



**INSTITUTO
FEDERAL**
Piauí

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
CAMPUS URUÇUI
CURSO BACHARELADO EM ENGENHARIA AGRÔNOMICA**

JOSÉ RANON ALVES GOMES DA PAIXÃO

**ÉPOCAS DE SEMEADURA DA SOJA COM BASE EM RISCO CLIMÁTICO E
POTENCIAL PRODUTIVO EM URUÇUI – PI**

URUÇUI

2025

JOSÉ RANON ALVES GOMES DA PAIXÃO

ÉPOCAS DE SEMEADURA DA SOJA COM BASE EM RISCO CLIMÁTICO E
POTENCIAL PRODUTIVO EM URUÇUI – PI

Trabalho de Conclusão de Curso (artigo científico) apresentado como exigência parcial para obtenção do diploma do Curso de Bacharelado em Engenharia Agrônoma do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Uruçuí.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Magno Pereira da Silva

URUÇUI

2025

ÉPOCAS DE SEMEADURA DA SOJA COM BASE EM RISCO CLIMÁTICO E POTENCIAL PRODUTIVO EM URUÇUÍ – PI

José Ranon Alves Gomes da Paixão¹
Eduardo Magno Pereira da Silva²

RESUMO

A cultura da soja destaca-se como a principal oleaginosa cultivada no Brasil, porém ainda enfrenta diversos entraves que limitam seu pleno potencial produtivo, especialmente aqueles relacionados às condições climáticas. Para minimizar esses riscos, a definição adequada das épocas de semeadura é fundamental para garantir altas produtividades na cultura, especialmente em regiões com elevada variabilidade climática, como Uruçuí – PI. O objetivo deste estudo foi avaliar as épocas de semeadura da soja em Uruçuí, com base no risco climático e no potencial produtivo. A pesquisa foi conduzida como um estudo de caso. Os dados foram coletados mediante levantamento documental e aplicação de modelos matemáticos, considerando séries históricas meteorológicas e custos de produção referentes ao município de Uruçuí, bem como cultivares recomendadas para a região estudada. A disponibilidade hídrica foi o principal fator determinante das datas de semeadura, os decêndios de Julho 1 a Outubro 2 foram inaptos em razão da baixa relação entre a evapotranspiração real e a evapotranspiração da cultura. A produtividade e a viabilidade econômica variaram conforme a disponibilidade de água, sendo o período reprodutivo o mais sensível ao déficit hídrico. As cultivares pertencentes ao grupo II apresentaram desempenho superior e maior probabilidade de cobertura dos custos de produção, em função de seu ciclo fenológico mais longo. As janelas de semeadura mais favoráveis concentraram-se nos decêndios Outubro 3, Novembro 2 e 3 e Dezembro 1. De modo geral, as datas consideradas aptas estenderam-se de Outubro 3 a Fevereiro 1 para ambos os grupos (I e II), com ampliação até Fevereiro 3 para as cultivares do grupo II. Comparado ao zoneamento agrícola de risco climático, o estudo evidenciou a possibilidade de antecipação da semeadura, além de diferenciar as recomendações de manejo em função do grupo de maturação das cultivares.

Palavras-chave: *Glycine max*; zoneamento agroclimático; variabilidade climática; planejamento agrícola.

ABSTRACT

Soybean stands out as the main oilseed crop cultivated in Brazil; however, it still faces several constraints that limit its full productive potential, especially those related to climatic conditions. To mitigate these risks, the proper definition of sowing dates is

¹ Graduando em Bacharelado em Engenharia Agrônômica pelo Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Piauí – IFPI Campus Uruçuí. E-mail: joseranon80@gmail.com

² Docente, Dr. Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Piauí - IFPI, Campus Uruçuí. E-mail: eduardo.silva@ifpi.edu.br

essential to ensure high crop yields, particularly in regions with high climate variability, such as Uruçuí, Piauí State. The objective of this study was to evaluate soybean sowing dates in Uruçuí based on climatic risk and productive potential. The research was conducted as a case study. Data were obtained through documentary analysis and the application of mathematical models, considering historical meteorological series and production costs for the municipality of Uruçuí, as well as soybean cultivars recommended for the studied region. Water availability was the main factor determining sowing dates; the decennial periods from July I to October II were considered unsuitable due to the low ratio between actual evapotranspiration and crop evapotranspiration (ETR/ET_c). Yield and economic viability varied according to water availability, with the reproductive stage being the most sensitive to water deficit. Cultivars belonging to maturity group II showed superior performance and a higher probability of covering production costs due to their longer phenological cycle. The most favorable sowing windows were concentrated in October III, November II and III, and December I. Overall, suitable sowing dates extended from October III to February I for both maturity groups (I and II), with an extension to February III for group II cultivars. Compared with the Agricultural Climate Risk Zoning, the study demonstrated the possibility of anticipating sowing dates and differentiating management recommendations according to the maturity group of the cultivars.

Keywords: *Glycine max*; agricultural climate zoning; climate variability; agricultural planning

Data de aprovação: 25/11/2025 (data de apresentação do TCC)

1 INTRODUÇÃO

A cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é estratégica para o agronegócio brasileiro, destacando-se como a principal oleaginosa cultivada no país. O estado do Piauí, especialmente o município de Uruçuí, integra a região do MATOPIBA (Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia), considerada nova fronteira agrícola do Brasil. Nessa região, as condições edafoclimáticas permitem elevada produtividade, mas o regime pluviométrico irregular e a ocorrência de veranicos representam riscos importantes à estabilidade do rendimento.

A produção nacional de grãos de soja atingiu cerca de 169.657 mil t, configurando uma participação crucial da cultura para o agronegócio brasileiro (CONAB, 2024). Além disso, a sojicultura desempenhou um papel fundamental a partir da década de 1990, para a acelerada ocupação do cerrado aliado a um crescimento econômico no estado do Piauí, cujos municípios em destaque, desponta Uruçuí, com sua importância na condução do processo de modernização agrícola do sul do Piauí (Crispim, 2021).

A soja, no entanto, possui diversos entraves para atingir seu máximo de produtividade, como é o caso das condições climáticas, sobretudo condições de luminosidade, fotoperíodo, temperatura e umidade. Nesse sentido, um aspecto muito importante é a escolha da época de semeadura, pois visa propiciar uma coincidência de condições climáticas favoráveis com os estádios de desenvolvimento da cultura em que tais condições sejam requeridas (Silva et. al., 2022).

De acordo com Seixas et al. (2020) a soja tem sido semeada no início do período indicado para viabilizar o cultivo de milho segunda safra. Entretanto, esse procedimento pode levar a problemas na emergência, um dos períodos mais críticos para a cultura, em razão de déficit hídrico e/ou baixa temperatura do solo.

O Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC), desenvolvido pelo Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA) em parceria com a Embrapa, define janelas de semeadura mais seguras para cada município, levando em conta variabilidade climática, grupos de maturação (GMs) e características do solo (MAPA, 2024). Dessa forma, conhecer e avaliar as datas de semeadura da soja em Uruçuí – PI é fundamental para minimizar riscos, otimizar o uso dos recursos naturais e garantir maior rentabilidade.

Este estudo teve como objetivo avaliar as épocas de semeadura da soja em Uruçuí – PI, com base no risco climático e no potencial produtivo.

