

CAPÍTULO 2

Déficit hídrico e fenologia reprodutiva do cafeeiro: da ecofisiologia da planta à construção de sistemas produtivos resilientes

Fernanda Barcelos de Paula, Ludmila Lisbôa Porto, Magno do Carmo Parajara, Jozimara Teixeira de Souza, Déborah Sampaio de Almeida, Willian Moreira da Costa, Regiane Carla Bolzan Carvalho, Carlos Henrique Rodrigues de Oliveira, Atanásio Alves do Amaral, Maurício Novaes Souza

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-46-6.c2>

Resumo

A fenologia reprodutiva do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) constitui um dos principais fatores determinantes da produtividade, da qualidade dos grãos e da sustentabilidade da cafeicultura. A ocorrência e a duração dos diferentes estádios fenológicos são fortemente influenciadas pelas condições climáticas, especialmente pela disponibilidade hídrica. Esta revisão de literatura analisa os efeitos do déficit hídrico sobre o desenvolvimento reprodutivo do cafeeiro, abordando os mecanismos fisiológicos envolvidos, os impactos sobre a formação e a qualidade dos frutos e as principais estratégias de adaptação utilizadas na cafeicultura contemporânea. Os estudos revisados demonstram que restrições hídricas moderadas podem atuar como estímulo fisiológico para a indução e uniformização da florada, enquanto déficits severos e prolongados comprometem processos metabólicos essenciais, reduzindo o pegamento floral, a expansão celular, o enchimento dos frutos e o acúmulo de compostos relacionados à qualidade física e sensorial da bebida. As fases de granação inicial, enchimento dos grãos e maturação destacam-se como os períodos de maior sensibilidade ao estresse hídrico. A revisão evidencia ainda que a adaptação da cafeicultura aos cenários de variabilidade climática depende da integração entre irrigação racional, manejo conservacionista do solo, sistemas agroecológicos, tecnologias de monitoramento, conservação da água e utilização de cultivares mais tolerantes à seca. Conclui-se que a resiliência dos sistemas cafeeiros resulta da interação entre genética, ambiente e manejo, sendo fundamental para a manutenção da produtividade, da qualidade da bebida e da sustentabilidade da produção frente aos desafios impostos pelas mudanças climáticas.

Palavras-chave: Estresse abiótico. Relações hídricas. Qualidade dos grãos. Agroecossistemas resilientes. Manejo conservacionista. Melhoramento genético.

1. Introdução

Consolidado como uma das *commodities* agrícolas mais importantes do mundo, pertencente ao gênero *Coffea*, o café ocupa posição de destaque no comércio internacional e na economia de diversos países produtores. Sua relevância transcende os aspectos econômicos, estando profundamente inserido nos hábitos alimentares, nas práticas socioculturais e no cotidiano de milhões de pessoas em diferentes regiões do planeta. Em função de sua ampla aceitação e expressiva participação nos mercados globais, o café figura entre as bebidas mais consumidas mundialmente, desempenhando papel estratégico na geração de renda, emprego e desenvolvimento regional (ICO, 2024).

No panorama brasileiro, país que sustenta a liderança como maior produtor e exportador mundial, a cafeicultura é um dos pilares vitais do agronegócio. Além de equilibrar a balança comercial, a atividade desempenha um papel humanitário fundamental na manutenção de milhões de empregos diretos e indiretos, preservando a vitalidade socioeconômica de diversas regiões produtoras (CONAB, 2024).

No Espírito Santo, a cafeicultura possui grande importância econômica e social, destacando o estado como o maior produtor de café conilon do Brasil e um dos principais produtores nacionais de café. A atividade está diretamente ligada à geração de emprego, renda e ao fortalecimento da agricultura familiar, sendo fundamental para o desenvolvimento de diversos municípios capixabas. Além disso, o Espírito Santo se tornou referência na cafeicultura pela adoção de tecnologias, inovação e práticas sustentáveis, resultado da integração entre produtores, pesquisa e assistência técnica (Sousa *et al.*, 2026; Souza *et al.*, 2026).

Entretanto, a sustentabilidade da cafeicultura brasileira e capixaba enfrenta desafios cada vez mais intensos diante das mudanças climáticas e das limitações estruturais presentes no meio rural. A instabilidade climática compromete a regularidade das safras, aumenta os riscos no plantio e reduz a segurança produtiva das propriedades cafeeiras (Damatta; Ramalho, 2006; Souza *et al.*, 2012; Altieri *et al.*, 2015; Salvador *et al.*, 2025).

