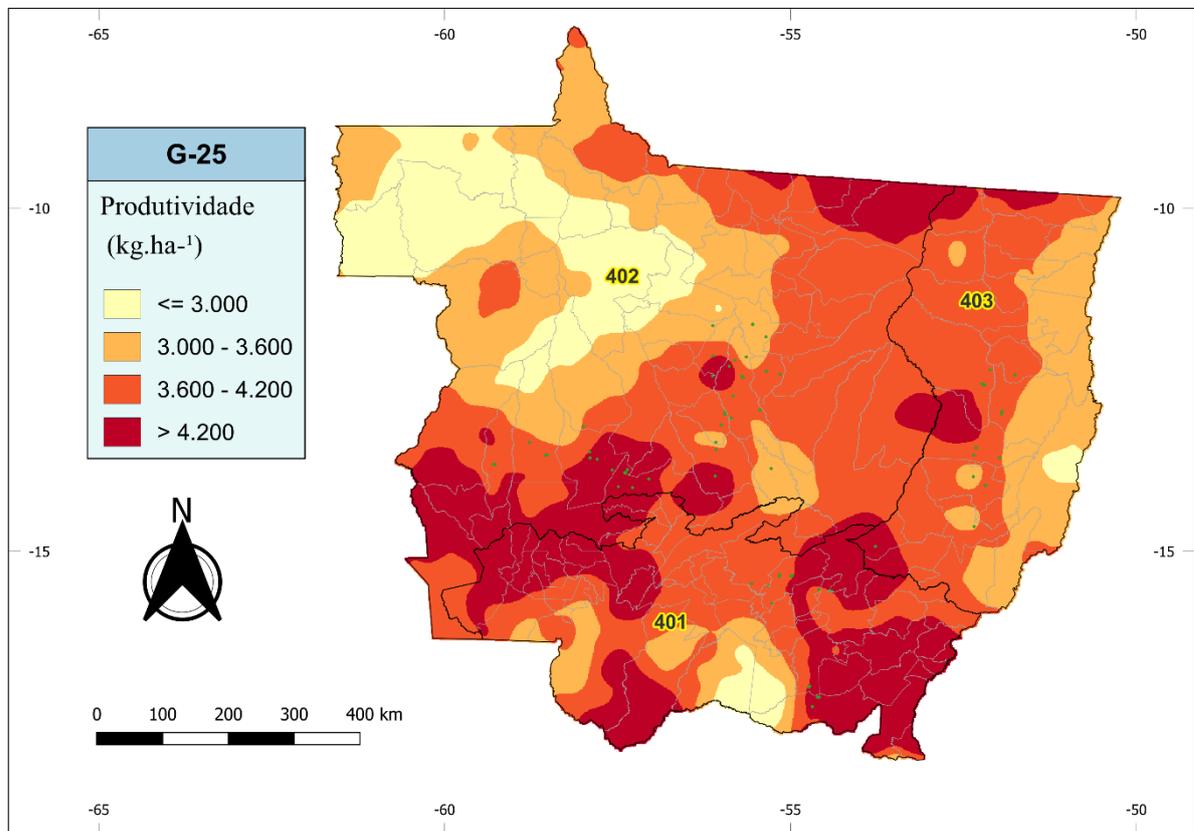
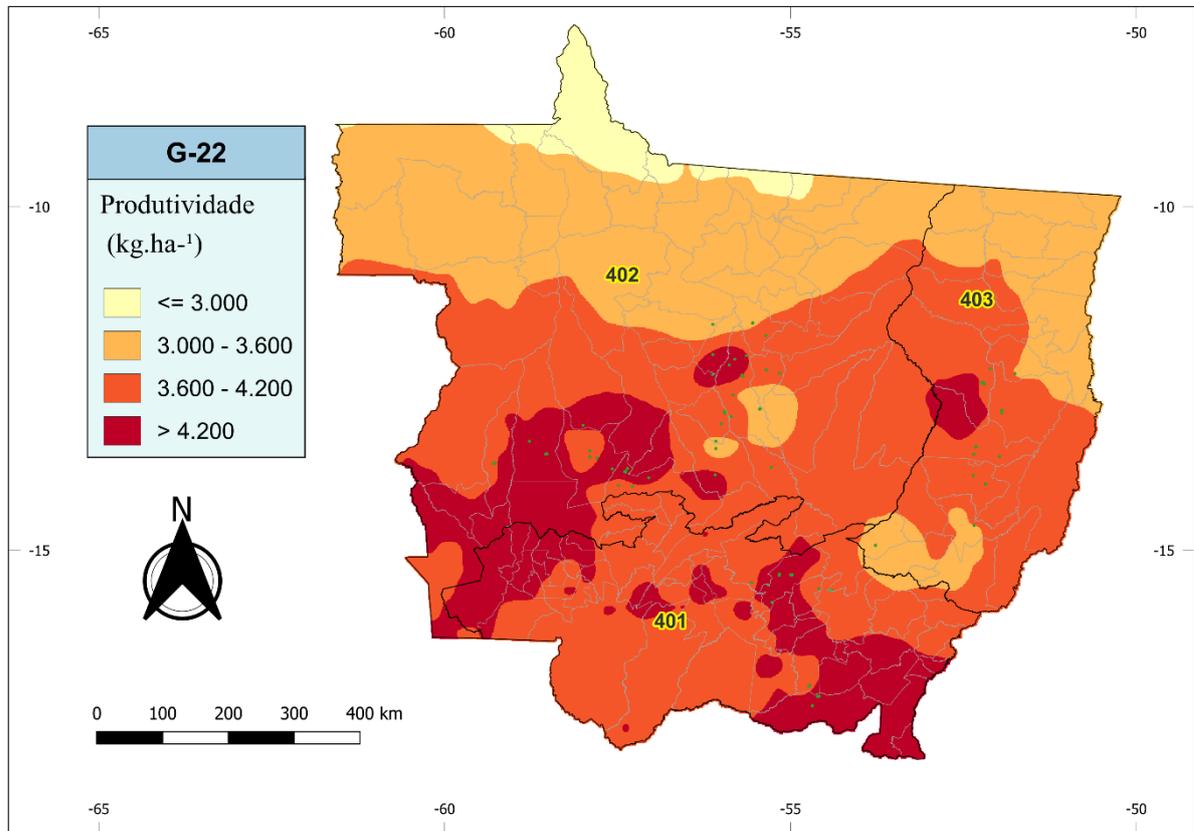