2 METODOLOGIA

A pesquisa foi conduzida como um estudo de caso, de caráter exploratório e descritivo, com abordagem quantitativa. A coleta de dados foi realizada em fontes documentais e complementada pela aplicação de modelos matemáticos, visando garantir maior consistência às análises.

2.1 Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos empregados no estudo foram: precipitação pluvial; temperatura mínima, máxima e média do ar em escala diária; obtidos a partir de um levantamento de uma série histórica meteorológica de 15 anos (01/01/2010 a 31/12/2024) referente ao município de Uruçuí (Latitude: -7,44; Longitude: -44,34; Altitude: 398,83 m), obtidas na base oficial do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), estação automática A346, atendendo o período mínimo utilizado na elaboração do zoneamento agrícola de risco climático. Foram obtidos também os

dados de irradiância solar global extraterrestre (Q_0) média mensal dos últimos 20 anos, por meio da base de dados da NASA/POWER (Prediction Of Worldwide Energy Resources). Já o fotoperíodo (N) foi estimado por uma aproximação tabelada por Pereira, Angelocci e Sentelhas (2007) considerando a latitude mais próxima ao qual localiza-se o município estudado.

Para a estimativa da irradiância solar global incidente utilizou a metodologia apresentada por Hargreaves e Samani (1982) (eq. 1), que utiliza os valores de temperatura máxima e mínima do ar, a irradiância solar global extraterrestre (Q_0) e o coeficiente de calibração (k) considerando-o 0,16 em detrimento da localidade.

$$Q_g = k\sqrt{(T_{\max} - T_{\min})}Q_0 \quad (1)$$

em que: Q_g é a irradiância solar global incidente em ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).

Utilizou-se para a insolação (n) a equação proposta por Angstrom-Prescott (eq. 2), utilizando como variáveis Q_0 , Q_g , N e os coeficientes “a” e “b”, cujos valores foram estabelecidos de acordo com a localização.

$$Q_g = Q_0(a + bn/N) \quad (2)$$

em que: n é número de horas de brilho solar.

2.2 Dados da cultura

Selecionou-se aleatoriamente cultivares de soja na plataforma Zarc Plantio Certo Web, a qual oferece informações oficiais sobre o zoneamento agrícola, em conformidade com a indicação por macrorregião sojícola. Assim, as cultivares foram agrupadas, consoante seu Grupo de Maturação Relativa (GMR), conforme a seguinte especificação: grupo I ($\text{GMR} < 8.7$); grupo II ($8.7 \leq \text{GMR} \leq 9.3$) e grupo III ($\text{GMR} > 9.3$), correspondendo à Macrorregião 5, a qual faz parte o município estudado.

Nesse sentido, realizou-se uma média do número de dias de ciclo fenológico e fase vegetativa para 17 cultivares do grupo I e 11 cultivares do grupo II (Tabela 1).

Tabela 1– Cultivares de soja agrupadas consoante o grupo de maturação relativa (GMR) recomendadas para a macrorregião 5

Grupo I			
Cultivar	GMR	Ciclo (dias)	FV (dias)
ANsc80 111	8.0	100	32
AV MAMBA RR	8.1	110	45
752 I2X	7.5	103	25
CG Speed IPRO	6.8	88	24
BRS 8182RR	8.1	110	45
96R29IPRO	6.2	102	39
ST 797 IPRO	7.9	101	33
PP 8415 IPRO	8.4	115	25
FTR 2182 IPRO	8.2	88	29
690 I2X	6.9	97	23
VA 82A RR	8.2	102	32
IMA 791 IPRO	7.9	107	35
LTT 7701 IPRO	7.7	110	27
76KA72	7.6	103	30
GNS 7901 IPRO	7.9	106	31
SYN 15640 IPRO	6.4	99	28
TMG2374IPRO	7.4	99	22
Grupo II			
ANsc88 022	8.8	114	40
BRS 8890RR	8.8	107	42
99R09	9.0	141	51
M8808IPRO	8.8	120	45
PP 9274 IPRO	9.0	125	35
FTR 4288 IPRO	8.8	100	38
90IX87RSF I2X	9.0	109	30
PV1 ALAGOANA RR	9.1	118	49
8900 ST RR	8.9	124	40
SYN 1687 IPRO	8.7	118	40
TMG1188RR	8.8	122	31

Fonte: ZARC (2025).

2.3 Dados econômicos

Os dados natureza econômica, relacionados aos custos de produção e aos preços por saca de soja, foram extraídos da base de dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) e no site do AGROLINK respectivamente, contemplando registros administrativos e estatísticas oficiais, levantando-se uma média dos últimos 4 (quatro) anos. Para os custos de produção levou-se em consideração os custos totais, que compreende o somatório do custo operacional mais a remuneração

atribuída aos fatores de produção.

2.4 Balanço hídrico de cultivo

Para a elaboração do banco hídrico climatológico sequencial de cultivo adotou-se a metodologia Thornthwaite e Mather (1955), que possibilitou calcular a disponibilidade de água no solo ao longo do ciclo da cultura, iniciando-se com a estimativa da capacidade de água disponível (CAD) (eq. 3) e da evapotranspiração potencial por meio da simplificação de Camargo (1971) (eq. 4).

$$CAD = DA Z \quad (3)$$

$$ETP = 0,01 Q_0 T ND \quad (4)$$

em que: DA, em mm/m de solo, cujo valor considerado foi de 140, seguindo as recomendações de Doorenbos e Kassam (1994), devido impossibilidade de se ter dados locais; Z, profundidade efetiva do sistema radicular, que para a soja recomenda-se 0,5 metros; Q₀, expressa em mm de evaporação equivalente por dia; T, temperatura média do ar no período considerado; e o número de dias do período considerado (ND). Assim, determinou-se a evapotranspiração da cultura (ET_c) a partir do produto entre a ETP e o coeficiente de cultura (K_c) obtidos pela tabela da metodologia FAO de Doorenbos e Kassam (1994) nas diferentes fases da cultura (Tabela 3).

Tabela 2 – Coeficiente de cultura (K_c) e fator de resposta da cultura (k_y) de acordo com as fases de desenvolvimento da soja

Fase de desenvolvimento	Cultivares Grupo I	Cultivares Grupo II	k _y	K _c
	Dias	Dias		
Estabelecimento (S-V2)	10	10	-	0,30
Desen. Vegetativo (V2-R1)	21	30	0,20	0,70
Floração/Ench. Grãos (R1-R5)	56	63	0,90	0,85
Maturação (R6-R8)	15	15	-	0,40
Ciclo	102	118	0,85	

Fonte: Adaptado de Doorenbos e Kassam (1994).