Somam-se a esse cenário a ineficiência operacional em algumas etapas da produção e o isolamento digital de muitos produtores rurais, fatores que

dificultam o acesso à informação, às tecnologias e à assistência técnica. Esses desafios impactam diretamente a produtividade, a competitividade e a qualidade de vida das famílias que dependem da cafeicultura, evidenciando a necessidade de estratégias sustentáveis, inovadoras e inclusivas para fortalecer o setor (Souza *et al.*, 2012; Salvador *et al.*, 2025). As principais dimensões dessa vulnerabilidade são sintetizadas na Figura 1.



Figura 1. Principais dimensões de vulnerabilidade da cafeicultura contemporânea: operacionais, riscos hídricos e digitais. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Nesse cenário, a compreensão dos processos fisiológicos que regulam o desenvolvimento do cafeeiro torna-se fundamental para o enfrentamento dos riscos associados às mudanças climáticas e à disponibilidade hídrica. Entre esses processos, destaca-se a fenologia, responsável por descrever a sequência de eventos vegetativos e reprodutivos que determinam o crescimento, a floração e a produção da cultura.

Nesse contexto, o presente trabalho propõe-se a analisar, sob a ótica de uma revisão de literatura, os impactos multifacetados do déficit hídrico sobre as diferentes fases fenológicas reprodutivas do cafeeiro. A revisão busca correlacionar a escassez de água com o rendimento produtivo e a qualidade sensorial dos grãos, identificando criticamente os períodos de maior vulnerabilidade fisiológica, especialmente as fases de expansão e granação dos frutos.

2. Fenologia reprodutiva do cafeeiro

A fenologia constitui o ramo da ciência que estuda a ocorrência, a duração e a sequência dos eventos biológicos ao longo do ciclo de vida das plantas, relacionando-os às condições ambientais predominantes. Nas espécies perenes, a observação sistemática desses eventos fornece informações fundamentais para compreender as respostas fisiológicas às variações climáticas e orientar práticas de manejo agrícola (Bencke; Morellato, 2002; Pizol, 2021). No cafeeiro (*Coffea arabica* L.), o conhecimento fenológico assume importância estratégica, uma vez que o desenvolvimento vegetativo e reprodutivo apresenta elevada sensibilidade às condições hídricas e térmicas do ambiente.

Diferentemente de muitas espécies vegetais que completam seus processos de floração e frutificação em um único ano, o cafeeiro (*Coffea arabica* L.) apresenta um ciclo biológico mais longo e complexo, no qual o crescimento vegetativo e a produção ocorrem de forma simultânea e interdependente em ramos de diferentes idades. Em geral, a planta necessita de aproximadamente dois anos para atingir a maturidade fisiológica e iniciar plenamente sua atividade reprodutiva (Carvalho, 2008). A partir desse estágio, passa a apresentar um ciclo fenológico caracterizado pela sobreposição temporal de eventos vegetativos e reprodutivos, cuja dinâmica se desenvolve ao longo de cerca de dois anos agrícolas consecutivos, conforme representado na Figura 2.



Figura 2. Dinâmica do ciclo fenológico reprodutivo do cafeeiro: sucessão das seis fases de desenvolvimento em ambiente tropical. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A dinâmica temporal apresentada na Figura 2 evidencia a natureza contínua e sobreposta do desenvolvimento reprodutivo do cafeeiro. Com base na descrição clássica de Camargo e Camargo (2001) para as cultivares Catuaí e Mundo Novo, o ciclo pode ser estruturado em seis fases capitais que evidenciam a complexidade da espécie:

- ✓ Vegetação e formação de gemas: marcada pelo desenvolvimento das gemas foliares e dos ramos que servirão de base para a produção futura;
- ✓ Indução, maturação e dormência: período em que as gemas axilares são induzidas a se tornarem gemas florais, passando por um processo de maturação fisiológica;
- ✓ Antese: fase correspondente à florada propriamente dita, desencadeado pelo estímulo hídrico (chuva ou irrigação) após um período de estresse hídrico controlado (repouso seco);
- ✓ Expansão e granação dos frutos: fase crítica que compreende o estágio de “chumbinho”, a expansão celular e o posterior acúmulo de reservas no endosperma;
- ✓ Maturação dos frutos: estágio caracterizado pela intensificação de processos bioquímicos, acúmulo de açúcares e mudança de coloração do epicarpo, culminando no estágio cereja;
- ✓ Repouso e senescência: fase caracterizada pela dormência vegetativa e pela autopoda natural de ramos plagiotrópicos exauridos, preparando a planta para um novo ciclo reprodutivo. Nesse período, a restrição hídrica desempenha papel fisiológico fundamental na sincronização das gemas florais, cuja retomada do desenvolvimento ocorre após a reidratação promovida pelas primeiras chuvas da estação.

