

ESTRATÉGIAS DE RESILIÊNCIA AO ESTRESSE ABIÓTICO E AVANÇOS NO MELHORAMENTO GENÉTICO DE *Coffea canephora*:

Milena Barbosa Parreira da Silva¹, Isabella Sobreira¹, Vinícius Alves Porto Rodrigues¹, Mariana Rodrigues Lugon Dutra¹, Letícia de Souza de Oliveira¹, Marcia Flores da Silva Ferreira¹, Adésio Ferreira¹

¹Universidade Federal Espírito Santo/ Departamento de Agronomia, Alto Universitário, s/n, Guararema - 29500-000 - Alegre-ES, Brasil,
milena-barbosa15041999@gmail.com, isabellasobreira_a_assis@hotmail.com,
viniciusbio1311@gmail.com, mariana.lugon@outlook.com, lsleticiasao@gmail.com,
mfloressf@gmail.com, adesioferreira@gmail.com.

Resumo

Esta revisão sistematiza estratégias de resiliência ao estresse abiótico e a capacidade inovadora em *Coffea canephora*, destacando lacunas e prioridades. Realizou-se uma revisão integrativa (2000–2025) nas bases Scopus, Web of Science e PubMed, contemplando artigos revisados por pares e relatórios técnicos sobre impacto climático, fenotipagem digital e melhoramento genético. Os estudos apontam perdas sob secas, altas temperaturas, mas evidenciam ampla variabilidade genética e vias/genes de resposta ao estresse com potencial. Séries temporais de UAV/satélites e índices de vegetação, permite detecção precoce de estresse e predição de rendimento. Conclui-se que grande parte das pesquisas no melhoramento genético de café se concentra em café arábica (*Coffea arabica* L.), deixando uma lacuna significativa no que se refere ao melhoramento de *C. canephora*. Contudo é imprescindível ampliar pesquisas de melhoramento em *Coffea canephora*, priorizando ensaios multiambientais para identificar, validar e difundir progênies superiores quanto à produtividade, tolerância à seca e qualidade.

Palavras-chave: *Coffea canephora*. Estresse abiótico. Resiliência climática. Melhoramento genético. Sensoriamento remoto.

Área do Conhecimento: Ciências Agrárias. **Subárea:** Agronomia.

Introdução

O café (*Coffea* spp.) é uma das bebidas mais consumidas do mundo e uma commodity de alta relevância econômica. O Brasil, maior produtor e exportador global, responde por 37% da produção mundial, com produção global de 64,7 milhões de sacas de 60 kg estimadas para a safra 2024/2025 (USDA, 2025). No cenário nacional, o Espírito Santo ocupa a segunda posição em produção de café e é o principal produtor de *Coffea canephora* (CONAB, 2024).

A sustentabilidade da produção da espécie é de grande importância, contudo, a indústria cafeeira enfrenta ameaças crescentes das mudanças climáticas, como seca, elevação das temperaturas e maior pressão de pragas e doenças (Ferreira et al., 2024; Lorenzone et al., 2024; Moat et al., 2017).

No entanto, grande parte do conhecimento no melhoramento genético de café se concentra em *Coffea arabica* (*Coffea arabica* L.), deixando uma lacuna significativa no que se refere ao melhoramento de *C. canephora*, o que é preocupante dado o papel crucial de *C. canephora* na produção nacional e global de café, especialmente em regiões como o sul do Espírito Santo.

O objetivo deste trabalho é realizar uma revisão bibliográfica referente ao melhoramento genético de *Coffea canephora*, com foco na identificação de lacunas no conhecimento atual e na proposta de direções para futuras pesquisas. A revisão visa destacar a importância do desenvolvimento de genótipos resilientes a estresses climáticos, como seca e calor, e a utilização de tecnologias de

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

precisão para o monitoramento do vigor e estresse das plantas. Além disso, busca-se discutir a necessidade de estratégias integradas que combinem a seleção de materiais geneticamente melhorados com metodologias de fenotipagem digital, visando otimizar a produção e garantir a sustentabilidade da cafeicultura.