Apêndice B. Continuação...



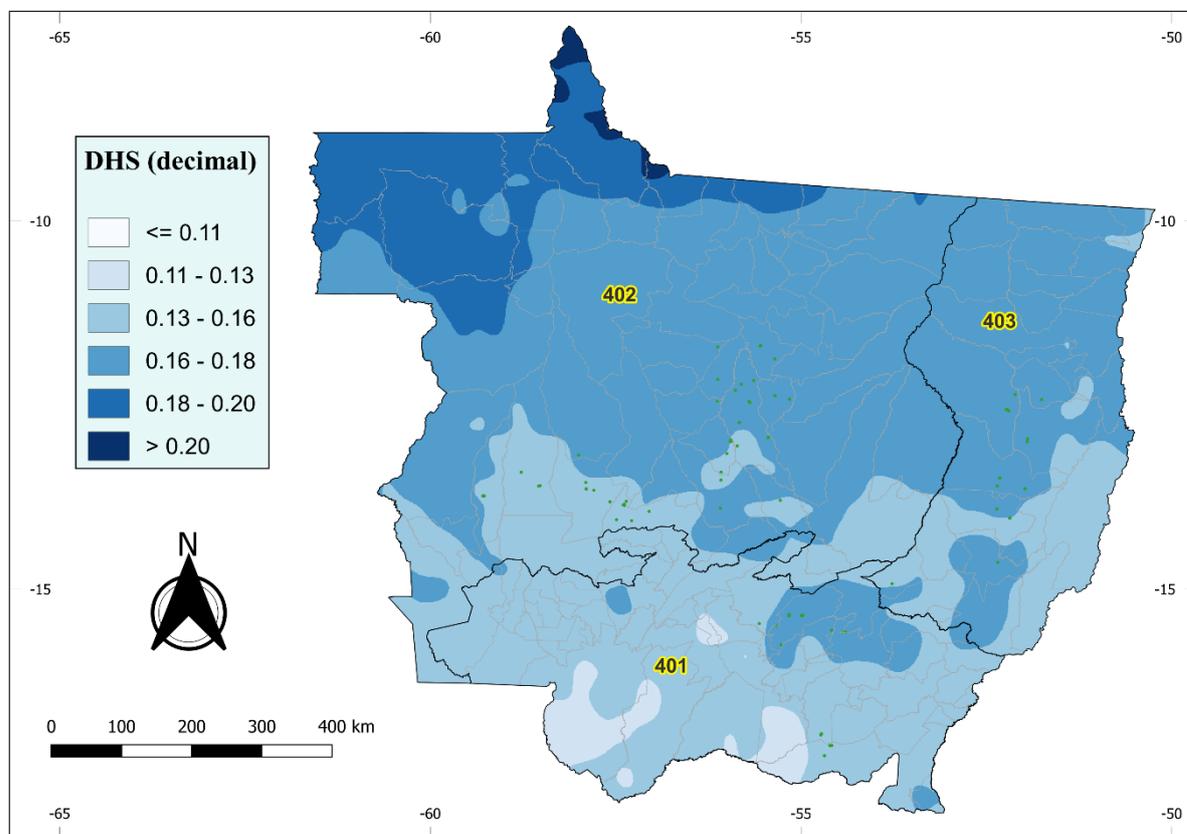
