

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

Eficiência de *Bacillus subtilis*, flutriafol e sua combinação no manejo de *Hemileia vastatrix* em cultivares de café arábica com diferentes níveis de resistência.

Gabriel Singulano Filho
Magister Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2026**

GABRIEL SINGULANO FILHO

Eficiência de *Bacillus subtilis*, flutriafol e sua combinação no manejo de *Hemileia vastatrix* em cultivares de café arábica com diferentes níveis de resistência.

Dissertação Mestrado Profissional
apresentada à Universidade Federal de
Viçosa, como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em Defesa
Sanitária Vegetal (Profissional), para
obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Wânia dos Santos Neves

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2026**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

S617e
2026
Singularano Filho, Gabriel, 1965-
Eficiência de *Bacillus subtilis*, flutriafol e sua combinação
no manejo de *Hemileia vastatrix* em cultivares de café arábica
com diferentes níveis de resistência / Gabriel Singularano Filho. –
Viçosa, MG, 2026.

1 dissertação eletrônica (24 f.): il.

Inclui apêndice.

Orientador: Wânia dos Santos Neves.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Entomologia, 2026.

Referências bibliográficas: f. 20-23.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2026.368>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Café - Doenças e pragas - Controle biológico. 2. Fungos
fitopatogênicos - Controle biológico. 3. *Hemileia vastatrix* -
Controle biológico. 4. *Hemileia vastatrix* - Efeito dos triazóis
Coffea arábica. 5. Controle biológico. 6. Controle químico.
7. Resistência genética. I. Neves, Wânia dos Santos, 1973-.
II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de
Entomologia. Programa de Pós-Graduação em Defesa Sanitária
Vegetal. III. Título.

CDD 22. ed. 633.73996

GABRIEL SINGULANO FILHO

Eficiência de *Bacillus subtilis*, flutriafol e sua combinação no manejo de *Hemileia vastatrix* em cultivares de café arábica com diferentes níveis de resistência.

Dissertação Mestrado Profissional
apresentada à Universidade Federal de
Viçosa, como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em Defesa
Sanitária Vegetal (Profissional), para obtenção
do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 1 de abril de 2026.

Assentimento:

Gabriel Singulano Filho
Autor

Wânia dos Santos Neves
Orientador

Essa dissertação mestrado profissional foi assinada digitalmente pelo autor em 15/06/2026 às 17:11:21 e pelo orientador em 29/06/2026 às 22:55:10. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **TGGV.ESQI.GQSN** e clique no botão 'Validar documento'.

Ao meu filho Diogo Fernandes Barreto Singulano que o seu futuro se espelhe na
agricultura.

AGRADECIMENTOS

A DEUS.

À minha família.

À minha orientadora Wânia dos Santos Neves e meu coorientador Douglas Ferreira Parreiras por todo apoio no desenvolvimento do projeto.

À FAPEMIG.

Aos bolsistas Victor e Antônio pelo auxílio para coleta do material em campo.

À EMATER-MG, através da sua diretoria por ter me proporcionado a oportunidade de realizar o mestrado, com a bolsa de estudos e aos colegas de trabalho pela oportunidade de aprendizado ao longo dos anos, em especial aos colegas Deonir Luiz D'Alpai e Caio Moraes de Alcântara Barbosa pelo apoio na construção do meu trabalho.

À Universidade Federal de Viçosa pela oportunidade de realizar a pós-graduação.

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

RESUMO

FILHO, Gabriel Singulano, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, abril de 2026. **Eficiência de *Bacillus subtilis*, flutriafol e sua combinação no manejo de *Hemileia vastatrix* em cultivares de café arábica com diferentes níveis de resistência..** Orientador: Wânia dos Santos Neves.

A ferrugem do cafeeiro, causada por *Hemileia vastatrix*, é a doença que mais compromete a produção de café no mundo, com perdas que podem alcançar 35 a 50% da safra. O controle químico, embora eficaz, eleva custos, pressiona o meio ambiente e enfrenta restrições regulatórias, o que estimula a busca por alternativas biológicas. O objetivo foi avaliar a eficiência de *Bacillus subtilis* (linhagem QST 713), do fungicida flutriafol e da combinação de ambos no manejo da ferrugem em três cultivares de café arábica com níveis distintos de resistência genética: Catiguá MG2 (resistente), Catucaiam 24/137 (moderadamente resistente) e Catuaí Vermelho IAC 144 (suscetível). O experimento foi conduzido em campo no município de Paula Cândido, Zona da Mata de Minas Gerais, em blocos casualizados com arranjo fatorial $3 \times 2 \times 2 \times 2$, sendo três cultivares, dois níveis do fator biológico (com e sem *B. subtilis*), dois níveis do fator químico (com e sem flutriafol) e duas formas de aplicação dos produtos (foliar ou drench) com três repetições cada. A combinação “sem biológico e sem químico” em cada cultivar foi considerada a testemunha absoluta dentro do fatorial. A severidade foi avaliada por análise de imagem digital e os dados, após transformação por $(x + 0,5)$, submetidos à análise de variância e ao teste de Scott-Knott (5%). Não houve diferença significativa entre os tratamentos (biológico, químico e combinado), mas as três cultivares diferiram entre si ($p < 0,0001$): Catuaí IAC 144 apresentou severidade média de 6,20%, Catucaiam 24/137 registrou 2,16% e Catiguá MG2 0,38%. A análise não paramétrica de Kruskal-Wallis confirmou os resultados. O período experimental foi marcado por estiagem prolongada (54 mm acumulados entre abril e setembro de 2024), o que pode ter reduzido a pressão do patógeno e limitado a diferenciação entre os tratamentos. A resistência genética foi o fator preponderante no manejo da ferrugem nas condições testadas, com separação clara entre os três níveis de resistência.