A partir disso, prosseguiu-se no desenvolvimento do balanço hídrico em escala decendial (divisão temporal organizado em períodos de 10 dias), seguindo as etapas

preenchendo colunas a seguir:

(P-ETc) – Diferença entre as colunas P e ETc;

(NEG e ARM) – negativo acumulado e armazenamento de água no solo, preenchidas simultaneamente. Se (P-ETc) < 0, calcula-se NEG = (P-ETc) + (NEG anterior), cujo resultado é utilizado para calcular o ARM pela equação (eq. 5). Se (P-ETc) > 0, calcula-se ARM = (P-ETc) + (ARM anterior), cujo resultado é utilizado para calcular o NEG pela equação (eq. 6);

ALT – É obtida pela diferença entre o ARM do decêndio em questão e o ARM do decêndio anterior;

ETR – Se (P-ETc) ≥ 0, ETR = ETc. Se ALT ≤ 0, ETR = P + |ALT|;

DEF – Diferença entre ETc e ETR;

EXC – Se ARM < CAD, EXC = 0. Se ARM = CAD, EXC = (P-ETc) – ALT.

$$ARM = CAD e^{\frac{NEG}{CAD}} \quad (5)$$

$$NEG = CAD \ln \left(\frac{ARM}{CAD} \right) \quad (6)$$

2.5 Estimativa de produtividade

2.5.1 Produtividade potencial

As estimativas de produtividade potencial final (PP_F) foram obtidas por meio da aplicação do modelo matemático desenvolvido pela FAO e proposto por Doorenbos e Kassam (1994), Zona Agroecológica (MZA) (eq. 7), considerando a produção potencial bruta de matéria seca da cultura padrão (PPB_p); um fator de correção para o efeito do índice de área foliar, definido como C_{IAF}; correção para respiração C_R; correção para a parte colhida C_C; número de dias do período considerado; e umidade residual U%.

$$PP_F = (PPB_p C_{IAF} C_R C_C ND) / (1 - 0,01 U\%) \quad (7)$$

em que a PP_F é dada em kg ha⁻¹.

A PPB_p foi estimada para as condições de céu nublado (PPB_n) e céu limpo (PPB_c) conforme as equações eq. (8), eq. (9) e eq. (10).

$$PPB_p = PPB_n + PPB_c \quad (8)$$

$$PPB_n = (31,7 + 0,219 Q_0) cT_n (1 - n/N) \quad (9)$$

$$PPB_c = (107,2 + 0,36 Q_0) cT_c n/N \quad (10)$$

em que: cT_n é a correção devido à temperatura, para cada grupo de cultura (eficiência fotossintética) relativo ao período nublado e a cT_c ao período sem nuvens. A cultura

da soja, que é uma planta C3 e adaptada ao verão, pertence ao grupo II, classificação dos autores para os parâmetros de determinação de cT_n e cT_c , dependendo da temperatura média do ar no período T (eq. 11; eq. 12). A temperatura ficou entre os valores de 16,5 e 37°C.

$$cT_n = 0,583 + 0,014 T + 0,0013 T^2 - 0,000037 T^3 \quad (11)$$

$$cT_c = -0,0425 + 0,035 T + 0,00325 T^2 - 0,0000925 T^3 \quad (12)$$

O C_{IAF} foi definido a partir da eq. (13), a qual foi considerada a IAF_{max} obtidas pela eq. (14), definida por Battisti (2013).

$$C_{IAF} = 0,0093 + 0,185 IAF - 0,0175 IAF^2 \quad (13)$$

$$IAF \geq 5, C_{IAF} = 0,5$$

$$IAF = 0,0851 PV + 0,6598 \quad (14)$$

em que o PV é o período vegetativo em dias, o qual figura entre a emergência e o início da floração.

A correção para a respiração C_R foi de 0,5, consoante a temperatura média do ar, do período, superior a 20°C. Já o C_c e a $U\%$ foram de 0,3 e 10 respectivamente, conforme as recomendações dos autores para a cultura da soja.

2.5.2 Produtividade atingível

A produtividade atingível foi estimada pela eq. (15) a partir dos valores de produtividade potencial PP_F ; as relações ETR/ET_c de cada fase de desenvolvimento da cultura, outrora determinada no balanço hídrico; e o fator de resposta da cultura (ky), que foram adaptadas de acordo com as indicações dos autores para cada fase de desenvolvimento da soja (Tabela 3).

$$PA = PP_F [1 - ky(1 - ETR/ET_c)] \quad (15)$$

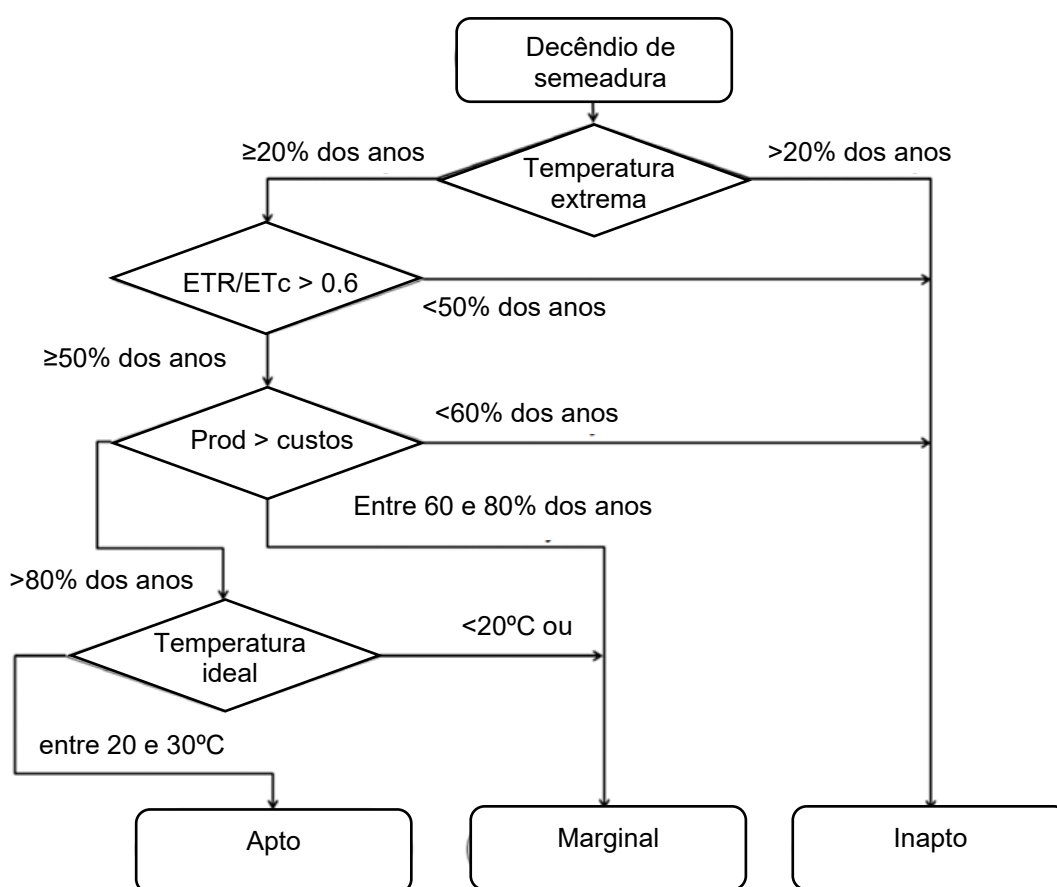
em que a PA é dada em $kg\ ha^{-1}$.

2.6 Critérios para definir datas de semeadura

A metodologia de definição dos critérios de semeadura foi adaptada de Battisti e Sentelhas (2014). As datas de semeadura foram organizadas em decêndios, entendidos como intervalos de aproximadamente dez dias dentro de cada mês, sendo convencionalmente divididos em primeiro (dias 1 a 10), segundo (dias 11 a 20) e terceiro decêndio (dias 21 ao final do mês).

Para fins de identificação, adotou-se como nomenclatura as três primeiras letras do mês, seguidas de um algarismo arábico indicativo do decêndio (por exemplo, *Out 1*, *Out 2* e *Out 3*). Com base nos critérios climáticos e econômicos estabelecidos, os decêndios de semeadura foram classificados em aptos, marginais ou inaptos, considerando quatro etapas (Figura 1).