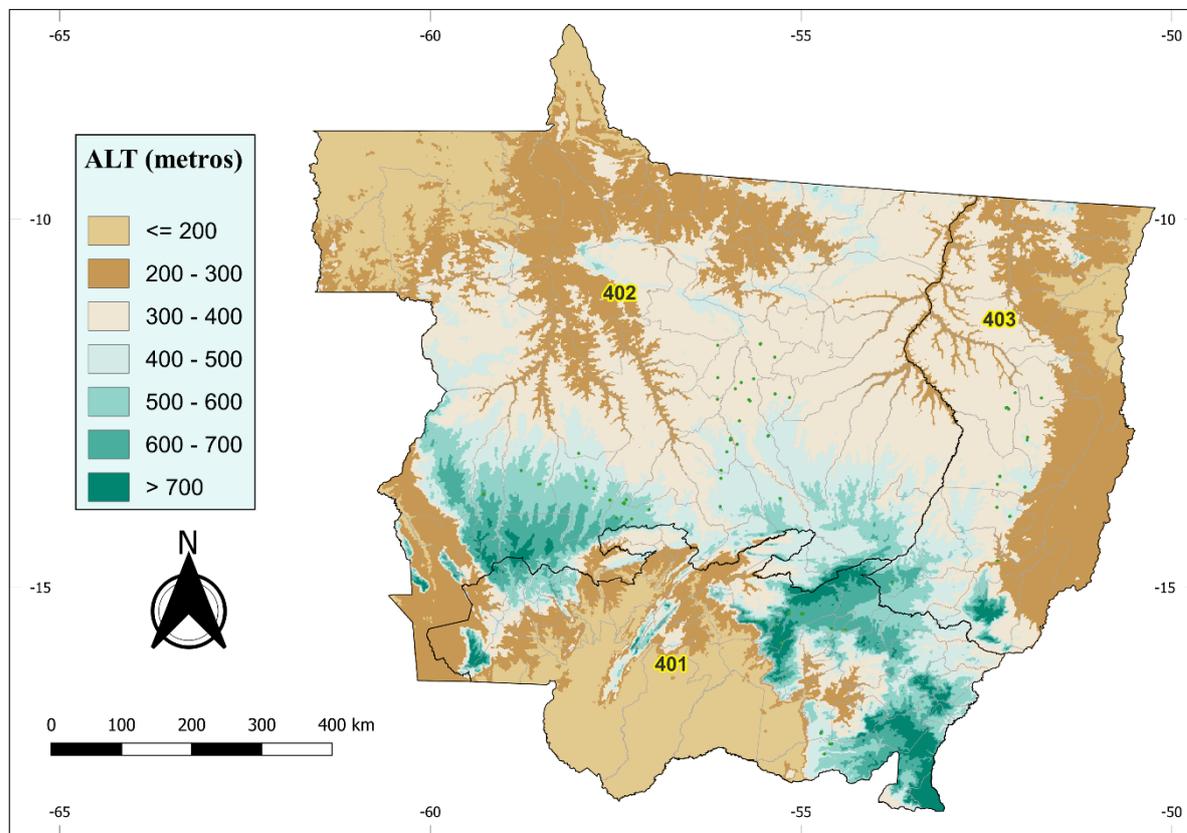
Apêndice B. Continuação...