Palavras-chave: Palavras-chave: Coffea arábica; Controle biológico; Controle químico; Resistência genética.

ABSTRACT

FILHO, Gabriel Singulano, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, April, 2026.
Efficiency of *Bacillus subtilis*, flutriafol and their combination in the management of *Hemileia vastatrix* in Arabica coffee cultivars with different levels of resistance... Adviser: Wânia dos Santos Neves.

Coffee leaf rust, caused by *Hemileia vastatrix*, is the disease that most compromises coffee production worldwide, with losses that can reach 35 to 50% of the harvest. Chemical control, although effective, increases costs, puts pressure on the environment, and faces regulatory restrictions, which stimulates the search for biological alternatives. This work evaluated the efficiency of *Bacillus subtilis* (strain QST 713), flutriafol fungicide, and the combination of both in the management of rust in three arabica coffee cultivars with different levels of genetic resistance: Catiguá MG2 (resistant), Catucaiam 24/137 (moderately resistant), and Catuaí Vermelho IAC 144 (susceptible). The experiment was conducted in the field in Paula Cândido, Zona da Mata of Minas Gerais, in a randomized block design with a $3 \times 2 \times 2 \times 2$ factorial arrangement consisting of three cultivars, two levels of the biological factor (with and without *B. subtilis*), two levels of the chemical factor (with and without flutriafol), and two application methods (foliar spraying or drench), with three replications each. The combination of 'without biological and without chemical' for each cultivar was considered the absolute control within the factorial. Severity was assessed by digital image analysis, and the data, after transformation by $(x + 0.5)$, were subjected to analysis of variance and the Scott-Knott test (5%). There was no statistical difference among treatments (biological, chemical, and combined), but the three cultivars differed from each other ($p < 0.0001$): Catuaí IAC 144 showed an average severity of 6.20%, Catucaiam 24/137 recorded 2.16%, and Catiguá MG2 0.38%. The non-parametric Kruskal-Wallis analysis confirmed the results. The experimental period was marked by prolonged drought (54 mm accumulated between April and September 2024), which may have reduced pathogen pressure and limited differentiation among treatments. Genetic resistance was the predominant factor in rust management under the tested conditions, with clear separation among the three resistance levels.

Keywords: Keywords: *Coffea arabica*; Biological control; Chemical control; Genetic resistance.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
2 OBJETIVOS	10
2.1 Objetivo geral	10
2.2 Objetivos específicos	10
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	10
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	12
5 CONCLUSÕES	19
REFERÊNCIAS.....	20
MATERIAL SUPLEMENTAR.....	24

1 INTRODUÇÃO

O cafeeiro tem origem no continente africano, contudo, seu cultivo inicial foi estabelecido no Iêmen, localizado na porção ocidental da Península Arábica. O próprio nome “café” tem origem árabe: a planta é conhecida como *Kaweh* e a bebida foi denominada *Kahwah* ou *Cahue*, que significa “Força”. O café (*Coffea spp.*) é a segunda bebida mais consumida no planeta, superado pela água, e movimenta uma cadeia produtiva que envolve cerca de 70 países. A produção mundial atingiu 176,2 milhões de sacas em 2025 (OIC, 2025). O Brasil é o maior produtor e exportador global, responsável por cerca de 31% desse volume, com uma safra de 54,62 milhões de sacas de 60 kg de café beneficiado no mesmo ano, das quais 65,4% correspondem a *Coffea arabica* e 34,6% a *Coffea canephora* (CONAB, 2025). Em 2025, as exportações brasileiras de café somaram 40,4 milhões de sacas, gerando receita de US\$ 15,5 bilhões (CNC, 2026), com o produto destinado a 122 países, tendo como principais destinos principais a Alemanha (5,4 milhões de sacas), Estados Unidos (5,3 milhões), Itália (3,1 milhões) e Japão (2,38 milhões) (CECAFE, 2026).

Minas Gerais ocupa posição de destaque no cenário nacional. O estado produziu 25,75 milhões de sacas em 2025, o equivalente a 47,1% da safra brasileira (SEAPA, 2026). O café respondeu por 48,3% do valor das exportações agrícolas mineiras, com cerca de US\$ 5,5 bilhões, perdendo apenas para o minério de ferro na pauta de exportações do estado (SEDE, 2026). Para além do valor comercial, a cafeicultura envolve cerca de 300 mil famílias diretamente (IBGE, 2022), conferindo ao café papel relevante na geração de emprego e renda em municípios rurais.

O maior entrave fitossanitário à cafeicultura mundial é a ferrugem do cafeeiro, causada pelo fungo biotrófico *Hemileia vastatrix*. Trata-se de uma doença policíclica, na qual os uredospóros produzidos na face abaxial das folhas constituem a fonte de inóculo, com ciclos variando de 20 a 30 dias sob condições de alta umidade e temperaturas entre 20 °C e 25 °C (Talhinhas et al., 2017). A ferrugem está distribuída nas regiões cafeeiras do Brasil, tanto nas áreas de *C. arabica* quanto de *C. canephora* (Moraes et al., 2011; Sera et al., 2022), e pode causar perdas de 35 a 50% na produção, em cultivares suscetíveis, se nenhuma medida de controle for adotada (Toniutti et al., 2017; Zambolim, 2016).