Metodologia

A metodologia adotada para esta revisão bibliográfica envolveu uma análise detalhada de fontes científicas atualizadas (2000 a 2025). As fontes foram selecionadas a partir de bases de dados, como Scopus, Web of Science, ScienceDirect e PubMed. Foram incluídos artigos revisados por pares, relatórios técnicos de instituições de pesquisa e publicações em periódicos de impacto, com ênfase em estudos que abordassem o impacto climático, o uso de tecnologias de precisão e o melhoramento genético de *Coffea canephora*.

A revisão foi organizada em três áreas principais: Os impactos climáticos de *Coffea canephora*, o uso de tecnologias de precisão para monitoramento de estresse e vigor, e as estratégias de melhoramento genético para o desenvolvimento de materiais resilientes. A análise da literatura foi conduzida com o objetivo de identificar as lacunas no conhecimento existente, como a necessidade de mais pesquisas sobre materiais geneticamente melhorados que apresentem características específicas para a adaptação a estresses climáticos.

Resultados

O desafio central no melhoramento genético de *C. canephora* reside na identificação e seleção de genótipos que não apenas atendam às demandas de produtividade, mas que também exibam resistência a estresses abióticos e bióticos. Secas prolongadas, temperaturas máximas elevadas e o déficit de pressão de vapor alto (VPD) reduzem o crescimento vegetativo, o pegamento floral e o enchimento de frutos, resultando em efeitos na safra seguinte (Venâncio et al., 2020). Esses fatores podem levar à diminuição de gemas e ramos produtivos, à menor reposição de reservas e, consequentemente, à queda da produtividade.

Projeções de impacto das mudanças climáticas na cafeicultura indicam perdas significativas em áreas considerada adequadas para a produção de *C. canephora* no Brasil, principalmente em regiões de baixa altitude e mais quentes, o que ressalta a importância da identificação de genótipos adaptáveis a diferentes condições edafoclimáticas (Jordaim, 2025), todavia, a avaliação do desempenho agrônomo e a tolerância ao estresse ainda são escassos. Portanto, ampliar o conhecimento sobre o desempenho agrônomo de genótipos de *C. canephora* em ambientes diferentes é de extrema importância para fornecer suporte técnico ao manejo e melhoramento genético em áreas anteriormente consideradas desfavoráveis para a espécie.

Para assegurar a produção e as exportações, é imprescindível estabelecer marcos regulatórios de adaptação e gestão de risco climático, a fim de mitigar os impactos econômicos (Afifah et al., 2025). Ampliar o acesso dos produtores a materiais genéticos melhorados é uma condição essencial para sustentar a oferta global (WCR, 2025), especialmente em um cenário onde a pressão climática e a volatilidade de mercado exigem inovação contínua para a sustentabilidade a longo prazo (ICO, 2025).

Nesse contexto, o melhoramento genético emerge como um pilar estratégico para a adaptação da cafeicultura às mudanças climáticas. Estudos têm identificado genes associados à tolerância a estresses abióticos em *Coffea canephora*, que conferem resistência à seca e ao calor (Cruz et al., 2019; Zaidan, 2023; Ramalho et al., 2025). A caracterização fenotípica e molecular desses recursos genéticos permite identificar alelos de interesse para programas de melhoramento, assegurando diversidade genética frente a cenários climáticos extremos (Bezerra et al., 2023; Montagnon et al., 2020).

Adicionalmente, a fenotipagem digital, por meio de índices espectrais como NDVI, NDRE e EVI, apresenta-se como uma ferramenta promissora, pois permite a detecção precoce de vigor e estresse. Séries temporais de drones e satélites, combinadas com aprendizado de máquina, têm demonstrado capacidade de prever zonas de risco e rendimento com boa precisão, desde que haja padronização de voo e calibração radiométrica (Rezende, 2023; Barata et al., 2024). Essas informações, correlacionadas com estudos genômicos, são cruciais para identificar genótipos com alto potencial produtivo e resistência à seca, características essenciais para a competitividade no mercado atual.

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

A espécie *C. canephora* apresenta uma significativa variabilidade genética entre e dentro de populações naturais, especialmente no Sul do Espírito Santo, constituindo uma valiosa fonte de alelos para o desenvolvimento de cultivares e avanços no melhoramento genético (Souza et al., 2015). Essa variabilidade genética, aliada ao acesso a materiais melhorados e ao uso de tecnologias de monitoramento, pode ser a chave para enfrentar os desafios impostos pelas mudanças climáticas e garantir a sustentabilidade da produção de café.