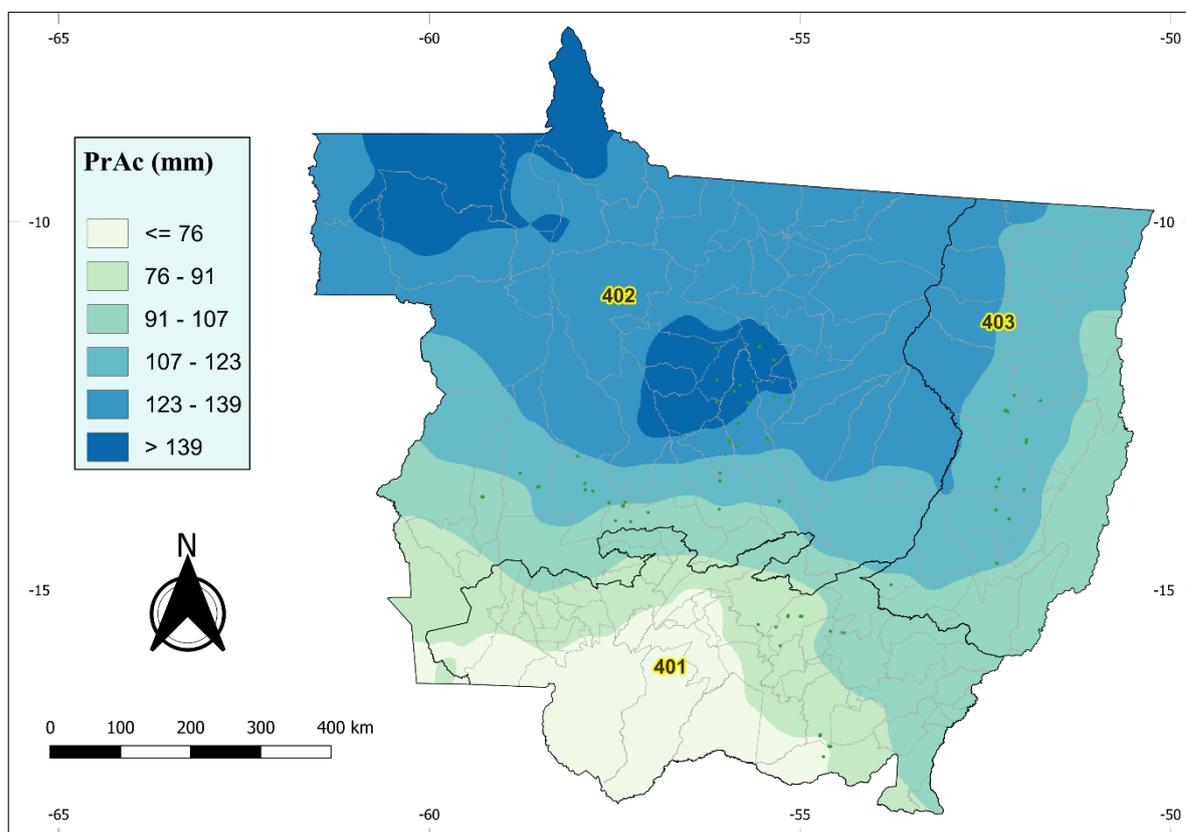