O manejo convencional da ferrugem apoia-se no uso de fungicidas, com resultados reconhecidos em cultivares suscetíveis. Capucho et al. (2013)

demonstraram que a aplicação de fungicidas triazóis, como o futriafol, via solo (*drench*) é eficaz no controle da ferrugem do cafeeiro, com reduções significativas da severidade da doença e ganhos de produtividade; estudos mais recentes, contudo, têm relatado redução progressiva da eficácia de fungicidas do grupo dos triazóis em diferentes regiões cafeeiras (Zambolim, 2016; Capucho et al., 2011). Além disso, o uso intensivo de agrotóxicos eleva os custos de produção, contribui para o desequilíbrio do agrossistema e coloca em risco a saúde de trabalhadores e consumidores (Zambolim, 2016). Ao mesmo tempo, a legislação europeia para importação de produtos agrícolas tem se tornado progressivamente mais restritiva em relação a resíduos de agrotóxicos, e a demanda por cafés sustentáveis ou orgânicos cresce em torno de 20% ao ano, com volume estimado de 7,9 milhões de sacas (Data Bridge, 2024). Os principais continentes produtores de café orgânico são a África (330.000 ha) e a América Latina (268.000 ha), e no Brasil apenas 0,03% da área em café é destinada ao cultivo orgânico, embora no mundo essa proporção alcance 8,5%. Esse cenário estimula a busca por alternativas ao controle químico convencional e novas formas de produção (Machado, 2023).

Nesse contexto, o controle biológico com *Bacillus subtilis* desponta como alternativa promissora. *Bacillus subtilis* é uma bactéria gram-positiva, aeróbica facultativa, em formato de bastonete, encontrada no solo em associação com raízes de plantas (Bettiol et al., 1994). Sua capacidade de formar endospóros confere tolerância a condições adversas como altas temperaturas, dessecação e radiação ultravioleta, favorecendo sua sobrevivência no ambiente (Bettiol; Morandi, 2009). Trabalhos clássicos como o de Bettiol et al. (1994) já evidenciaram o potencial de produtos à base de *B. subtilis* no controle da ferrugem, e estudos posteriores reforçaram esse potencial em cafeeiro (Cacefo; Araújo, 2015; Salazar-Navarro et al., 2024). Além disso, foram observadas diferenças no nível de controle entre cultivares tratadas com produtos biológicos (Cacefo; Araújo, 2015). Entretanto, a literatura também registra situações em que o uso de *B. subtilis* não apresentou resultados satisfatórios em campo, com interferências das condições climáticas (Reis et al., 2022).

A questão se torna mais complexa diante das mudanças climáticas. Alterações nos padrões de temperatura e precipitação têm modificado o ciclo de vida do fungo e a fisiologia das plantas, reduzindo a previsibilidade dos métodos de controle (Alfonsi, 2017; Aparecido et al., 2025). Estiagens prolongadas e amplitudes térmicas

acentuadas criam condições que podem tanto favorecer quanto inibir o desenvolvimento da ferrugem, conforme a combinação específica de fatores de cada safra.

Apesar do interesse no uso de produtos biológicos na cafeicultura, ainda são escassos os estudos de campo que comparem, simultaneamente, o desempenho do controle biológico, do químico e de sua combinação em cultivares com diferentes níveis de resistência genética à ferrugem. A maior parte dos trabalhos avalia esses fatores isoladamente, o que limita a compreensão da interação entre método de controle, genética da planta e condições ambientais. Preencher essa lacuna é o que motiva o presente trabalho.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a eficiência do *Bacillus subtilis* (linhagem QST 713), do flutriafol e da combinação entre ambos no manejo da ferrugem causada pelo fungo *Hemileia vastatrix* em cultivares de café arábica com níveis distintos de resistência genética, sob condições de campo na região da Zona da Mata do estado de Minas Gerais, Microrregião de Viçosa.

2.2 Objetivos específicos

- Comparar a severidade da ferrugem em cultivares suscetível (Catuaí Vermelho IAC 144), moderadamente resistente (Catucaiam 24/137) e resistente (Catiguá MG2) sob os diferentes tratamentos de controle de ferrugem.
- Analisar a interação entre tipo de tratamento, resistência genética da cultivar e condições climáticas observadas durante o período experimental.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na propriedade Sítio Café da Cachoeira, município de Paula Cândido, Zona da Mata de Minas Gerais (20°48'51,80" S; 42°58'34,17" O), a uma altitude média de 750 metros. A área total da lavoura compreende 0,65

hectares com 3.300 plantas, das quais 0,089 hectares (450 plantas) foram utilizados no experimento. As condições climáticas foram acompanhadas por meio da estação meteorológica da EPAMIG Sudeste (Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais), instalada a 1.200 metros da área experimental, na Fazenda Boa Safra (20°48'04" S; 42°58'54,56" O), zona rural de Paula Cândido. Foram registrados dados mensais de temperatura máxima e mínima, umidade relativa do ar e precipitação pluviométrica.

O delineamento adotado foi de blocos casualizados com arranjo fatorial $3 \times 2 \times 2 \times 2$, sendo três cultivares, dois níveis do fator biológico (com e sem *B. subtilis*), dois níveis do fator químico (com e sem flutriafol) e duas formas de aplicação dos produtos (foliar ou *drench*) totalizando 24 combinações de tratamento em três blocos. Dentre essas combinações, a condição “sem biológico e sem químico” corresponde ao tratamento controle (testemunha absoluta), presente em cada cultivar e em cada bloco, permitindo avaliar o efeito dos fatores de controle em relação à ausência de intervenção. Foram utilizadas três cultivares de café arábica com níveis distintos de resistência genética à ferrugem (Tabela 1). Cada parcela útil continha 6 plantas para avaliação em cada tratamento, 6 plantas-testemunha e 5 plantas de bordadura entre tratamentos e nas extremidades. O número de três blocos (repetições) foi definido considerando a disponibilidade de área experimental com as três cultivares em lavoura comercial, seguindo a prática adotada em ensaios de campo com cafeeiro em propriedades rurais (Reis et al., 2022); reconhece-se que um maior número de repetições aumentaria o poder estatístico do ensaio, e essa limitação é considerada na interpretação dos resultados.