A sincronização da florada constitui um dos fenômenos fisiológicos mais importantes da fenologia do cafeeiro. A restrição hídrica moderada durante o período de dormência das gemas florais, seguida pela reidratação promovida pelas primeiras chuvas ou pela irrigação, atua como estímulo para a retomada do desenvolvimento e para a uniformização da florada (Damatta *et al.*, 2019; Damatta; Martins; Ramalho, 2025) (Figura 3).

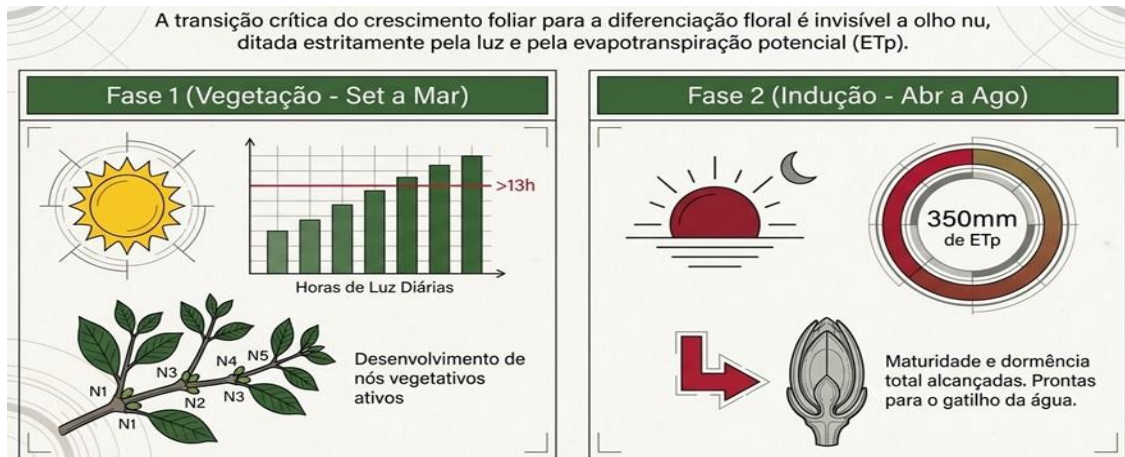


Figura 3. Fases de vegetação e indução floral do cafeeiro: influência do fotoperíodo e da evapotranspiração potencial. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Embora a Figura 3 sintetize os mecanismos fisiológicos envolvidos na sincronização da florada, a caracterização do desenvolvimento reprodutivo do cafeeiro requer uma descrição mais detalhada dos diferentes estágios fenológicos. Nesse sentido, Moraes *et al.* (2008) propuseram uma escala fenológica fundamentada em características morfométricas e na variação cromática de gemas, flores e frutos.

Essa subdivisão em estágios intermediários permite um monitoramento mais preciso do desenvolvimento da cultura, fornecendo subsídios para intervenções técnicas em momentos estratégicos do ciclo produtivo (Figura 4). Contudo, a interpretação desses estágios deve transcender a simples observação morfológica, integrando-se à compreensão das variações fisiológicas, metabólicas e nutricionais inerentes a cada fase do desenvolvimento.

Em termos práticos, o acompanhamento fenológico possibilita ajustar com maior precisão o manejo da irrigação, da adubação e das demais práticas culturais, reduzindo desperdícios de insumos e aumentando a eficiência produtiva. Além disso, o conhecimento detalhado da dinâmica fenológica permite identificar períodos de maior sensibilidade da planta a estresses ambientais, especialmente aqueles relacionados à disponibilidade hídrica e às oscilações

térmicas, fatores diretamente associados à produtividade e à qualidade final dos grãos (Damatta *et al.*, 2019; Damatta; Martins; Ramalho, 2025).

