1º HIDROGEOMINAS
SIMPÓSIO MINEIRO DE HIDROGEOMORFOLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS
07 – 10 de setembro de 2026
Departamento de Geografia – UFMG
Belo Horizonte - MG

# COMPARAÇÃO DE NÍVEIS DE PROBABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO NO PLANEJAMENTO DA IRRIGAÇÃO DA SOJA NO CERRADO MINEIRO

Laura Rodrigues Anorato [1]
Alisson Macendo Amaral [2]
Maria Ângela Cruz Macêdo dos Santos [3]
Leilson Alves dos Santos [4]

## RESUMO

A variabilidade da precipitação no Cerrado brasileiro impõe limitações ao planejamento da irrigação suplementar, especialmente em culturas de elevada demanda hídrica, como a soja. Este estudo teve como objetivo comparar diferentes níveis de probabilidade de precipitação (60%, 70%, 75%, 80% e 90% de excedência) e seus efeitos no planejamento hídrico da cultura em Arinos - MG. Foram utilizados dados mensais de precipitação e temperatura do ar do período de 1991 a 2019, obtidos do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. A precipitação foi modelada pela distribuição Gama, com estimativa dos parâmetros por máxima verossimilhança. A evapotranspiração potencial foi estimada pelo método de Thornthwaite, e a evapotranspiração da cultura foi obtida com coeficientes recomendados pela Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura – FAO. O balanço hídrico-climatológico foi conduzido pelo método de Thornthwaite e Mather, adotando-se capacidade de água disponível de 100 mm. Os resultados evidenciaram redução da precipitação provável e aumento da deficiência hídrica com o aumento da probabilidade de excedência. A necessidade de irrigação suplementar apresentou crescimento progressivo entre os cenários, com maior demanda nos níveis mais conservadores. O cenário P75 apresentou equilíbrio entre segurança climática e eficiência no uso da água. Conclui-se que a análise comparativa de probabilidades constitui ferramenta eficiente para o planejamento da irrigação em regiões de clima sazonal.

**Palavras-chave:** Precipitação provável; Irrigação suplementar; Distribuição Gama; Balanço hídrico; Soja.

## INTRODUÇÃO

A variabilidade intraestacional da precipitação constitui um dos principais fatores limitantes à produção agrícola no Cerrado brasileiro, afetando diretamente a disponibilidade hídrica para as culturas (IPCC, 2021). Mesmo em regiões com elevados totais anuais de precipitação, a distribuição

[1]Graduanda pelo Curso de Bacharelado em Agronomia do IFNMG - Campus Arinos, lra8@aluno.ifnmg.edu.br;
[2]Professor orientador pelo Curso de Bacharelado em Agronomia do IFNMG - Campus Arinos; alisson.amaral@ifnmg.edu.br;
[3]Doutora pelo Instituto Mineiro de Agropecuária - Esec Buritis - MG, angela_macedo.08@hotmail.com;
[4]Professor orientador pelo Curso de Bacharelado em Agronomia do IFNMG – Campus Arinos, leilson.santos@ifnmg.edu.br.

irregular das chuvas pode gerar déficits hídricos em períodos críticos do ciclo produtivo (BLÖSCHL et al., 2017).

Nesse contexto, a precipitação provável, obtida por meio de modelos probabilísticos aplicados a séries históricas, tem sido amplamente utilizada no planejamento agrícola, permitindo incorporar o risco climático às decisões de manejo (Fernandes; Heinemann; Paz, 2009. A distribuição Gama destaca-se como uma das mais utilizadas para modelagem de precipitação, devido à sua flexibilidade e adequação a dados assimétricos (Thom, 1958; Stagge et al., 2015).

A integração entre precipitação provável e balanço hídrico climatológico permite avaliar a dinâmica da água no solo e estimar a necessidade de irrigação suplementar, sendo ferramenta fundamental para o manejo racional da água (Thornthwaite; Mather, 1955; Gomide; Albuquerque, 2008). A cultura da soja apresenta elevada sensibilidade a déficits hídricos, principalmente nas fases reprodutivas, o que reforça a importância do planejamento hídrico adequado (Allen et al., 1998).

Diferentes níveis de probabilidade de excedência podem ser adotados no planejamento da irrigação, implicando distintos níveis de risco e segurança hídrica. Entretanto, a escolha desses níveis ainda é frequentemente realizada de forma empírica, sem análise comparativa estruturada.