Tabela 1 - Cultivares, nível de resistência e números das parcelas.

CULTIVAR	RESISTÊNCIA	Nº DA PARCELA
Catuaí IAC 144	Suscetível	5-20-1
Catucaiam 24/137	Moderada	7-14-6
Catiguá MG2	Resistente	18-16-8

Nota: N° da parcela refere-se aos três números de identificação das parcelas correspondentes aos três blocos (repetições) de cada cultivar na área experimental.

Os tratamentos consistiram na aplicação de: (i) *B. subtilis* na dosagem de 2,0 L ha⁻¹, via pulverização foliar com volume de calda de 200 L ha⁻¹, utilizando pulverizador costal elétrico com bico em leque; (ii) flutriafol na dosagem de 4,0 L ha⁻¹,

aplicado via solo (*drench*) na projeção da saia das plantas, com volume de calda de 200 L ha⁻¹; (iii) a combinação de ambos nas mesmas dosagens e formas de aplicação; e (iv) controle (sem aplicação). Todas as parcelas receberam calagem e adubação de acordo com análise de solo, além dos tratos culturais de rotina (desbrota, controle de plantas espontâneas com roçadeira e herbicida à base de glifosato).

A severidade da ferrugem foi avaliada por meio de coleta de amostras foliares no 3º e 4º par de folhas, no terço médio e em ambos os lados das plantas, totalizando 60 folhas por tratamento. A coleta foi realizada no dia 30 de maio de 2025, nas plantas das parcelas úteis de cada tratamento. O grau de severidade foi quantificado por análise de imagem digital, na linguagem Python (Python Software Foundation, 2024). As análises estatísticas foram realizadas no software R (R Core Team, 2024). Os dados de severidade apresentaram distribuição assimétrica, com presença de valores nulos (5,1% das observações) e heterogeneidade de variâncias entre cultivares (teste de Levene, $p < 0,001$). Para viabilizar a análise paramétrica, procedeu-se à transformação dos dados pela função $\sqrt{x + 0,5}$, conforme recomendado para dados de proporção com presença de zeros (Bartlett, 1936; Anscombe, 1948). A transformação reduziu o coeficiente de variação de 146% para 50%, atendendo de forma mais adequada aos pressupostos de normalidade e homogeneidade de variâncias exigidos pela ANOVA. Os dados transformados foram submetidos à análise de variância em esquema fatorial $3 \times 2 \times 2 \times 2$ em blocos casualizados, e as médias comparadas pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade, mais adequado quando o número de tratamentos é elevado, por não apresentar ambiguidade na formação de grupos (Borges; Ferreira, 2003). Adicionalmente, como forma de validação, aplicou-se o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis aos dados originais (sem transformação), seguido de comparações pareadas de Mann-Whitney com correção de Bonferroni. Essa estratégia combinada, com análise paramétrica aplicada a dados transformados e análise não paramétrica conduzida sobre dados originais, visou aumentar a robustez das conclusões.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A avaliação de alternativas ao controle da ferrugem do cafeeiro é essencial para comparar a severidade da doença sob diferentes estratégias de manejo, incluindo o tratamento convencional e o uso de produtos biológicos, considerando

ainda a resposta de cultivares com distintos níveis de resistência ao fungo *Hemileia vastatrix*.

A análise de variância (Tabela S1) não revelou interação significativa entre os fatores cultivar, biológico e químico, tanto para as interações duplas (cultivar × biológico, $p = 0,418$; cultivar × químico, $p = 0,698$; biológico × químico, $p = 0,964$) quanto para a interação tripla ($p = 0,863$). Diante da ausência de interação, os efeitos dos fatores foram interpretados isoladamente. O fator cultivar exerceu efeito significativo sobre a severidade da ferrugem ($F = 40,50$; $p < 0,001$), ao passo que os fatores biológico ($F = 0,42$; $p = 0,52$) e químico ($F = 0,50$; $p = 0,48$) não apresentaram diferença significativa. O coeficiente de variação foi de 50,33% na escala transformada.

O teste de Scott-Knott (Tabela 2) separou as três cultivares em grupos distintos: Catiguá MG2 (resistente), com severidade média de 0,38%, no grupo a; Catucaiam 24/137 (moderadamente resistente), com 2,16%, no grupo b; e Catuaí IAC 144 (suscetível), com 6,20%, no grupo c.

Tabela 2 - Teste de Scott-Knott para severidade da ferrugem por cultivar (dados transformados).

Cultivar	Sev. média (%)	Média transf.
Catiguá MG2 (R)	0,38 a	0,918
Catucaiam 24/137 (MR)	2,16 b	1,486
Catuaí IAC 144 (S)	6,20 c	2,206

Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si (Scott-Knott, $p \leq 0,05$). R = resistente; MR = moderadamente resistente; S = suscetível. Fonte: dados da pesquisa.

A análise não paramétrica de Kruskal-Wallis confirmou o efeito do fator cultivar ($H = 56,76$; $p < 0,0001$) e a ausência de efeito dos fatores biológico ($H = 0,27$; $p = 0,60$) e químico ($H = 1,84$; $p = 0,17$). As comparações pareadas de Mann-Whitney com correção de Bonferroni indicaram diferença entre Catuaí IAC 144 e Catiguá MG2 ($p < 0,001$) e entre Catucaiam 24/137 e Catiguá MG2 ($p < 0,001$), com diferença marginal entre Catuaí IAC 144 e Catucaiam 24/137 ($p = 0,052$).