Discussão

A implementação de políticas de adaptação à mudança do clima fortalece a resiliência dos sistemas de produção, reduzindo vulnerabilidades e garantindo serviços ecossistêmicos essenciais. Isso inclui a promoção de práticas sustentáveis que protegem a biodiversidade e melhoram a qualidade dos recursos naturais (BRASIL, 2023). No contexto de *C. Canephora*, essas medidas são cruciais para garantir a produção sustentável e a adaptação dos agricultores às mudanças climáticas.

De acordo com Magrach; Ghazoul (2015), projeções climáticas indicam que *C. canephora* pode perder aproximadamente 55% das áreas atualmente adequadas ao cultivo, com maior retração na África Ocidental e no Brasil. Os achados evidenciam para um quadro no qual a resiliência produtiva de *C. canephora* depende de escolha de genótipos adequados. Para o Espírito Santo, onde a cadeia é altamente especializada em *C. canephora*, combinada à alta concentração produtiva aumenta a exposição a choques de seca e calor, com impactos em produtividade, qualidade e previsibilidade de oferta e, por extensão, em renda e emprego.

Os resultados indicam para um quadro em que seca, calor e comprometem crescimento vegetativo, pegamento floral e enchimento de frutos, produzindo efeitos que reduzem o potencial produtivo da safra seguinte (Venâncio et al., 2020), que influencia em menor formação de gemas, redução de ramos produtivos e reposição insuficiente de reservas, o que explica a queda de produtividade observada sob cenários de estresse climático.

A ampla variabilidade genética relatada para *C. canephora* oferece base concreta para mitigação, desde que devidamente amostrada e testada (Souza et al., 2015). Simultaneamente, evidências de genes e vias, como DREB e HSP, indicam como as plantas respondem à seca e ao calor (Cruz et al., 2019) e apresentam candidatos promissores para utilização em seleção assistida, preservando diversidade e resiliência em cenários extremos.

A fenotipagem digital, por meio de índices de vegetação, permite a detecção precoce de vigor/estresse (Rezende, 2023; Barata et al., 2024). Esses estudos ressaltam que, quando integrada informações de dados genômicos e de sensoriamento remoto, viabiliza a seleção de genótipos, e a identificação de progênies superiores adaptadas ao estresse abiótico.

No plano setorial, que integra aspectos econômicos, ambientais e sociais, a literatura aponta que marcos de adaptação, gestão de risco climático e acesso a materiais melhorados são condições essenciais para sustentar a oferta e as exportações (Afifah et al., 2025; WCR, 2025; ICO, 2025).

Contudo, a adoção ainda enfrenta gargalos, como custos iniciais elevados e necessidade de capacitação técnica, que restringem a difusão dos ganhos de pesquisa entre os produtores. Além disso, as evidências científicas disponíveis apresentam limitações relevantes: predominância de estudos em *C. arabica*, séries temporais curtas, heterogeneidade nos protocolos de voo e sensores, e escassez de ensaios multiambientais específicos para *C. canephora* no Espírito Santo.

Conclusão

A interação genótipo vs ambiente desempenha um papel de grande relevância no melhoramento genético. Grande parte das pesquisas de café se concentra em *C. arábica*, deixando uma lacuna significativa no que se refere ao melhoramento de *C. canephora*, o que é particularmente preocupante dado o papel crucial de *C. canephora* na produção nacional e global de café, especialmente em regiões como o sul do Espírito Santo.

É imprescindível ampliar pesquisas de melhoramento em *C. canephora*, priorizando ensaios multiambientais para identificar, validar e difundir progênies superiores quanto à produtividade, tolerância à seca e qualidade de bebida.

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

A revisão evidencia que *Coffea canephora* reúne ampla variabilidade genética e recursos moleculares promissores para enfrentar estresses abióticos, especialmente seca e calor. O avanço do melhoramento depende da integração entre caracterização fenotípica e genômica, associada a ferramentas inovadoras que permitem maior precisão na seleção de genótipos resilientes. Entretanto, persistem lacunas críticas, como a escassez de ensaios multiambientais, a predominância de estudos em *C. arabica* e a necessidade de padronização metodológica. Superar esses desafios, aliado à ampliação do acesso a materiais geneticamente melhorados e à implementação de políticas de adaptação e gestão de risco climático, é condição essencial para garantir a sustentabilidade, a competitividade e a segurança da cafeicultura baseada em *C. canephora*.