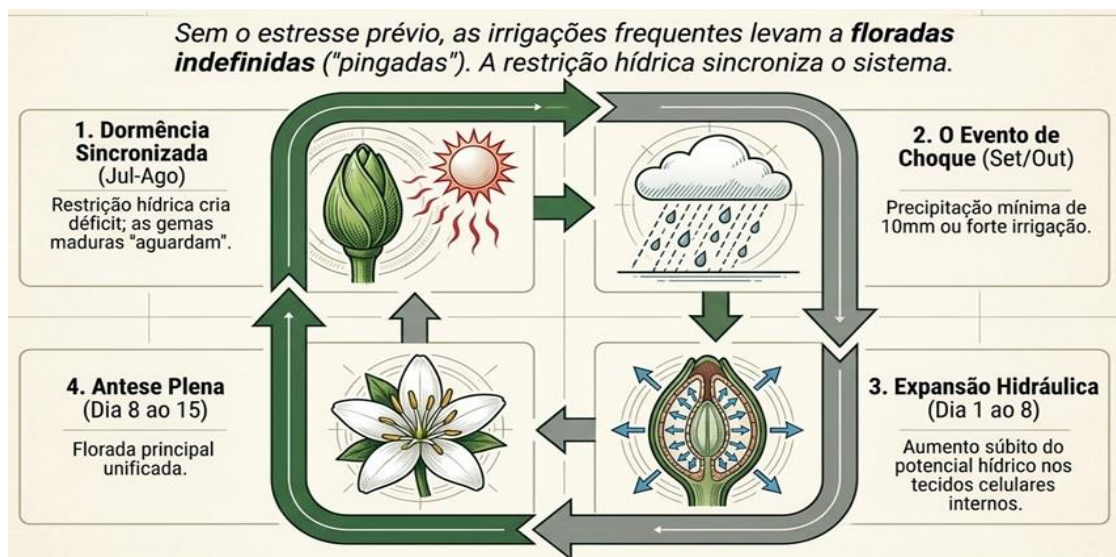


Figura 4. Sequência fisiológica da florada do cafeeiro: repouso, estímulo hídrico e abertura sincronizada das flores. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A sincronização da florada apresentada na Figura 4 constitui um evento determinante para a uniformidade do desenvolvimento reprodutivo do cafeeiro. Após a abertura das flores e a fecundação, inicia-se uma das etapas fisiologicamente mais exigentes do ciclo produtivo (Damatta *et al.*, 2019; Damatta; Martins; Ramalho, 2025).

Nesse sentido, a transição entre a antese e a granação (Fases 3 e 4) representa o período de maior demanda por fotoassimilados, exigindo que o suprimento de nutrientes, especialmente nitrogênio e potássio, esteja em estreita sincronia com o desenvolvimento dos frutos, a fim de evitar o esgotamento precoce dos ramos produtivos e a intensificação da bienalidade produtiva.

Complementarmente, Almeida *et al.* (2016) destacam que a fenologia constitui importante ferramenta para o planejamento estratégico do manejo agrícola, enquanto Laviola *et al.* (2020) alertam para os impactos das variações climáticas sobre a duração e a dinâmica das fases fenológicas. Além da irregularidade das chuvas afetarem a sincronia da florada, a soma térmica (graus-dia) atua como um dos principais reguladores da velocidade de

desenvolvimento dos frutos. Durante as fases de granação e maturação, os frutos passam a atuar como intensos drenos metabólicos, demandando grande quantidade de fotoassimilados e reservas acumuladas pela planta.

Quando esse processo ocorre sob condições ambientais desfavoráveis, pode haver redução do vigor vegetativo e intensificação da senescência dos ramos produtivos. Diante dessa elevada demanda fisiológica, a água assume papel central na regulação do desenvolvimento fenológico do cafeeiro (Figura 5).