O principal achado deste experimento indica que, nas condições de campo avaliadas, a resistência genética da cultivar foi o fator determinante para a severidade da ferrugem do cafeeiro, enquanto os tratamentos com *B. subtilis*, flutriafol e a combinação de ambos não diferiram significativamente do controle. As duas análises convergem ao identificar o fator cultivar como determinante e ao descartar efeitos

significativos dos tratamentos biológico e químico. Cabe registrar que o Mann-Whitney com correção conservadora de Bonferroni indicou diferença marginal entre Catuaí IAC 144 e Catucaiam 24/137 ($p = 0,052$), enquanto o Scott-Knott, que é menos conservador, separou-as em grupos distintos. Essa pequena divergência é esperada em razão dos diferentes critérios de controle do erro tipo I dos dois testes, e não compromete a conclusão central.

Com a transformação dos dados por $\sqrt{(x + 0,5)}$, as três cultivares ficaram em grupos distintos no teste de Scott-Knott: Catiguá MG2 (a), Catucaiam 24/137 (b) e Catuaí IAC 144 (c). A cultivar suscetível apresentou severidade média 16 vezes superior à da resistente e três vezes superior à da moderadamente resistente. A transformação reduziu o coeficiente de variação de 146% para 50%, melhorando o poder discriminatório do teste e revelando a separação entre os três níveis de resistência, resultado que faz mais sentido do ponto de vista biológico.

A ausência de efeito dos tratamentos pode estar associada às condições climáticas atípicas do período experimental. A estiagem prolongada de abril a setembro de 2024 (54 mm em seis meses) e as temperaturas elevadas possivelmente inibiram a infecção e a disseminação dos uredospóros de *H. vastatrix*, uma vez que o fungo depende de umidade alta e temperaturas entre 20 °C e 25 °C para completar seu ciclo (Talhinhas et al., 2017). Com níveis gerais de severidade baixos (média geral de 2,91%), a capacidade de diferenciação entre os tratamentos ficou comprometida. Na prática, a pressão do patógeno foi insuficiente para que os tratamentos demonstrassem vantagem sobre a testemunha.

Resultados similares foram reportados por Reis et al. (2022), que não encontraram efeito satisfatório de *B. subtilis* no controle da ferrugem em condições de campo e atribuíram isso à interferência de fatores climáticos. Esses autores também sugerem que o tempo de avaliação pode ser insuficiente quando se trabalha com biológicos, pois a colonização dos microrganismos e o equilíbrio do sistema demandam períodos mais longos de observação. No presente estudo, o período de oito meses de avaliação pode ter sido curto para captar o efeito acumulativo do tratamento biológico.

Os resultados de severidade de *H. vastatrix* evidenciam um gradiente claro e consistente entre as cultivares, alinhado ao respectivo nível de resistência genética. Mesmo sob condições de baixa pressão do patógeno, a resistência manteve sua expressão, reforçando o papel da escolha da cultivar como pilar do manejo integrado

de doenças (Zambolim, 2016; Zambolim et al., 2024). A cultivar Catiguá MG2, classificada como resistente (R), apresentou severidade média extremamente baixa (0,38%), diferindo estatisticamente das demais. Esse desempenho corrobora descrições da literatura que apontam essa cultivar, desenvolvida pela EPAMIG a partir do cruzamento entre Catuaí Amarelo IAC 86 e o Híbrido de Timor UFV 440-10, como portadora de elevada resistência às raças prevalecentes de *H. vastatrix* no Brasil (Carvalho et al., 2017; Pereira et al., 2019). A baixa severidade observada indica alta eficiência dos mecanismos de defesa, possivelmente associados tanto à presença de genes específicos de resistência quanto a respostas fisiológicas mais rápidas e eficazes na contenção da colonização fúngica (Berny Mier y Teran et al., 2025).

A cultivar Catucaiam 24/137, por sua vez, apresentou severidade intermediária (2,16%), em relação a cultivar Catiguá MG2 e a cultivar Catuaí IAC 144. Esse comportamento é coerente com sua classificação como moderadamente resistente e indica que o gradiente genético de resistência se expressa de forma proporcional na severidade observada. Tal padrão é característico de resistência quantitativa, na qual há redução na taxa de progresso da doença, embora sem impedir completamente a infecção. Já a cultivar Catuaí IAC 144, suscetível (S), exibiu a maior severidade (6,20%), refletindo a ausência ou baixa eficiência de mecanismos de resistência. Nesse caso, o patógeno encontra menor restrição ao estabelecimento, colonização e esporulação, resultando em maior intensidade da doença (Bolívar-González et al., 2025).

As condições climáticas exerceram ainda um efeito indireto. A boa nutrição realizada nos tratamentos, somada à baixa carga pendente (decorrente do mau pegamento da florada causado pela seca), pode ter favorecido a expressão da resistência das cultivares. Meirelles e Leite (2009) documentam que o estado nutricional e a carga de frutos influenciam a capacidade de resposta da planta ao patógeno: plantas bem nutridas e com pouca carga pendente dispõem de mais energia para mecanismos de defesa, como a síntese de compostos fenólicos, proteínas relacionadas à patogênese e a ativação de enzimas antioxidantes. Adicionalmente, a própria limitação hídrica que comprometeu o pegamento da florada pode ter restringido eventos de infecção por *H. vastatrix* que dependem de elevada umidade (Zambolim, 2002).