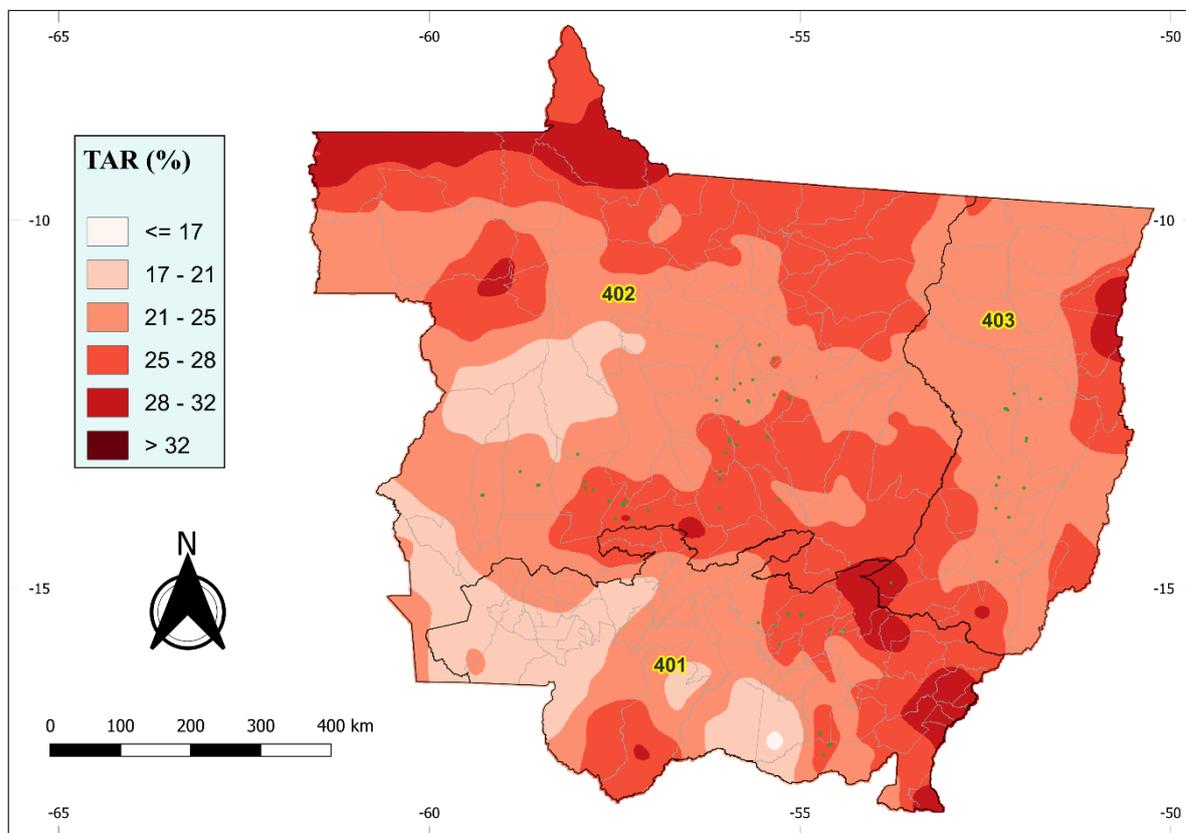
Apêndice B. Continuação...