Figura 1 – Fluxograma de critérios para classificação da aptidão dos decêndios de semeadura para a cultura da soja.



Fonte: Adaptado de Battisti e Sentelhas (2014).

Etapa 1: Foram consideradas inaptas as datas de semeadura nas quais as temperaturas máximas do ar ultrapassaram 40 °C ou foram inferiores a -1 °C, valores caracterizados como extremos para a cultura, em pelo menos 20% dos anos ao longo do ciclo produtivo.

Etapa 2: Os decêndios de semeadura em que mais de 50% dos anos apresentaram condições hídricas inadequadas durante a fase de estabelecimento caracterizadas por relação ETR/ETc inferior a 0,6 foram igualmente classificados como inaptos.

Etapa 3: Foram considerados aptos os decêndios de semeadura nos quais a receita estimada com a produtividade atingível superou os custos de produção em mais de 80% dos anos, aqueles com superação dos custos de produção entre 60 e 80% dos anos foram classificados como marginais.

Etapa 4: Os decêndios de semeadura em que a temperatura média do ar permaneceu fora da faixa ideal de 20 a 30 °C ao longo de todo o ciclo da cultura também foram enquadrados na classe marginal.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Cultura da soja

A produção de soja, elemento central no desenvolvimento econômico do Brasil, sustenta uma complexa cadeia produtiva que vai do cultivo primário à industrialização e à produção de carnes, com forte participação tanto nas exportações quanto no consumo interno (Vieira Filho, 2024). Além disso, a soja apresenta grande importância para a cadeia produtiva animal, sendo fonte de alimento de alta aceitabilidade e pode ser usado como fonte única de proteína em rações, como o farelo moído, que representa aspectos nutricionais como 44% a 48% de proteína bruta (Garcia, 2020).

As condições ideais para o crescimento e desenvolvimento da soja incluem temperaturas do ar e do solo entre 20 °C e 30 °C, que favorecem a germinação rápida e a emergência uniforme das plântulas, além de uma profundidade de semeadura de aproximadamente 5 cm no subsolo. A temperatura, aliada ao fotoperíodo, influencia diretamente o ciclo fenológico da planta, uma vez que a soja é fotossensível e apresenta respostas diferenciadas à duração do dia dependendo da latitude e da data de plantio. Além disso, a soja requer um volume total de água entre 450 mm e 800 mm por ciclo, sendo a água essencial para o desenvolvimento celular e fundamental nas fases críticas de germinação, floração e enchimento de grãos (Seixas et al., 2020).

A fenologia da soja descreve as diferentes fases do ciclo de desenvolvimento da cultura, desde a emergência até a maturação fisiológica. O entendimento dessas fases é fundamental, pois cada estágio apresenta demandas fisiológicas distintas e responde de forma diferenciada às condições ambientais. A classificação fenológica proposta por Fehr e Caviness (1977) ainda é amplamente utilizada, dividindo o ciclo em fases vegetativas (V) e reprodutivas (R) (Seixas et al., 2020).

As fases de desenvolvimento também podem ser descritas quanto à sensibilidade a temperatura e fotoperíodo, que figura principalmente entre a

emergência e a floração. Na fase pré-indutiva ou juvenil, as plantas não são capazes de perceber estímulo ao fotoperíodo. Logo após, a planta adquire a capacidade de perceber os estímulos, que induzem a diferenciação dos meristemas vegetativos em reprodutivos, configurando a fase indutiva. Com o início do desenvolvimento do primórdio floral até a antese (fase pós-indutiva), ocorre a organogênese floral. O grau de sensibilidade termofotoperiódica do genótipo das cultivares de soja, determina a duração dessas fases (Rodrigues et al., 2001).

Na fase de estabelecimento o estresse hídrico pode causar apodrecimento de sementes, bem como tombamento de plântulas em pré ou pós-emergência. No florescimento (R1 a R2), em decorrência do déficit hídrico, a planta pode sofrer abortamento de folhas e flores, causando a redução do número de legumes por planta, que é um dos principais componentes de rendimento (Zanon et al., 2018).

A insuficiência hídrica afeta também os estágios R3 e R4, podendo causar abortamento dos frutos e um desbalanço na relação fonte-dreno, prejudicando a fase de maturação, pois nesses estádios a planta passa a direcionar fotoassimilados para o desenvolvimento de legumes. Já o enchimento de grãos (R5-R6) exige uma alta quantidade de água (5 a 7 mm/dia) pois inicia a translocação dos fotoassimilados para os grãos e é uma fase de rápido acúmulo de matéria seca e nutrientes, com máximo índice de área foliar e desenvolvimento de raízes. A ocorrência de déficit hídrico durante esse período pode reduzir o peso de grãos e a produtividade. Assim, para que o período de maior disponibilidade hídrica coincida com o florescimento e enchimento de grãos, a semeadura deve ser planejada, em caso de sistema de produção sequeiro (Zanon et al., 2018).

Em função desses fatores, como disponibilidade hídrica e fotoperíodo, Fietz e Rangel (2008) estudaram a época de semeadura da soja na região de Dourados – MS, observando que as cultivares semeadas em outubro sofreram com maior déficit hídrico, enquanto as semeaduras mais tardias, em dezembro, tiveram maior disponibilidade de água nas fases críticas, entretanto, quando relaciona o fotoperíodo, novembro proporcionou as melhores condições.

O grupo de maturidade relativa (GMR) é uma classificação dos cultivares de soja quanto a duração do ciclo de desenvolvimento, cuja determinação baseia-se principalmente em resposta ao fotoperíodo, permitindo uma ampla faixa de ambientes e latitudes como as que ocorre nas áreas de sojicultura no Brasil. Essa nova abordagem se deu a partir do trabalho de Alliprandini et al. (2009), que avaliaram a

duração do ciclo de desenvolvimento de cultivares comerciais em diferentes latitudes e altitudes, a fim de quantificar a interação genótipo x ambiente. E a partir de então, os programas de melhoramento de soja no Brasil utilizaram os cultivares desse estudo como padrão para classificar os seus. Nessa classificação, os cultivares indicados para a região subtropical do Brasil são de 4.5 a 7.0 GMR, enquanto regiões tropicais são de 6.5 a 10.0 (Zanon et al., 2018).

3.2 Modelo de estimativa de produtividade

Um modelo agrometeorológico é uma ferramenta que tem por finalidade simular o crescimento e desenvolvimento de culturas agrícolas com base em um conjunto de equações, buscando representar os principais processos para se avaliar uma cultura agrícola (Vianna et. al., 2017).

Dourado Neto et al. (1998) apontam que os modelos de crescimento e desenvolvimento de plantas, além de fornecer uma base para o planejamento e o manejo de uma produção agrícola, podem também contribuir para auxiliar na perspectiva de estudos futuros.

3.2.1 Modelo da Zona Agroecológica – FAO

Há diversos estudos que estimam produtividade de plantas baseado em modelos matemáticos, como é o caso do modelo da Zona Agroecológica – FAO, proposto por Doorenbos e Kassan (1994), que relaciona a produção com a déficit hídrico, correlacionando empiricamente fatores derivados de coeficientes que possuem efeitos sobre a produtividade por estresse hídrico durante os estádios fenológicos das culturas, cujas exigências são distintas (Calve, 2011).