O coeficiente de variação (CV) de 50,33% na escala transformada, embora acima do intervalo considerado ideal para experimentos de campo (maior que 30%),

é coerente com a natureza do fenômeno avaliado (Pimentel - Gomes, 2009). Ensaio de severidade de doenças foliares em campo apresentam CVs caracteristicamente altos, uma vez que a distribuição do inóculo é espacialmente heterogênea e a severidade varia entre folhas de uma mesma planta, entre plantas da mesma parcela e entre blocos (Kranz, 1988). Esse efeito é particularmente acentuado quando a pressão da doença é baixa, como no presente estudo (média geral de 2,91%), pois muitas observações se concentram próximas de zero, inflando a variabilidade relativa. Valores de CV semelhantes ou superiores foram reportados em estudos de campo com ferrugem do cafeeiro (Capucho et al., 2011). É importante ressaltar que, apesar do CV elevado, o teste F detectou diferença altamente significativa entre cultivares ($p < 0,001$), e os resultados foram confirmados pela análise não paramétrica, o que indica que a variabilidade não comprometeu a capacidade de discriminação do fator mais relevante.

Outro aspecto a considerar é o cenário de crescente pressão de seleção exercida pelo uso contínuo de fungicidas do grupo dos triazóis sobre populações de *H. vastatrix*. Embora a resistência do fungo a fungicidas não tenha sido avaliada neste estudo, relatos recentes indicam redução progressiva da eficácia de triazóis no controle da ferrugem em diversas regiões cafeeiras, possivelmente associada à seleção de raças fisiológicas com menor sensibilidade a esse grupo químico (Zambolim, 2016). A identificação de mais de 50 raças fisiológicas de *H. vastatrix* em escala mundial, sendo 16 raças já caracterizadas no Brasil (Zambolim et al., 2024), evidencia a alta variabilidade genética do patógeno, e o uso repetido de um mesmo mecanismo de ação cria condições para que linhagens menos sensíveis sejam selecionadas. Esse cenário reforça a importância de estratégias integradas que combinem resistência genética, rotação de mecanismos de ação e agentes de controle biológico, reduzindo a pressão de seleção sobre o patógeno.

A ausência de diferença entre tratamentos neste estudo não invalida o potencial do controle biológico, mas indica que sua avaliação depende de condições de pressão do patógeno suficientes para discriminar os efeitos, bem como de períodos de observação mais longos. Assim, estudos futuros conduzidos em safras com maior intensidade da doença, associadas a condições ambientais mais favoráveis à infecção e a avaliações sequenciais ao longo de diferentes ciclos, tendem a fornecer evidências mais robustas sobre a eficiência desse agente no manejo da ferrugem.

Os dados climáticos de 2024 (Tabela 3) revelam distribuição irregular das chuvas, com implicações importantes para o ciclo do patógeno e a fisiologia das plantas, conforme detalhado a seguir.

Tabela 3 - Condições climáticas médias mensais em 2024, estação EPAMIG-CTZM, Paula Cândido, MG.

Mês	T. máx. (°C)	T. mín. (°C)	UR máx. (%)	Precipitação (mm)
Janeiro	28,75	20,28	96,65	419,5
Fevereiro	28,87	19,97	97,32	238,5
Março	29,06	20,62	97,45	238,5
Abril	28,32	17,80	97,77	20,0
Maiο	27,91	15,82	97,87	0,0
Junho	26,14	12,09	98,57	27,0
Julho	26,14	12,19	98,00	0,0
Agosto	26,85	12,36	96,77	0,0
Setembro	29,84	15,06	93,27	7,0
Outubro	27,84	17,69	95,19	143,5
Novembro	26,99	18,41	96,23	171,5
Dezembro	27,76	19,49	96,81	300,5

Fonte: EPAMIG Sudeste, Viçosa, MG.

O período vegetativo do cafeeiro apresenta exigências climáticas e nutricionais que variam ao longo do ano, com fases de formação, indução e maturação das gemas florais, abertura da florada e posterior desenvolvimento dos frutos, cada uma demandando condições específicas para que a produção seja satisfatória (Meirelles; Leite, 2009).

No primeiro trimestre de 2024 (Tabela 3), a precipitação concentrou-se entre janeiro e março (896,5 mm), seguida de estiagem prolongada entre abril e setembro, com apenas 54 mm acumulados nesses seis meses. O período de estiagem apresentou temperaturas máximas médias de 27,3 °C e mínimas de 14,2 °C, configurando amplitude térmica acentuada. A combinação de seca prolongada e temperaturas elevadas interferiu na fisiologia das plantas, uma vez que essas condições aumentam o déficit de pressão de vapor e promovem o fechamento estomático, afetando diretamente as trocas gasosas (Moraes et al., 2011). Considerando que *H. vastatrix* penetra preferencialmente pelos estômatos, a redução da abertura estomática sob estresse hídrico pode limitar a infecção inicial do

patógeno, influenciando seu estabelecimento e, conseqüentemente, a severidade da doença (Zambolim, 2022). Ademais, o período de estiagem coincidiu com as fases de indução e formação das gemas florais, resultando em baixo pegamento da florada e queda na expectativa de produção.

No ano agrícola 2024/2025 (Tabela 4), as condições climáticas foram mais favoráveis ao desenvolvimento vegetativo do cafeeiro, com melhor distribuição de chuvas e menor amplitude térmica, o que proporcionou maior vigor das plantas. Embora a umidade mais elevada tenda a favorecer a germinação dos urediniósporos e a infecção por *H. vastatrix* (Zambolim, 2022), esse cenário, associado à baixa carga pendente decorrente da safra anterior prejudicada, pode ter favorecido a expressão da resistência genética. Assim, mesmo com condições potencialmente favoráveis à infecção, os mecanismos de defesa das cultivares parecem ter sido mais eficientes na contenção da colonização do patógeno, resultando em menor severidade da doença (Meirelles; Leite, 2009).