Referências

- ALKMIM, E. R. et al. *Coffea canephora* breeding: from classical genetics to genomic selection. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 21, n. 2, 2021.
- AFIFAH, N.Z et al. Dampak perubahan iklim terhadap produksi dan ekspor pada komoditi kopi. **Jurnal Ilmiah Research Student**, v. 2, n. 1, p. 473-480, 2025. Doi: <https://doi.org/10.61722/jirs.v2i1.3710>
- ASSAD, E. D. et al. Zoneamento Agrícola de Risco Climático: inovações e aplicações. *Embrapa*, 2023.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. *Plano ABC+*: Política para Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária, 2023.
- CRUZ, C. D. et al. Genes de resistência a estresses abióticos em *Coffea canephora*. **Plant Molecular Biology**, v. 101, p. 1-15, 2019.
- FERREIRA, M.L et al. Effects of the climate change scenario on *Coffea canephora* production in Brazil using modeling tools. **Tropical Ecology** v. 65, p.559–571, 2024. Doi: <https://doi.org/10.1007/s42965-024-00350-z>
- IPCC. Climate Change 2025: the physical science basis. Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2025. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/>. Acesso em: 02 set. 2025.
- JORDAIM, R.B et al. Genotypic Performance of *Coffea canephora* at Transitional Altitudes for Climate-Resilient Coffee Cultivation. **Horticulturae**, v. 11, n. 595, 2025. Doi: [10.3390/horticulturae11060595](https://doi.org/10.3390/horticulturae11060595)
- LORENÇONE, P.A et al. Climate change and its consequences on the climatic zoning of *Coffea canephora* in Brazil.Environment. **Development and Sustainability**, v. 26, p.8377–8398, 2024. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03051-0>
- MAGRACH, A; GHAZOUL, J. Climate- and Pest-Driven Geographical Changes in Global Coffee Production: Implications for Forest Cover, Biodiversity, and Carbon Storage. **PloSone**, v. 10, n. 7, p. e0133071, 2015.Doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0133071>
- MOAT J, et al. Resilience potential of the Ethiopian coffee sector under climate change. **Nature Plants**, v.3, n. 17081, 2017. Doi: [10.1038/nplants.2017.81](https://doi.org/10.1038/nplants.2017.81). PMID: 28628132.
- RAMALHO, J.C et al. Stress resilience in *Coffea arabica* and *Coffea canephora* under harsh drought and/or heat conditions: Selected genes, proteins, and lipid integrated responses. **Frontiers in Plant Science**, v. 16, 2025. Doi: [10.3389/fpls.2025.1623156](https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1623156).

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

USDA - UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Coffeimpact of drought associated with high temperatures on *Coffea canephora* plantations.e: World 1257 Markets and Trade; Foreign Agricultural Service: Washington, DC, USA, 2025. Acesso: <<https://www.fas.usda.gov/data/production/commodity/0711100> >. Acesso em: 30 de ago. de 2025.

WORLD COFFEE RESEARCH (WCR). Coffee's Innovation Crisis: Determining the size of the agricultural R&D investment gap for coffee. World Coffee Research, **2025**. Disponível em: <https://worldcoffeeresearch.org/resources/coffees-innovation-crisis>. Acesso em: 30 ago. 2025.

VENÂNCIO, L. P. et al. Impact of drought associated with high temperatures on *Coffea canephora* plantations: a case study in Espírito Santo State, Brazil. **Scientific Reports**, v. 10:19719, 2020. Doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76713-y>

RESENDE, R.T, et al. **Melhoramento de Precisão:** Aplicações e perspectivas na genética de plantas, 2023.

ZAIDAN, I. R. et al. A. Genome-wide association analysis of traits related to development, abiotic and biotic stress resistance in *Coffea canephora*. **Scientia Horticulturae**, v. 341, p. 114004, 2025. Doi: 10.1016/j.scienta.2025.114004.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal do Espírito Santo pelo fornecimento do ensino de qualidade; à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES), pela concessão de bolsa de doutorado.