Utilizando-se desse modelo, para realizar o zoneamento agroclimático e avaliar o potencial de rendimento da soja na região de Sealba, localizada próxima ao litoral leste do Nordeste brasileiro, Silva (2022) concluiu que o modelo indicou condições favoráveis à produção de grãos, com elevado potencial produtivo. De forma semelhante, Battisti e Sentelhas (2014) aplicaram o mesmo método para propor novas datas de semeadura da soja nos municípios de Cruz Alta (RS), Jataí (GO) e Balsas (MA), demonstrando que a abordagem apresentou potencial para definir períodos de plantio, considerando aspectos agrônômicos e econômicos da cultura.

3.2.2 Modelo de balanço hídrico climatológico

O modelo de balanço hídrico climatológico desenvolvido por Thornthwaite e Mather (1955) tem o intuito de determinar o regime hídrico de um local, sem necessidade de medidas diretas das condições do solo, permitindo deduzir a evapotranspiração real, a deficiência ou o excedente hídrico, e o total de água retida no solo em cada período, utilizando a Capacidade de Água Disponível (CAD), medidas de precipitação e a estimativa da evapotranspiração potencial em cada período (Pereira, 2005).

3.3 Zoneamento agrícola de risco climático

Em 1996, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) implementou o Programa de Zoneamento Agrícola com intuito de promover apoio à política de crédito e seguridade agrícola do Governo Federal, para reduzir as perdas por eventos climáticos adversos na agricultura brasileira, estabelecendo zoneamentos de riscos de natureza climática de acordo com os atributos de cultura escolhida, ciclo, período de semeadura e características das regiões (Cunha et. al., 2001). Contudo, no contexto atual, para se encaixar nessas e noutras políticas como Programa de Subvenção ao Prêmio do Seguro Rural (PSR), Programa de Garantia da Atividade Agropecuária (Proagro) e no Programa de Garantia da Atividade Agropecuária da Agricultura Familiar (Proagro Mais); é obrigatório adotar as recomendações do ZARC (Oliveira et. al, 2023).

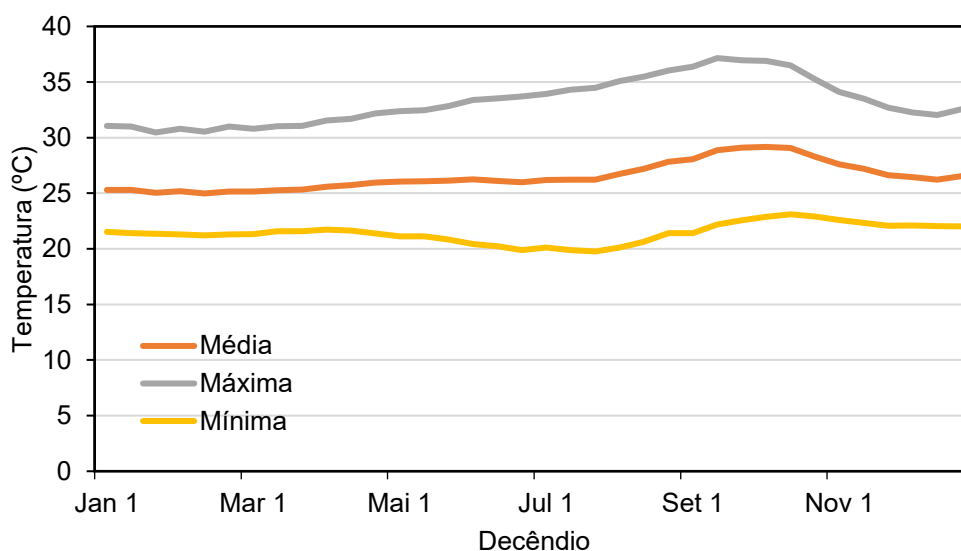
A metodologia desenvolvida pela Embrapa consiste em uma avaliação meteorológica com base em séries históricas superiores a 20 anos em um recorte espacial estabelecido, integrando parâmetros pertinentes a cultura, como exigências e componentes de produtividade, ciclo de desenvolvimento e épocas de semeaduras; com as delimitações dos elementos climáticos, como temperatura, umidade relativa do ar, precipitação e com características de solo, que são classificadas em Tipo 1, Tipo 2 e Tipo 3; de acordo com a capacidade de retenção de água. A partir desses dados, mediante análises estatísticas, determinam-se a capacidade de água disponível (CAD), o coeficiente da cultura (K_c), a profundidade do sistema radicular, a demanda hídrica da cultura e as evapotranspirações potencial, máxima e real para que se estabeleça os valores médios do Índice de Satisfação de Necessidade de Água (Isna) (Santos; Martins, 2016).

Para a interpretação por município, é considerado como apto para o cultivo quando pelo menos 20% do território apresentar condições com baixo risco climático, ou seja, quando o valor do Isna estiver dentro do limite da cultura. Logo, o Zarc apresenta indicações das melhores épocas de plantio da cultura em questão para os lugares selecionados, considerando 80% de viabilidade e 20% de chance de ocorrência de algum evento prejudicial (Santos; Martins, 2016).

3.4 Parâmetros Agroclimáticos

A etapa inicial para a definição das datas de semeadura foi a quantificação da probabilidade de ocorrência de temperaturas extremas do ar ao longo de cada decêndio. No entanto, não foi observado temperatura máxima do ar acima de 40 °C em mais de 20% dos anos, tampouco temperaturas abaixo de -1 °C (dados não apresentados). Ao observar pela média durante os anos avaliados, a variação de temperatura mínima e máxima variam entre 20 e 37 °C, considerada adequada ao desenvolvimento da soja (Gráfico 1).

Gráfico 1 - Variação da temperatura média, máxima e mínima por decêndio em Uruçuí, PI



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

A etapa subsequente envolveu a análise da disponibilidade hídrica para a semeadura, considerando como critério que pelo menos 50% dos anos apresentassem índice de evapotranspiração relativa (ETR/ET_c) acima de 0,6 no período de estabelecimento da cultura. Os decêndios compreendidos entre Jul 1 e Out 2 não atingiram o limite mínimo de 50% (Tabela 4), resultado que reforça o padrão

de precipitação do município, caracterizado pela baixa ocorrência de chuva nesse período (Gráfico 2). Assim, esses decêndios foram classificados como inaptos, uma vez que a insuficiência hídrica pode comprometer a germinação e favorecer o tombamento de plântulas, inviabilizando o estabelecimento da lavoura.