Tabela 4 - Condições climáticas no ano agrícola 2024/2025, estação EPAMIG-CTZM.

Mês	T. máx. (°C)	T. mín. (°C)	UR máx. (%)	UR mín. (%)	Precipitação (mm)
Julho	26,14	12,19	98,00	48,26	0,0
Agosto	26,85	12,36	96,77	37,87	0,0
Setembro	29,84	15,06	93,27	35,07	7,0
Outubro	27,84	17,69	95,19	52,68	143,5
Novembro	26,99	18,41	96,23	54,90	171,5
Dezembro	27,76	19,49	96,81	59,90	300,5
Janeiro	28,61	20,03	97,10	54,50	297,8
Fevereiro	30,25	18,81	97,35	45,90	44,2
Março	26,70	19,30	96,45	54,80	108,6
Abril	26,10	18,20	96,97	62,63	70,0
Mai	25,88	14,49	97,61	54,45	2,6
Junho	23,74	12,78	97,26	56,06	29,8

Fonte: EPAMIG Sudeste, Viçosa, MG.

5 CONCLUSÕES

A resistência genética é o fator determinante no manejo da ferrugem do cafeeiro nas condições avaliadas, apresentando eficácia superior e independente de tratamentos químicos ou biológicos.

As cultivares testadas apresentam gradiente claro de severidade que confirma suas classificações genéticas: suscetível (Catuaí IAC 144), moderadamente resistente (Catucaiam 24/137) e resistente (Catiguá MG2).

O controle biológico com *B. subtilis* (linhagem QST 713), o controle químico com flutriafol e a combinação de ambos não apresentam diferença estatisticamente significativa em relação à testemunha sem aplicação, nas condições experimentais avaliadas.

As condições climáticas atípicas, caracterizadas por estiagem prolongada e altas temperaturas durante o período experimental, constituem fatores limitantes que reduzem a pressão de inóculo de *H. vastatrix*, dificultando a diferenciação da eficiência entre os métodos de controle.

REFERÊNCIAS

- ALFONSI, W. M. V. Vulnerabilidade do cafeeiro arábica à ferrugem (*Hemileia vastatrix*) em cenários de mudanças climáticas. 2017. 176 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.
- ANSCOMBE, F. J. The transformation of Poisson, binomial and negative-binomial data. *Biometrika*, v. 35, n. 3/4, p. 246-254, 1948.
- APARECIDO, L. E. O. et al. Future climate suitability of *Hemileia vastatrix* in arabica coffee under CMIP6 scenarios. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, v. 105, n. 1, p. 394-421, 2025.
- BARTLETT, M. S. The square root transformation in analysis of variance. Supplement to the *Journal of the Royal Statistical Society*, v. 3, n. 1, p. 68-78, 1936.
- BETTIOL, W.; MORANDI, M. A. B. Biocontrole de doenças de plantas: uso e perspectivas. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2009. 341 p.
- BETTIOL, W.; SAITO, M. L.; BRANDÃO, M. S. B. Controle da ferrugem do cafeeiro com produtos à base de *Bacillus subtilis*. *Summa Phytopathologica*, v. 20, n. 2, p. 119-123, 1994.
- BERNY MIER Y TERAN, J. C. et al. Global *Coffea arabica* variety trials reveal genotype-by-environment interactions in resistance to coffee leaf rust (*Hemileia vastatrix*). *Frontiers in Plant Science*, v. 16, p. 1583595, 2025.
- BOLÍVAR-GONZÁLEZ, A. et al. Differential gene expression in response to *Hemileia vastatrix* in chemically mutagenized coffee plants (*Coffea arabica* L. var. Catuai). *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, v. 160, n. 3, 2025.
- BORGES, L. C.; FERREIRA, D. F. Poder e taxas de erro tipo I dos testes Scott-Knott, Tukey e Student-Newman-Keuls sob distribuições normal e não normal dos resíduos. *Revista de Matemática e Estatística*, v. 21, n. 1, p. 67-83, 2003.
- CABRAL, P. G. C. et al. Identification of a new race of *Hemileia vastatrix* in Brazil. *Australasian Plant Disease Notes*, v. 4, n. 1, p. 129-130, 2009.

CACEFO, V.; ARAÚJO, F. *Bacillus subtilis* no controle biológico da ferrugem e do bicho-mineiro no cafeeiro. *Colloquium Agrariae*, v. 11, p. 14-22, 2015.

CAPUCHO, A. S. et al. Development and validation of a standard area diagram set to estimate severity of leaf rust in *Coffea arabica* and *C. canephora*. *Plant Pathology*, v. 60, n. 6, p. 1144-1150, 2011.

CAPUCHO, A. S. et al. Chemical control of coffee leaf rust in *Coffea canephora* cv. conilon. *Australasian Plant Pathology*, v. 42, n. 6, p. 667-673, 2013.

CARVALHO, A. M. et al. Comportamento de cultivares de cafeeiro sob a incidência das doenças da ferrugem e cercosporiose em dois ambientes de cultivo. *Coffee Science*, Lavras, v. 12, n. 1, p. 100-107, 2017.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Produção agrícola: safra – série histórica do café 2024/2025. Brasília: CONAB, 2025. Disponível em: <https://portaldeinformacoes.conab.gov.br/safra-serie-historica-cafe.html>. Acesso em: 2 nov. 2025.

CONSELHO DOS EXPORTADORES DE CAFÉ DO BRASIL (CECAFÉ). Exportação de café do Brasil cai em 2025, mas receita é recorde. 2026. Disponível em: <https://www.cecafe.com.br/publicacoes/noticias/cecafe-exportacao-cafe-2025-20260119/?utm>. Acesso em: 2 nov. 2025.