A cultura da soja (*Glycine max* L.) foi adotada neste estudo devido à sua elevada relevância econômica no Cerrado brasileiro, especialmente na região Noroeste de Minas Gerais, que inclui municípios como Unaí, Arinos e Chapada Gaúcha, importantes polos de produção de grãos. Apesar do elevado potencial produtivo, a soja apresenta alta sensibilidade ao déficit hídrico, sobretudo em fases críticas do ciclo, sendo fortemente impactada pela irregularidade intraestacional das chuvas característica da região. Nesse contexto, sua utilização como cultura modelo permite avaliar, de forma aplicada, os efeitos da variabilidade da precipitação e a eficiência de estratégias de planejamento da irrigação suplementar.

Diante disso, este estudo teve como objetivo comparar cenários de precipitação provável associados às probabilidades de excedência de 60%, 70%, 75%, 80% e 90% e avaliar seus impactos no planejamento da irrigação suplementar da soja em Arinos - MG.

## ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado no município de Arinos–MG, situado entre as coordenadas geográficas15°55’ S e 46°06’ W, apresentando altitude média de 520 m, inserido na região do Cerrado brasileiro, caracterizada por clima tropical de savana (Aw), com estação chuvosa concentrada no verão e período seco no inverno (Oliveira; Oliveira, 2018). A região apresenta forte aptidão agrícola, com predominância da cultura da soja sob sistemas irrigados por pivô central.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados meteorológicos utilizados neste estudo foram obtidos da estação convencional do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), código 83384, localizada no município de Arinos - MG (15°55’ S; 46°06’ W; altitude aproximada de 520 m), abrangendo o período de 1991 a 2019. Foram utilizados dados mensais de precipitação (P, mm) e temperatura média do ar (T, °C). A consistência da série histórica foi verificada por meio de análise estatística descritiva (média, desvio padrão e identificação de valores discrepantes) e inspeção gráfica. Falhas eventuais foram preenchidas por regressão linear com dados de estações vizinhas, conforme procedimentos usuais em climatologia.
A evapotranspiração potencial mensal (ETP, mm) foi estimada pelo método de Thornthwaite (Thornthwaite, 1948), a partir da temperatura média mensal. Inicialmente, foi calculado o índice térmico anual (I), obtido pela soma dos índices térmicos mensais (i), conforme a Equação 1:

$$i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1,514} \quad (1)$$

em que: i é o índice térmico mensal adimensional; T é a temperatura média mensal do ar (°C).

A partir de I, foi determinado o coeficiente empírico (a), por meio da Equação 2:

$$\alpha = 6{,}75x10^{-7}I^3 - 7{,}71x10^{-5}I^2 + 1{,}79x10^{-2}I + 0{,}492 \quad (2)$$

em que: $\alpha$ é o coeficiente empírico adimensional do método de Thornthwaite; $I$ é o índice térmico anual adimensional, obtido pela soma dos índices térmicos mensais (i).

A evapotranspiração potencial mensal foi então calculada e corrigida em função do número de dias do mês e do fotoperíodo, conforme Thornthwaite e Mather (1955). A evapotranspiração da cultura (ETc, mm) foi determinada pela relação mostrada na Equação 3:

$$ETc = ETo x Kc \quad (3)$$

em que: ETc é a evapotranspiração da cultura (mm); ETo é a evapotranspiração de referência ou potencial (mm); Kc é o coeficiente de cultura adimensional, variável conforme o estádio fenológico da cultura.

A ETo foi aproximada pela ETP estimada, e os coeficientes de cultura (Kc) foram adotados conforme Allen et al. (1998), considerando os estádios fenológicos da soja (inicial, desenvolvimento, intermediário e final).

O balanço hídrico climatológico foi conduzido segundo o método sequencial de Thornthwaite e Mather (1955), adotando-se capacidade de água disponível (CAD) de 100 mm, valor representativo para Latossolos do Cerrado (Oliveira; Oliveira, 2018). O balanço foi realizado em base mensal, contemplando as seguintes variáveis: armazenamento de água no solo (ARM), evapotranspiração real (ETR), deficiência hídrica (DEF) e excedente hídrico (EXC). O armazenamento foi atualizado sequencialmente com base na relação entre precipitação e evapotranspiração potencial, respeitando o limite máximo da CAD.