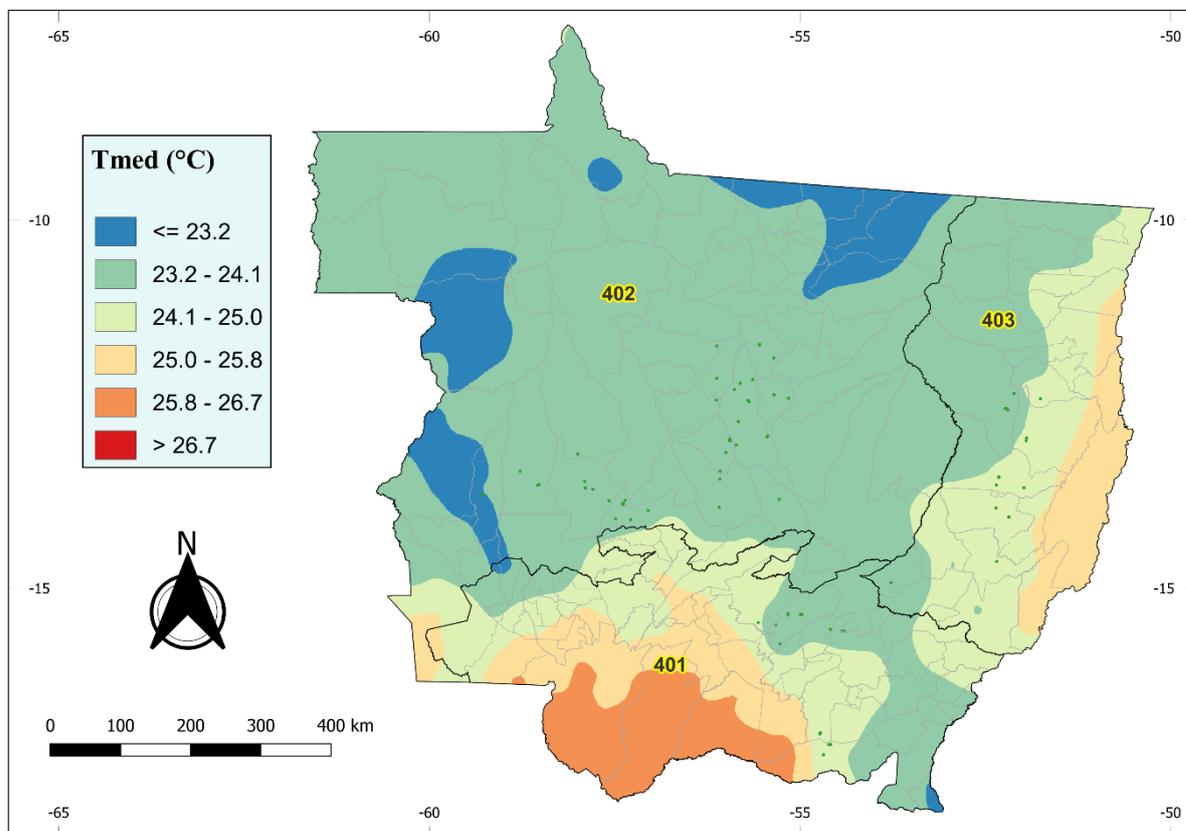
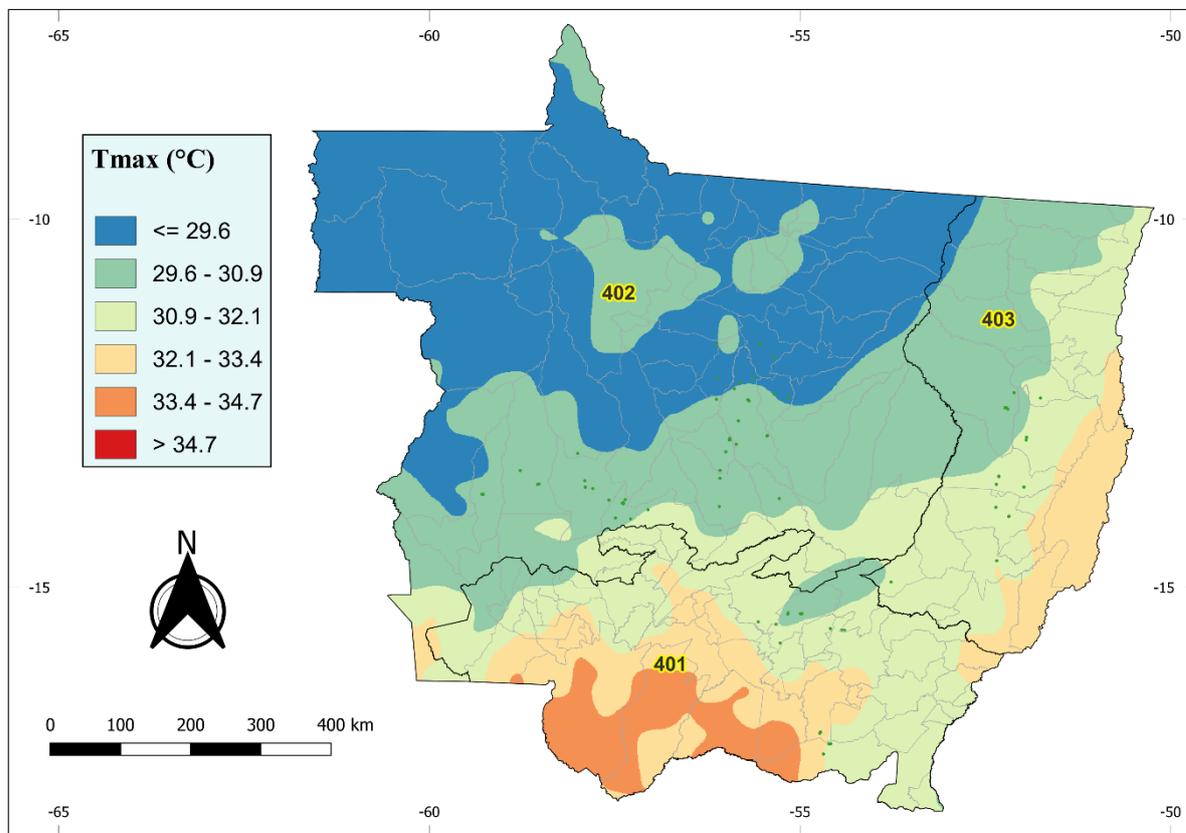
Apêndice C. Dados das covariáveis geográficas e ambientais, interpoladas