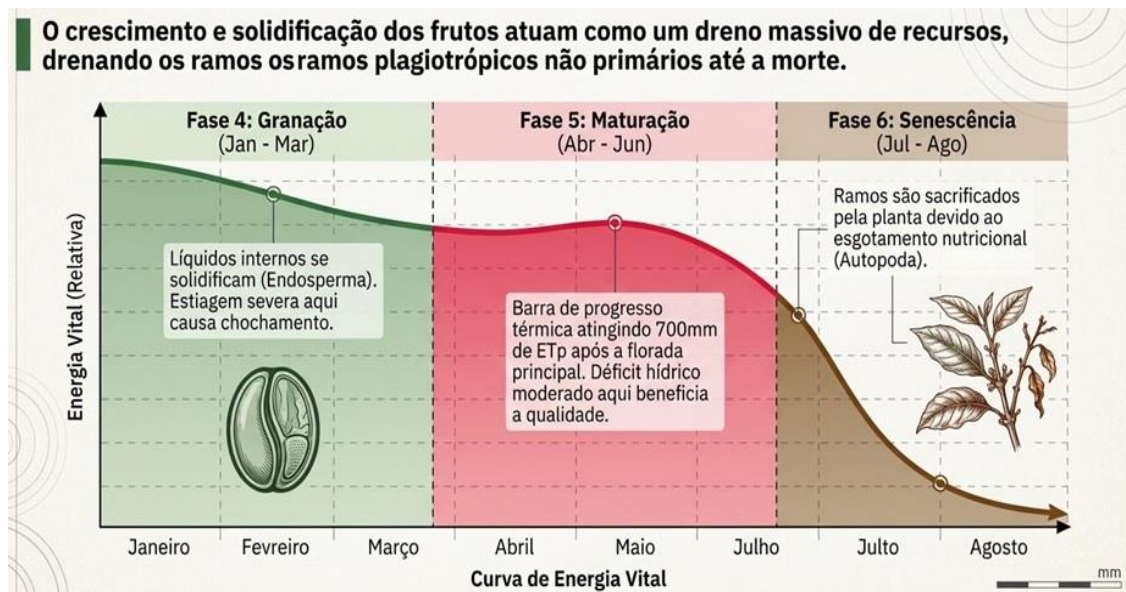


Figura 5. Intensificação do dreno de assimilados pelos frutos e declínio das reservas vegetativas nas fases finais do ciclo fenológico. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Nesse cenário, a água emerge como o elemento regente do desenvolvimento fenológico. No cafeeiro, a demanda hídrica flutua de forma acentuada ao longo do ciclo, tornando a gestão dos recursos hídricos o fator limitante para a sustentabilidade da lavoura. Meireles *et al.* (2009) observam que déficits severos durante o estágio vegetativo podem comprometer irreversivelmente a estrutura arquitetônica da planta e sua capacidade fotossintética futura.

Contudo, a relação do cafeeiro com o *status* hídrico apresenta uma dualidade fascinante: uma restrição hídrica moderada e estrategicamente conduzida no período que antecede a antese atua como um gatilho fisiológico essencial. Esse estresse controlado promove a quebra da dormência das gemas

e a uniformização da florada, potencializando o vingamento dos frutos e facilitando o manejo da colheita (Rena; Maestri, 1986; Assad *et al.*, 2004; Damatta *et al.*, 2007; Dubberstein *et al.*, 2017; Martins *et al.*, 2019). A identificação precisa dos estádios de desenvolvimento das gemas florais constitui importante ferramenta para o manejo da irrigação e para a previsão do florescimento, permitindo a adoção de estratégias que favoreçam a uniformidade da florada e o planejamento das operações de campo (Damatta *et al.*, 2019; Damatta; Martins; Ramalho, 2025) (Figura 6).



Figura 6. Escala fenológica de desenvolvimento das gemas florais do cafeeiro: evolução morfológica de G1 à antese (FL). Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A caracterização dos estádios de desenvolvimento das gemas florais evidencia a estreita relação entre os fatores ambientais e a dinâmica reprodutiva do cafeeiro. Diante da crescente complexidade climática observada nas regiões produtoras, torna-se fundamental compreender como as variações na disponibilidade hídrica interferem em cada etapa desse processo. Entre os diferentes estágios fenológicos, a fase de indução floral destaca-se pela elevada sensibilidade às condições hídricas, constituindo um dos principais mecanismos de regulação do florescimento e da produtividade da cultura.

3. Indução floral e diferenciação de gemas

A fase de indução floral e diferenciação de gemas (Fase 2) constitui um dos momentos mais singulares e críticos no ciclo reprodutivo do *Coffea arabica* L. Durante este estágio, a planta responde de forma particular à disponibilidade hídrica: um déficit hídrico moderado não é apenas tolerado, mas necessário.

Esse estresse atua como um sinalizador fisiológico que favorece a maturação e a manutenção da dormência das gemas florais, preparando o terreno para uma floração exuberante e sincronizada assim que a disponibilidade de água é restabelecida, seja via precipitação ou irrigação (Damatta *et al.*, 2007; Alves, 2008; Meireles *et al.*, 2009; Martins *et al.*, 2019) (Figura 7).