A precipitação mensal foi modelada por meio da distribuição Gama de dois parâmetros, amplamente utilizada na análise de frequência de variáveis hidrológicas contínuas e assimétricas (Thom, 1958; Stagge et al., 2015). A função densidade de probabilidade da distribuição Gama é dada pela Equação 4:

$$f(x) = \frac{1}{\beta^{\alpha}\,\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} \qquad (4)$$

em que: f(x) é a função densidade de probabilidade; x é a variável aleatória (precipitação mensal, mm); α é o parâmetro de forma da distribuição Gama (adimensional); β é o parâmetro de escala da distribuição (mm); Γ(α) é a função Gama.

A partir do ajuste da distribuição, foram obtidos os quantis de precipitação mensal associados às probabilidades de excedência de 60%, 70%, 75%, 80% e 90%. A aderência da distribuição Gama aos dados observados foi avaliada pelo teste de Kolmogorov - Smirnov (KS), ao nível de significância de 5%.

O balanço hídrico climatológico foi recalculado para cada cenário de probabilidade (P60, P70, P75, P80 e P90), permitindo avaliar o impacto dos diferentes níveis de garantia na disponibilidade hídrica e na ocorrência de déficits.

A necessidade de irrigação suplementar (I, mm) foi estimada a partir da deficiência hídrica (DEF), considerando que a irrigação deve suprir o déficit entre a precipitação efetiva e a

evapotranspiração da cultura. A lâmina total de irrigação foi obtida pela soma das deficiências ao longo do ciclo produtivo da soja.

As análises estatísticas e a organização dos dados foram realizadas em ambiente computacional utilizando planilhas eletrônicas, com posterior elaboração de tabelas e figuras para análise comparativa dos cenários.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A modelagem da precipitação mensal por meio da distribuição Gama apresentou comportamento consistente com a natureza assimétrica dos dados pluviométricos, sendo adequada para estimativas de precipitação provável em diferentes níveis de probabilidade de excedência, conforme amplamente reportado na literatura (Thom, 1958; Stagge et al., 2015).

Os valores de precipitação provável para os cenários P60, P70, P75, P80 e P90 estão apresentados na Tabela 1, evidenciando redução progressiva da lâmina mensal à medida que se eleva o nível de probabilidade. Esse comportamento é esperado, uma vez que cenários mais conservadores representam condições de maior garantia, porém com menor disponibilidade hídrica (Fernandes; Heinemann; Paz, 2009)).

**Tabela 1** – Parâmetros da distribuição Gama (α e β) e precipitação provável mensal (mm) associada às probabilidades de excedência de 60%, 70%, 75%, 80% e 90% para o município de Arinos–MG, no período de 1991 a 2019.

| Mês | P60 | P70 | P75 | P80 | P90 |
|---|---|---|---|---|---|
| Outubro | 33,34 | 20,00 | 15,00 | 10,00 | 5,49 |
| Novembro | 171,76 | 150,00 | 140,00 | 120,00 | 105,48 |
| Dezembro | 186,95 | 170,00 | 160,00 | 130,00 | 98,59 |
| Janeiro | 121,83 | 100,00 | 90,00 | 70,00 | 44,03 |
| Fevereiro | 100,00 | 90,00 | 80,00 | 60,00 | 40,00 |
| Março | 119,43 | 100,00 | 85,00 | 65,00 | 45,53 |
| Abril | 60,00 | 50,00 | 40,00 | 30,00 | 20,00 |

Fonte: INMET, adaptado pelos autores (2026)

A variação mensal da precipitação provável para diferentes níveis de excedência pode ser observada na Figura 1. Esta figura evidencia que, embora o padrão sazonal seja mantido entre os cenários, com concentração de chuvas entre novembro e janeiro, há redução significativa da magnitude da precipitação nos níveis mais elevados de probabilidade. Esse comportamento é característico do regime climático do Cerrado, no qual a variabilidade intraestacional exerce forte influência sobre a disponibilidade hídrica (Oliveira; Oliveira, 2018).