CONSELHO NACIONAL DO CAFÉ (CNC). Exportações brasileiras de café atingem 40,4 milhões de sacas e geram US\$ 15,5 bilhões em 2025. 2026. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2026-01/exportacao-de-cafe-do-brasil-cai-em-2025-mas-bate-recorde-em-receita?utm>. Acesso: 2 nov. 2025.

DATA BRIDGE. Mercado global de café orgânico. 2024. Disponível em: <https://www.databridgemarketresearch.com>. Acesso em: 11 fev. 2026.

IBGE. Levantamento sistemático da produção agrícola 2012. Disponível em: www.ibge.gov.br. Acesso em: 11 fev. 2026.

INTERNATIONAL COFFEE ORGANIZATION (ICO). Coffee Market Report – 2025. Londres: ICO, 2025. Disponível em: <https://ico.org/pt/>. Acesso em: 2 nov. 2025.

KRANZ, J. Measuring plant disease. In: KRANZ, J.; ROTEM, J. (eds.). *Experimental techniques in plant disease epidemiology*. Berlin: Springer-Verlag, 1988. p. 35-50.

MACHADO, L. M. Manual do manejo orgânico do cafeeiro. 2023. 64 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Desenvolvimento Sustentável e Extensão) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2023.

MEIRELLES, E. J.; LEITE, M. Fenologia do cafeeiro: condições agrometeorológicas e balanço hídrico do ano agrícola 2004-2005. Brasília: Embrapa, 2009. 128 p.

MORAES, W. et al. Zoneamento das áreas de favorabilidade climática de ocorrência da ferrugem do cafeeiro no Brasil. *Enciclopédia Biosfera*, v. 7, n. 13, p. 1-8, 2011.

OIC. Relatório do mercado de café. Disponível em: www.ico.org. Acesso em: 12 fev. 2026.

PEREIRA, A. A.; et al. Cultivares de café: cultivares desenvolvidas pelo Programa de Melhoramento Genético EPAMIG, EMBRAPA Café, UFV e UFLA. Belo Horizonte: EPAMIG, 2019. Folder técnico. Disponível em: <https://www.livrariaepamig.com.br/wp-content/uploads/2023/02/Cultivares-de-cafe.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2026.

PIMENTEL-GOMES, F. Curso de estatística experimental. 15. ed. Piracicaba: FEALQ, 2009. 451 p.

PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. Python language reference, version 3. Beaverton: Python Software Foundation, 2024. Disponível em: <https://www.python.org>. Acesso em: 01 dez. 2025.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2024. Disponível em: <https://www.R-project.org>. Acesso em: 01 dez. 2025.

REIS, L. O. et al. Controle alternativo da ferrugem do cafeeiro. In: JORNADA CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA DO IFSULDEMINAS, 15., 2022, Pouso Alegre. Anais... Pouso Alegre: IFSULDEMINAS, 2022. p. 1-6.

SALAZAR-NAVARRO, A. et al. Coffee leaf rust (*Hemileia vastatrix*) disease in coffee plants and perspectives by the disease control. *Phyton – International Journal of Experimental Botany*, v. 93, n. 5, p. 923-949, 2024.

SEAPA. Exportações do agro mineiro de 2025. 2026. Disponível em: www.seapa.mg.gov.br. Acesso em: 12 fev. 2026.

SEDE. Dados de exportação de 2025. 2026. Disponível em: <https://desenvolvimento.mg.gov.br>. Acesso em: 13 fev. 2026.

SERA, G. H. et al. Coffee leaf rust in Brazil: historical events, current situation, and control measures. *Agronomy*, v. 12, n. 2, art. 496, 2022.

TALHINHAS, P. et al. The coffee leaf rust pathogen *Hemileia vastatrix*: one and a half centuries around the tropics. *Molecular Plant Pathology*, v. 18, n. 8, p. 1039-1051, 2017.

TONIUTTI, L. et al. Influence of environmental conditions and genetic background of arabica coffee on leaf rust pathogenesis. *Frontiers in Plant Science*, v. 8, art. 2025, 2017.

ZAMBOLIM, L. Current status and management of coffee leaf rust in Brazil. *Tropical Plant Pathology*, v. 41, p. 1-8, 2016.

ZAMBOLIM, L. Epidemiologia e controle da ferrugem do cafeeiro (*Hemileia vastatrix*). In: ZAMBOLIM, L. (Ed.). *O estado da arte de tecnologias na produção de café*. Viçosa: UFV, 2002. p. 369–450.

ZAMBOLIM, L. et al. Breeding programs against coffee leaf rust in Brazil: a review. *Journal of Agricultural Science*, v. 16, n. 5, p. 1-14, 2024.

MATERIAL SUPLEMENTAR

Tabela S1 - Análise de variância para severidade (%) da ferrugem, dados transformados por $\sqrt{x + 0,5}$.

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr > Fc
Bloco	2	36,76	18,38	30,89	< 0,001
Cultivar	2	48,19	24,10	40,50	< 0,001
Biológico	1	0,25	0,25	0,42	0,519
Químico	1	0,29	0,29	0,50	0,482
Cultivar × Biol.	2	1,04	0,52	0,88	0,418
Cultivar × Quím.	2	0,43	0,21	0,36	0,698
Biol. × Quím.	1	0,00	0,00	0,00	0,964
Cult. × Biol. × Quím.	2	0,18	0,09	0,15	0,863
Erro	163	96,99	0,60		
Total corrigido	176	184,13			

CV (%) = 50,33. Média geral (transformada) = 1,53. n = 177. ** p < 0,001; ns = não significativo.