Figura 7. Efeitos da disponibilidade hídrica sobre a florada do cafeeiro: da indução sincronizada ao abortamento floral. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Este mecanismo intrincado fundamenta-se em uma complexa sinalização hormonal. Sob restrição hídrica controlada, o equilíbrio entre promotores e inibidores de crescimento (como o ácido abscísico e as giberelinas) favorece a transição das gemas axilares do estado vegetativo para o reprodutivo (Laviola *et al.*, 2020). Esse mecanismo adaptativo de dormência temporária é o que permite ao cafeicultor obter maior uniformidade da florada, um dos atributos mais desejáveis para a eficiência da colheita e para a qualidade do produto final.

Entretanto, o equilíbrio dessa resposta biológica é sensível. Quando a deficiência hídrica ultrapassa os limites da resiliência fisiológica, seja pela severidade da seca, pela sua duração prolongada ou por ocorrer em um momento inadequado, o efeito benéfico se dissipa. Nesses cenários de estresse agudo, a planta entra em um estado de exaustão: o número de gemas diferenciadas declina drasticamente, ocorre o abortamento floral e a

desuniformidade na abertura das flores torna-se evidente (Rena; Maestri, 1986; Carvalho, 2008; Barbosa *et al.*, 2016). O resultado é uma redução direta na taxa de fixação de frutos, comprometendo significativamente o potencial produtivo da safra subsequente. A identificação dos diferentes estádios fenológicos das gemas florais, especialmente do estágio E4, constitui importante ferramenta para o manejo hídrico e para a obtenção de floradas mais uniformes (Damatta *et al.*, 2019; Damatta; Martins; Ramalho, 2025) (Figura 8).

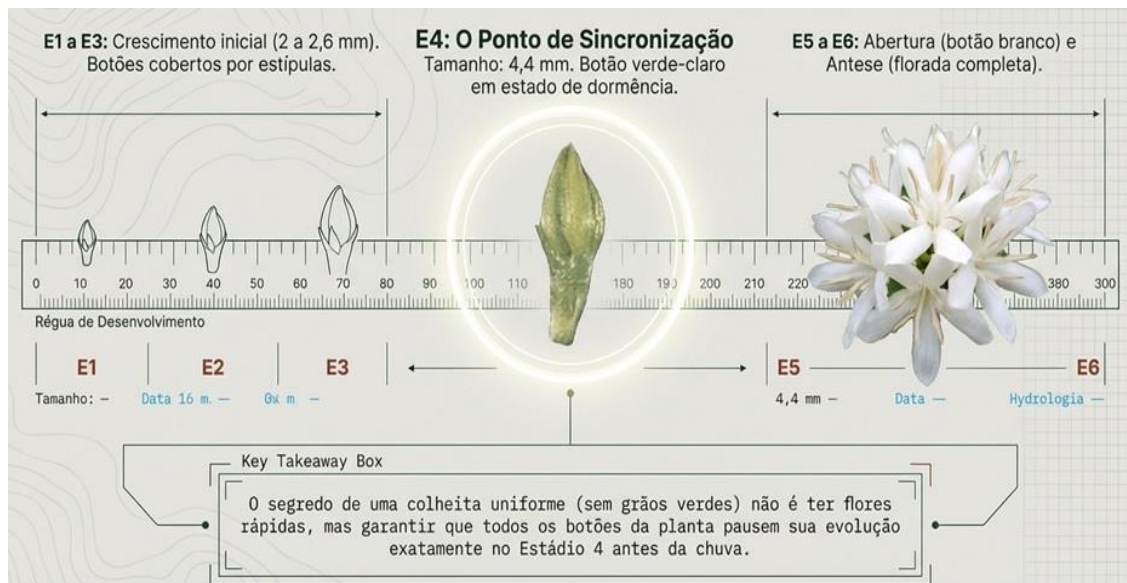


Figura 8. Escala fenológica das gemas florais do cafeeiro: evolução dos estádios E1 a E6 e importância do estágio E4 para a uniformização da florada. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Embora a escala fenológica permita identificar os momentos mais adequados para o manejo hídrico, a resposta das plantas ao déficit não é uniforme entre diferentes ambientes de cultivo e materiais genéticos. Investigações contemporâneas demonstram que a vulnerabilidade ao estresse hídrico é fortemente modulada pelo *terroir* e pela constituição genética das cultivares. Fatores como a altitude da lavoura, a capacidade de retenção de água do solo, as condições microclimáticas e o vigor da cultivar influenciam diretamente o limiar de tolerância das plantas à escassez de água, determinando a intensidade dos impactos sobre o crescimento, a floração e a produção do cafeeiro (Damatta *et al.*, 2019; Ferreira *et al.*, 2019; Nunes *et al.*, 2021; Damatta; Martins; Ramalho, 2025).