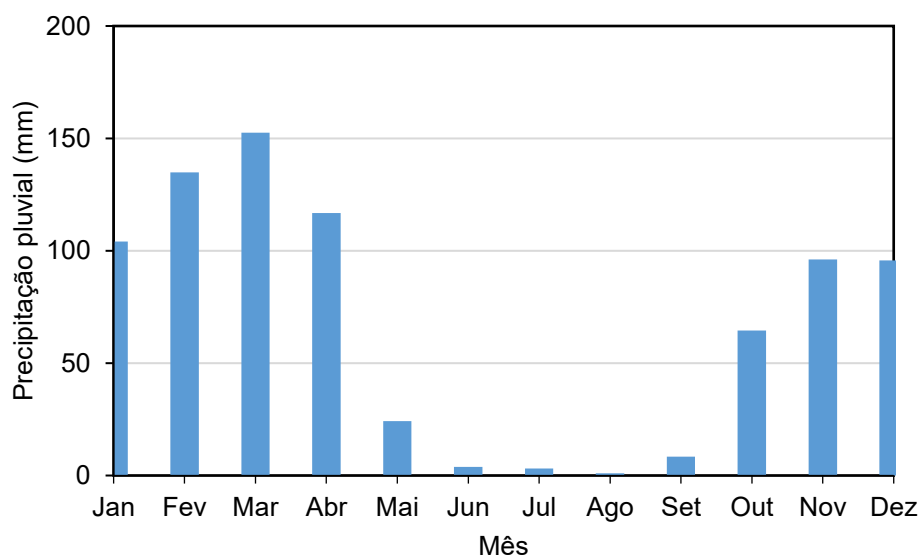
Tabela 3 - Probabilidade anual de ocorrência de evapotranspiração relativa (ETR/ETc) maior que 0,6 na fase de estabelecimento para a cultura da soja em Uruçuí, PI

Decêndio de semeadura																	
Jan			Fev			Mar			Abr			Mai			Jun		
1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
100	93	87	87	93	100	93	93	87	87	93	87	93	87	80	80	67	60
Jul			Ago			Set			Out			Nov			Dez		
1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
47	20	0	0	0	7	7	0	40	27	47	87	87	93	100	100	100	100

Fonte: elaborado pelo autor (2025).

Os demais decêndios (de Out 3 a Jun 3) foram, portanto, considerados aptos e utilizados para avaliação da produtividade da soja em relação a viabilidade econômica e à superação dos custos de produção (Tabela 5). A relação ETR/ETc influenciou diretamente a produtividade atingida, visto que níveis mais elevados de disponibilidade hídrica favoreceram a manutenção dos processos fisiológicos essenciais da cultura, especialmente durante as fases de germinação, estabelecimento e alongamento vegetativo.

Gráfico 2 - Precipitação pluvial mensal em Uruçuí, PI



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

Decêndios com maior equilíbrio hídrico apresentaram maior probabilidade de garantir condições adequadas de crescimento, refletindo-se em produtividades superiores. Por outro lado, períodos com baixa relação ETR/ETc resultaram em restrições ao desenvolvimento inicial da soja, reduzindo o potencial produtivo e aumentando o risco de não atingir a rentabilidade mínima exigida (Farias et al, 2024 a).

A Tabela 5 evidencia as diferenças nas probabilidades entre os dois grupos de cultivares avaliados, destacando que o grupo II apresentou percentuais superiores aos do grupo I. Essa resposta está associada à maior produtividade desse grupo, tanto no potencial produtivo (Gráfico 3) quanto na produtividade atingível (Gráfico 4). Tal superioridade decorre de seus maiores GMRs, que resultam em ciclos mais tardios para a latitude de Uruçuí-PI. Com um período mais longo de desenvolvimento, essas cultivares dispõem de mais tempo para acumular recursos, sintetizar fotoassimilados e produzir maior quantidade de matéria seca.

Por outro lado, observa-se que, em ambos os grupos, os decêndios com produtividade capaz de superar os custos de produção em menos de 60% dos anos correspondem aos três decêndios de abril, maio e junho, restando, portanto, uma ampla janela de semeadura favorável. Destacam-se especialmente os decêndios Out 3, Nov 2, Nov 3 e Dez 1 (este último apenas para o grupo II), que apresentaram probabilidades superiores a 90%.

Tabela 4 - Probabilidade anual da produtividade de dois grupos de cultivares de soja superar os custos de produção conforme os decêndios de semeadura em Uruçuí, PI

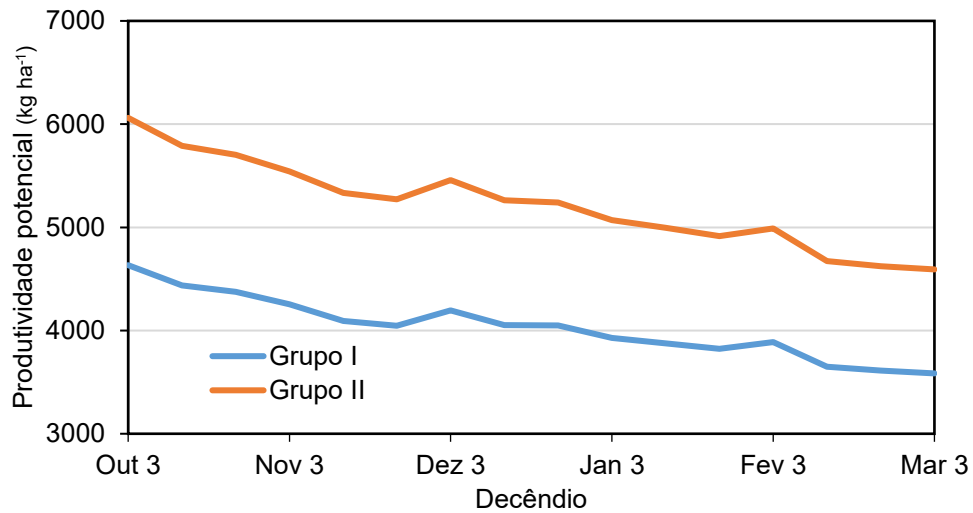
Grupo cultivar	Decêndio de semeadura																										
	Out			Nov			Dez			Jan			Fev			Mar			Abr			Mai			Jun		
	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3		
I	93	93	93	80	73	67	67	73	67	73	80	73	73	73	67	60	13	0	0	0	0	0	0	0	0		
II	93	93	93	80	93	87	87	87	87	87	80	73	80	73	67	60	33	0	0	0	0	0	0	0	0		

Fonte: elaborado pelo autor (2025).

A produtividade atingível mostrou forte sensibilidade à disponibilidade hídrica, o que se evidencia pelas diferenças observadas em relação à produtividade potencial (Gráficos 3 e 4). Essa variação está diretamente associada ao comportamento da relação ETR/ETc ao longo do ciclo da cultura, uma vez que cada fase fenológica apresenta diferentes exigências e fatores de resposta ao déficit hídrico. Nas fases

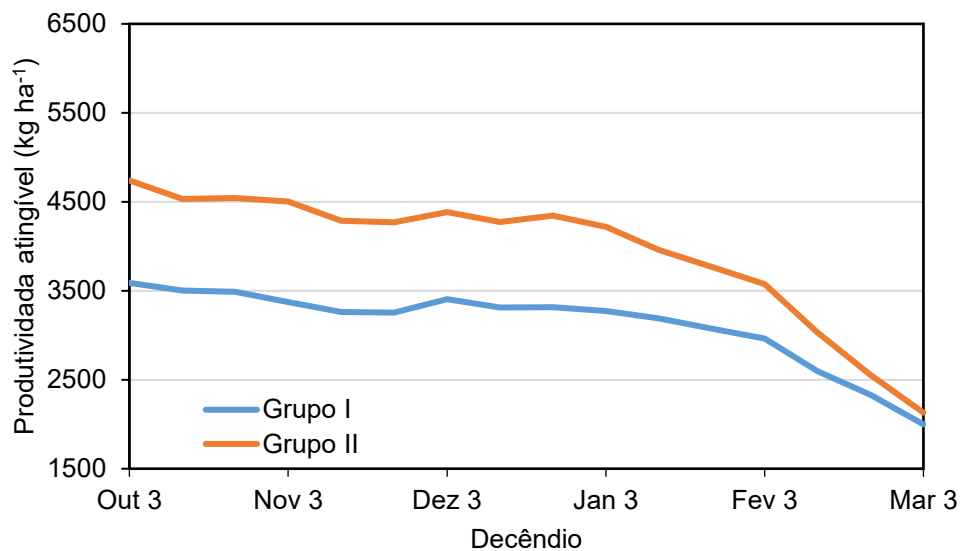
vegetativas, a cultura demonstra maior tolerância a oscilações hídricas; contudo, à medida que se aproxima do período reprodutivo, a demanda por água aumenta significativamente para garantir a formação de flores, vagens e o enchimento de grãos (PET Agronomia, 2022).