no intervalo de 01/outubro a 15/março, nas safras de 2019/2020 a 2021/2022.



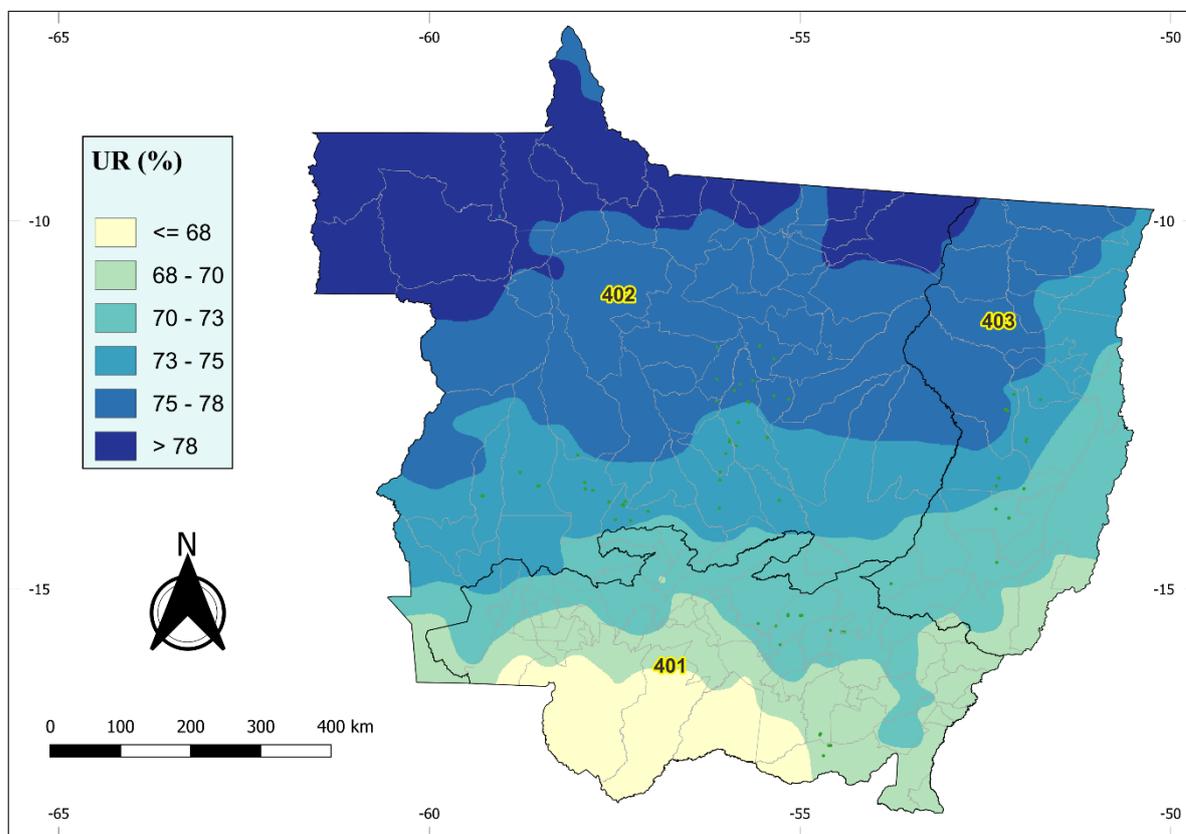