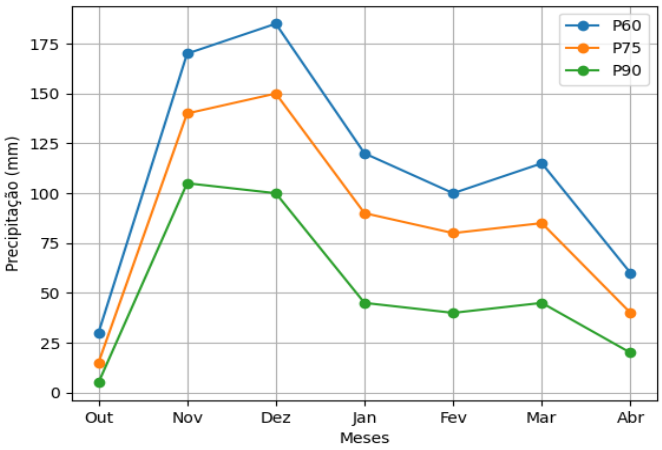



**Figura 1** – Precipitação provável mensal para diferentes níveis de probabilidade de excedência (P60 - P90) em Arinos -MG. Fonte: Os autores (2026)

Do ponto de vista agronômico, essa diferença entre cenários tem implicações diretas no planejamento da irrigação. Em cenários menos conservadores (P60), há maior disponibilidade hídrica, porém com maior risco de não ocorrência, enquanto cenários mais conservadores (P90) garantem maior segurança, mas implicam menor aporte de água ao sistema.

A evapotranspiração da cultura (ETc) apresentou variação sazonal associada ao desenvolvimento da soja, com maiores valores nos meses centrais do ciclo produtivo, coincidindo com as fases reprodutivas. Esse comportamento indica maior demanda hídrica nesses períodos, conforme estabelecido por Allen et al. (1998).

A análise integrada entre precipitação provável e demanda hídrica evidencia que a distribuição temporal das chuvas não acompanha plenamente a necessidade da cultura, especialmente nos meses de transição. Esse resultado reforça que a variabilidade intraestacional da precipitação é determinante para o risco agrícola, mesmo em regiões com totais anuais elevados (Blöschl et al., 2017; IPCC, 2021).

A avaliação do balanço hídrico climatológico no cenário P75 (Tabela 2) indicou ocorrência de deficiência hídrica ao longo do ciclo produtivo, com maiores valores nos meses de outubro, fevereiro e abril, caracterizando períodos críticos para o desenvolvimento da cultura. A partir desses resultados, foi estimada a necessidade de irrigação suplementar, cuja síntese está apresentada na Tabela 3. A lâmina total de irrigação suplementar estimada foi de 142,00 mm no cenário P75, indicando que a precipitação provável não é suficiente para atender à demanda hídrica da cultura ao longo do ciclo.

Tabela 2 – Balanço hídrico climatológico mensal (método de Thornthwaite–Mather) no cenário de precipitação provável com 75% de probabilidade de excedência (P75), considerando capacidade de água disponível de 100 mm, para Arinos–MG.

| Mês | P75 (mm) | ETc (mm) | DEF (mm) |
|---|---|---|---|
| Outubro | 15,00 | 55,78 | 40,78 |
| Novembro | 140,00 | 120,00 | 0,00 |
| Dezembro | 160,00 | 140,00 | 0,00 |
| Janeiro | 90,00 | 107,93 | 17,93 |
| Fevereiro | 80,00 | 115,01 | 35,01 |
| Março | 85,00 | 97,06 | 12,06 |
| Abril | 40,00 | 76,37 | 36,37 |

Fonte: Os autores (2026)

Tabela 3 – Lâmina total de irrigação suplementar estimada (mm) para a cultura da soja em função dos diferentes níveis de probabilidade de excedência (P60, P70, P75, P80 e P90) em Arinos–MG.

| Probabilidade | Irrigação total (mm) |
|---|---|
| P60 | 80,00 |
| P70 | 110,00 |
| P75 | 142,00 |
| P80 | 170,00 |
| P90 | 210,00 |

Fonte: Os autores (2026)

A relação entre os níveis de probabilidade de excedência e a necessidade de irrigação suplementar é apresentada na Figura 2.

A Figura 2 evidencia aumento progressivo da necessidade de irrigação com o aumento da probabilidade de excedência, demonstrando um claro trade-off entre segurança climática e demanda hídrica. Cenários mais conservadores implicam maior necessidade de irrigação, enquanto cenários menos conservadores reduzem essa demanda, porém aumentam o risco de déficit hídrico.

Esse comportamento é consistente com estudos que indicam que a adoção de níveis probabilísticos mais elevados resulta em maior dimensionamento de sistemas de irrigação, visando reduzir o risco de falhas no suprimento hídrico (Fernandes; Heinemann; Paz, 2009).