Gráfico 3 - Produtividade potencial para a cultura da soja do grupo de cultivares I e II para a semeadura nos decêndios aptos e marginais em Uruçuí, PI



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

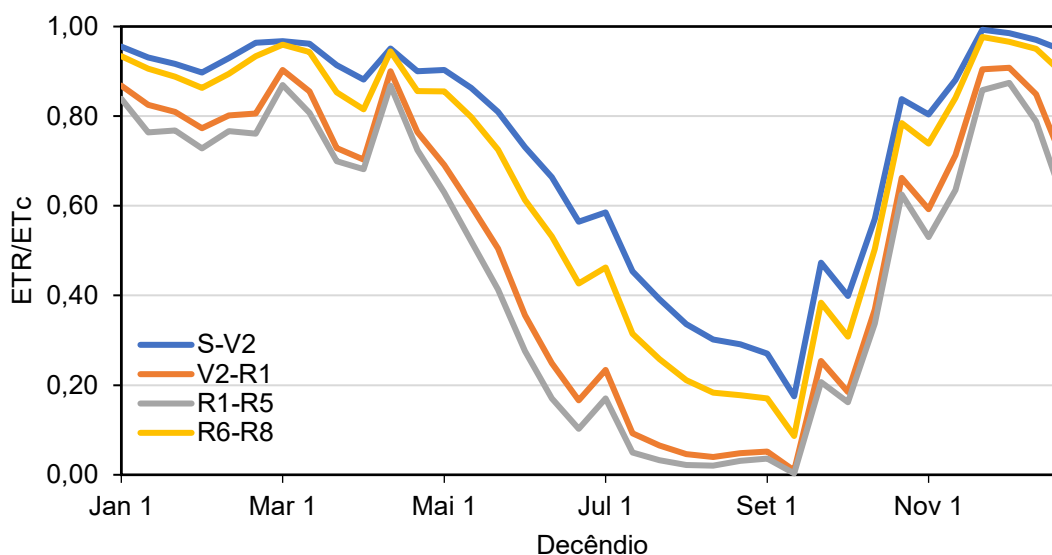
Gráfico 4 - Produtividade atingível para a cultura da soja do grupo de cultivares I e II para a semeadura nos decêndios aptos e marginais em Uruçuí, PI



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

Como resultado desse padrão fisiológico, a fase R1–R5 apresentou o menor índice de ETR/ETc entre as etapas avaliadas (Gráfico 5), refletindo sua maior vulnerabilidade ao estresse hídrico. Efeitos desse déficit nessa fase reprodutiva já foram relatados por Doorenbos e Kassam (1994), destacando que a menor ETR/ETc compromete diretamente o rendimento. Além disso, estudos empíricos em soja demonstram que o estresse hídrico nesse período pode levar ao aborto de flores, redução da fixação de nitrogênio, queda na fotossíntese e prejuízo no enchimento dos grãos (Gatelli et al, 2023).

Gráfico 5 - Evapotranspiração relativa média para a cultura da soja para as diferentes fases de desenvolvimento



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

Rosa et al. (2020) observaram que linhagens de soja submetidas a estresse moderado e severo na fase reprodutiva (R3) apresentaram perdas significativas de produtividade, atribuídas à diminuição da eficiência fotossintética e ao aumento do estresse oxidativo (estresse hídrico durante a fase reprodutiva de duas linhagens de soja). Da mesma forma, relatórios da Embrapa indicam que, na fase reprodutiva (R1–R6), a redução de rendimento pode ultrapassar 40%, dependendo da intensidade, duração e momento do déficit.

Adicionalmente, modelos de simulação (AquaCrop) confirmam esse efeito, sob déficit hídrico aplicado entre R1 e R5, as estimativas de produtividade foram

significativamente menores em comparação aos tratamentos com água plena, demonstrando que a redução da biomassa aérea e da acumulação de matéria seca nessa fase tende a comprometer o rendimento final da soja (Farias et al, 2024 b).

A avaliação da temperatura média do ar ao longo do ciclo da cultura não indicou nenhum decêndio fora da faixa considerada ideal para o desenvolvimento da soja (20 a 30 °C) (dados não apresentados). Esse resultado está de acordo com o observado no Gráfico 1, que mostrou que a temperatura média anual do município oscila próxima aos limites recomendados, mas sem ultrapassá-los de forma restritiva.

Identificaram-se como aptas para a semeadura, no grupo I, as datas correspondentes a Out 3, Nov 1, Nov 2, Nov 3 e Fev 1. Para o grupo II, as datas aptas estenderam-se de Out 3 a Fev 1, além de Fev 3 (Tabela 6). Esse resultado evidencia que cultivares mais tardias apresentam uma janela de semeadura mais ampla; contudo, cultivares precoces, quando implantadas de forma antecipada, também podem expressar bom desempenho produtivo, além de favorecer a disponibilidade de uma janela adequada para o cultivo de uma segunda safra.

Tabela 5 - Decêndios aptos (A), marginais (M) e inaptos (I) para a semeadura da soja, considerando grupos de cultivares I e II, em comparação com o zoneamento agrícola de risco climático (ZARC) em condições iguais, em Uruçuí, PI

Grupo cultivar	Decêndio de semeadura																										
	Out			Nov			Dez			Jan			Fev			Mar			Abr			Mai			Jun		
	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3		
I	A	A	A	A	M	M	M	M	M	M	A	M	M	M	M	M	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
II	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	M	A	M	M	M	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
Zarc																											
I	I	A	A	A	A	A	A	A	A	A	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
II	I	A	A	A	A	A	A	A	A	A	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	

Fonte: elaborado pelo autor (2025).

Ao comparar esses resultados com a metodologia empregada pelo MAPA (ZARC), verifica-se que a janela oficial de semeadura é mais restrita, iniciando em Nov 1 e encerrando em Jan 3. Assim, o presente estudo demonstra a possibilidade de antecipar a semeadura em relação ao ZARC. Observa-se, ainda, que o método do MAPA não diferencia a aptidão de semeadura entre os grupos de cultivares, o que contrasta com os resultados encontrados nesta pesquisa.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A definição das datas de semeadura da soja deve considerar, prioritariamente, a disponibilidade hídrica no período de estabelecimento e ao longo do ciclo, uma vez que a temperatura não se apresenta como fator limitante na região. Os decêndios entre julho e início de outubro apresentaram déficit hídrico recorrente, tornando-se inaptos ao estabelecimento da cultura. A partir de Out 3, as condições de ETR/ETc mostraram maior regularidade, permitindo melhor emergência, crescimento inicial e maior probabilidade de alcançar produtividades economicamente viáveis.