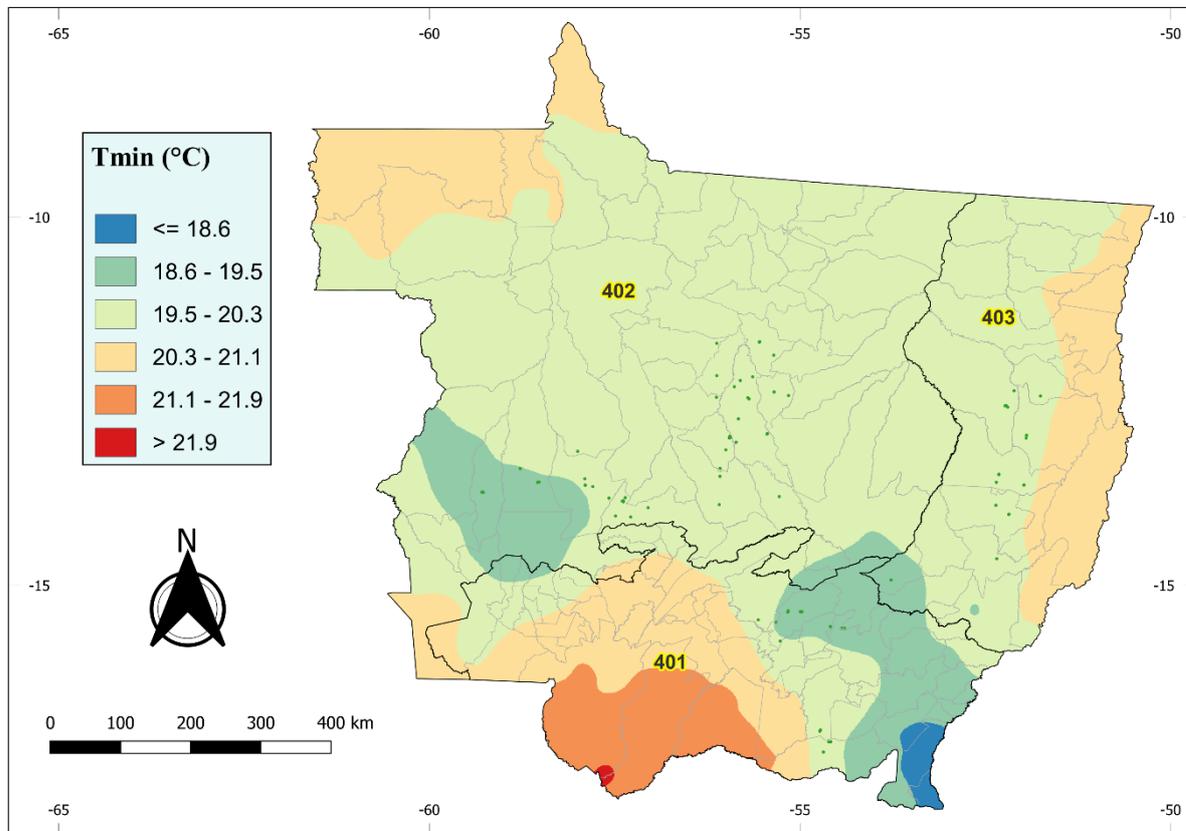
Apêndice C. Continuação...



Apêndice C. Continuação...



Apêndice C. Continuação...



Apêndice C. Continuação...