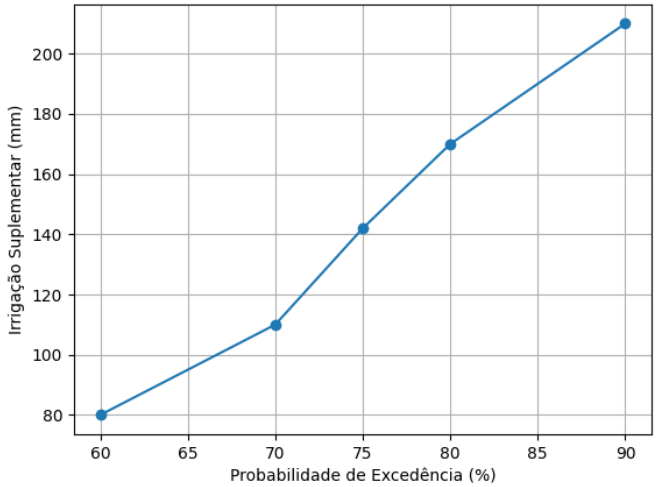



**Figura 2 –** Relação entre probabilidade de excedência e lâmina total de irrigação suplementar da soja em Arinos-MG. Fonte: Os autores (2026)

Do ponto de vista prático, o cenário P75 apresentou equilíbrio entre segurança hídrica e eficiência no uso da água, sendo uma alternativa adequada para o planejamento da irrigação em regiões de clima sazonal. Cenários mais conservadores (P80 e P90) são recomendados em sistemas que exigem maior garantia de produção, enquanto cenários menos conservadores (P60 e P70) podem ser adotados em condições de maior tolerância ao risco.

De forma geral, os resultados demonstram que a escolha do nível de probabilidade de excedência influencia diretamente o planejamento hídrico, afetando tanto a disponibilidade de água quanto a necessidade de irrigação suplementar. A abordagem comparativa adotada neste estudo amplia a compreensão do risco climático e fornece suporte técnico para a tomada de decisão no manejo da irrigação da soja no Cerrado mineiro.

## CONCLUSÕES

A precipitação provável apresentou redução sistemática com o aumento da probabilidade de excedência, influenciando diretamente a disponibilidade hídrica para a cultura.

O balanço hídrico indicou ocorrência de déficits em períodos críticos do ciclo da soja, evidenciando a limitação da precipitação mesmo em condições probabilisticamente seguras.

A necessidade de irrigação suplementar aumentou com o nível de probabilidade, refletindo o trade-off entre segurança climática e demanda hídrica.

O cenário P75 mostrou-se adequado para o planejamento da irrigação, por equilibrar risco climático e uso eficiente da água.

A análise comparativa entre níveis de probabilidade constitui ferramenta eficaz para subsidiar o manejo da irrigação em regiões de clima sazonal.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao IFNMG pelo suporte institucional, ao CNPq pela concessão de bolsa de iniciação científica e ao INMET pela disponibilização dos dados meteorológicos.

## REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements*. Rome: FAO, 1998. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56).

BLÖSCHL, G. et al. Changing climate shifts timing of European floods. *Science*, v. 357, n. 6351, p. 588–590, 2017. DOI: https://doi.org/10.1126/science.aan2506.

FERNANDES, D. S.; HEINEMANN, A. B.; PAZ, R. L. F. Precipitação provável para o Estado de Goiás. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 13, n. 4, p. 445–453, 2009. DOI: https://doi.org/10.1590/S1415-43662009000400010.

GOMIDE, R. L.; ALBUQUERQUE, P. E. P. *Manejo da irrigação: princípios e aplicações*. Brasília: Embrapa, 2008.

IPCC. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

OLIVEIRA, J. Â. M.; OLIVEIRA, C. M. M. Balanço hídrico climatológico e classificação climática para o município de Arinos – MG. Revista Brasileira de Agricultura Irrigada, v. 12, n. 6, p. 3021 – 3027, 2018. DOI: 10.7127/rbai.v12n600901

STAGGE, J. H. et al. Candidate distributions for climatological drought indices. *International Journal of Climatology*, v. 35, n. 13, p. 4027–4040, 2015. DOI: https://doi.org/10.1002/joc.4267.

THOM, H. C. S. A note on the gamma distribution. *Monthly Weather Review*, v. 86, n. 4, p. 117–122, 1958. DOI: https://doi.org/10.1175/1520-0493(1958)086<0117:ANOTGD>2.0.CO;2.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, v. 38, n. 1, p. 55–94, 1948.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. *The water balance*. Centerton: Drexel Institute of Technology, 1955.