A forte sensibilidade da produtividade ao déficit hídrico, sobretudo entre R1 e R5, reforça a necessidade de sincronizar fases críticas da cultura com períodos de maior oferta de água. As diferenças observadas entre os grupos de cultivares mostraram vantagem para o grupo II, que, devido ao ciclo mais longo, apresentou maior potencial produtivo, maior probabilidade de superar os custos de produção e uma janela de semeadura mais ampla.

Comparado ao ZARC/MAPA, o estudo evidencia a possibilidade de antecipar a semeadura e demonstra que a diferenciação entre grupos de maturação relativa melhora a precisão das recomendações. Assim, os resultados oferecem suporte técnico para o planejamento agrícola regional, contribuindo para maior segurança produtiva e econômica na sojicultura local.

REFERÊNCIAS

- AGROLINK. **AGROLINK - Cotações de commodities agrícolas, com preços atualizados diariamente em todos os estados brasileiros. Preço de soja, trigo, milho, arroz, hortifruti.** Disponível em: <<https://www.agrolink.com.br/cotacoes/historico/pi/soja-em-grao-sc-60kg>>. Acesso em: 18 nov. 2025.
- ALLIPRANDINI, L. F. *et al.* Understanding soybean maturity groups in Brazil: environment, cultivar classification, and stability. **Crop science**, v. 49, n. 3, p. 801-808, 2009.
- BATTISTI, R. (2013). **Épocas de semeadura da cultura da soja com base no risco climático e na rentabilidade líquida para as principais regiões produtoras do Brasil.** Tese (Doutorado) – USP/ESALQ.
- BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C. New agroclimatic approach for soybean sowing dates recommendation: A case study. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, p. 1149-1156, 2014.
- CALVE, L. **Estimativa da perda potencial de soja no Paraná através de métodos agrometeorológicos para fins de seguro agrícola.** 2011. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas, SP.
- CÂMARA, G. M. S. *et al.* (2020). Ecofisiologia e manejo da cultura da soja. **Revista de Ciências Agrárias**, v.63, p. 1-12.
- CAMARGO, A. P. **Balanço hídrico no estado de São Paulo.** 3.ed. Campinas: IAC, 1971. 24p. Boletim n.116.
- CRISPIM, L. C. **A dinâmica geoeconômica da soja no município de Uruçuí, PI.** 2021.
- DA CUNHA, G. R. *et al.* Zoneamento agrícola e época de semeadura para soja no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, n. 3, p. 446-459, 2001.
- DE OLIVEIRA, A. F. *et al.* Avaliação dos impactos do ZARC ao produtor: o valor da informação para soja em MT. 2023.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Efeito da água no rendimento das culturas. Estudos FAO - Irrigação e Drenagem n.33, 1994. 306p. (Traduzido por Gheyi, H.R. *et al.* - UFPB).
- DOURADO-NETO, D. *et al.* Principles of crop modeling and simulation: I. Uses of mathematical models in agricultural science. **Scientia Agrícola**, v. 55, p. 46-50, 1998.
- EMBRAPA Pesca e Aquicultura. (2017). **Zoneamento de risco climático para determinação de épocas de semeadura da cultura da soja na região**

MATOPIBA. Palmas: Embrapa.

FARIAS, D. B. S.; RODRIGUES, L. N.; ALEMAN, C. C.; CECOM, P. R. *Estimation of soybean crop water deficit sensitivity index* — relata reduções de produtividade sob déficit em estádios reprodutivos, 2024. a

FARIAS, D. B. S.; RODRIGUES, L. N.; SOUZA, S. A. AquaCrop model assessment for simulating soybean response under water stress. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.54:05, 2024. <http://doi.org/10.1590/0103-8478cr20230168>. b

FIETZ, C. R.; RANGEL, M. A. S. Época de semeadura da soja para a região de Dourados-MS, com base na deficiência hídrica e no fotoperíodo. **Engenharia Agrícola**, v. 28, p. 666-672, 2008.

GARCIA, L. R. Qualidade nutricional de farelos de soja comerciais processados no município de Uberlândia. 2020.

GATELLI, A. E. P.; FOCHESSATO, E.; VANIN, J. P.; VIAN, A. L.; BREDEMEIER, C. Parâmetros fisiológicos da soja sob estresse hídrico. *Revista Cultivar*, 2023.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Estimating potential evapotranspiration. **Journal of the irrigation and Drainage Division**, v. 108, n. 3, p. 225-230, 1982.

MAPA – Ministério da Agricultura e Pecuária. (2023; 2024). **Portarias do Zoneamento Agrícola de Risco Climático para a cultura da soja no Estado do Piauí**. Brasília: MAPA.

MIRANDA, E. E. de; GASTAL, C. L.; COSTA, C. L. (2014). **O MATOPIBA como nova fronteira agrícola brasileira**. Campinas: Embrapa Territorial.

MONTEIRO, J. E. B. de A. *et al.* Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC). 2021.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. LCE 306. fev. 2007.

PEREIRA, A. R. Simplificado o balanço hídrico de Thornthwaite-Mather. **Bragantia**, v. 64, p. 311-313, 2005.

PET AGRONOMIA. “Desenvolvimento da soja x manejo.” 2022. <https://ufsm.br/r-779-1030>

RODRIGUES, O.; DIDONET, A.D.; LHAMBY, J.C.B.; BERTAGNOLLI, P.F.; LUZ, J.S. da. Resposta quantitativa do florescimento da soja à temperatura e ao fotoperíodo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, p.431-437, 2001.

ROSA, V. R. *et al.* Estresse hídrico durante a fase reprodutiva de duas linhagens de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 2020, <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2020.v55.26800>

SANTOS, W. G.; MARTINS, J. I. F. O Zoneamento Agrícola de Risco Climático e sua contribuição à agricultura brasileira. **Revista de Política Agrícola**, v. 25, n. 3, p. 79-94, 2016.

SEIXAS, C. D. S. *et al.* **Tecnologias de produção de soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2020.

Série Histórica - Custos - Soja - 1997 a 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/custos-de-producao/arquivos-custo-de-producao/agricolas/serie-historica-custos-soja-1997-a-2024-1/view>>. Acesso em: 18 nov. 2025.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. LCE 306. https://www.esalq.usp.br/departamentos/leb/aulas/lce306/MeteorAgricola_Apostila2007.pdf (2007).

SILVA, E. H. L. *et al.* Zoneamento agroclimático e potencial de rendimento da soja na região do SEALBA. 2022.

SILVA, F. *et al.* **Soja: do plantio à colheita**. Oficina de Textos, 2022.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. The water balance. Centerton, NJ: Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology, 1955. 104p. (Publications in Climatology, vol. VIII, n.1)

VIANNA, M. S.; MARIN, F. R.; PILAU, F. G. Modelo agrometeorológico genérico de produção vegetal (MAGÉ). Dept. de Eng. de Biosistemas – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queros” (USP). 2017.

VIEIRA FILHO, J. E. R. A produção de soja e sua importância na economia brasileira. **Revista de Política Agrícola**, 2024.

ZANON, A. *et al.* **Ecofisiologia da soja visando altas produtividades**. Ed. 1, p. 136, 2018.

Zarc - Plantio Certo. Disponível em: <<https://www.plantiocerto.cnptia.embrapa.br/>>. Acesso em: 18 nov. 2025.