Fatores como a altitude da lavoura, a capacidade de retenção de água do solo e o vigor da cultivar definem o limiar de tolerância ao déficit (Ferreira *et al.*, 2019; Nunes *et al.*, 2021). Diante desse cenário, a adoção de práticas integradas, como a manutenção de cobertura morta sobre o solo, o manejo preciso da irrigação e a seleção de genótipos resilientes, deixa de ser uma escolha técnica para se tornar um compromisso com a sustentabilidade e a perenidade da produção cafeeira sob as incertezas climáticas atuais (Figura 9).

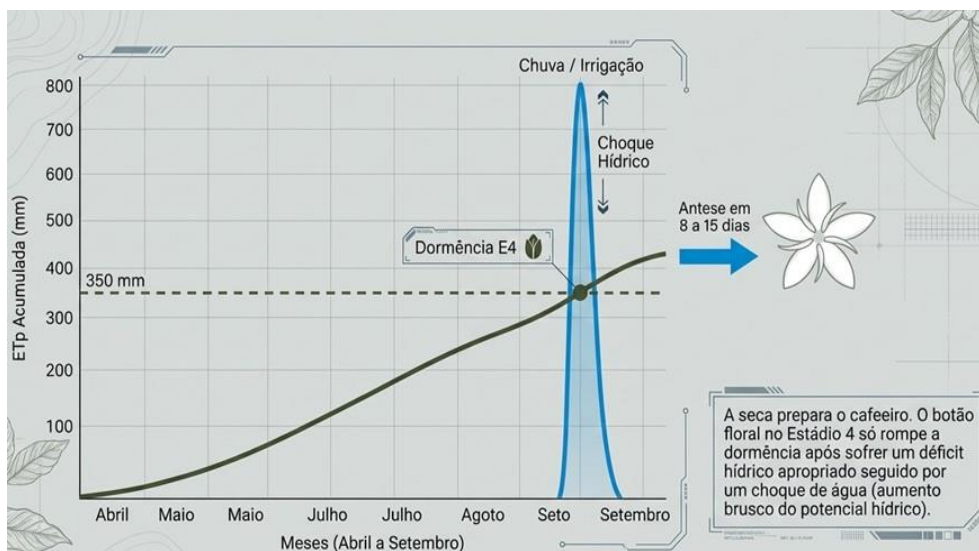


Figura 9. Dinâmica fisiológica da sincronização floral no cafeeiro: interação entre o estágio E4 e o estímulo hídrico. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A dinâmica apresentada na Figura 9 evidencia que o sucesso da florada depende não apenas da ocorrência do déficit hídrico, mas também de sua intensidade, duração e sincronização com o estágio fenológico das gemas florais. Quando as gemas atingem o estágio E4, a retomada da disponibilidade hídrica desencadeia uma rápida expansão celular, culminando na abertura uniforme das flores. Esse mecanismo constitui a base fisiológica da sincronização da florada e representa um dos principais fundamentos do manejo hídrico na cafeicultura moderna (Damatta *et al.*, 2019; Damatta; Martins; Ramalho, 2025).

A uniformidade do florescimento proporciona vantagens agrônomicas significativas, incluindo maior homogeneidade no desenvolvimento dos frutos, melhor planejamento das práticas de manejo e maior eficiência das operações

de colheita. Além disso, a concentração da florada em um período mais curto tende a favorecer a uniformidade da maturação dos frutos, reduzindo a ocorrência de grãos em diferentes estádios de desenvolvimento na mesma planta. Como consequência, aumenta-se o potencial de obtenção de lotes com maior qualidade física e sensorial, aspecto particularmente relevante para a produção de cafés especiais.

4. Floração e antese

A floração do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) atinge seu ápice com a antese, fase que marca a abertura das flores e simboliza a quebra definitiva da dormência dos botões florais. Esse processo é orquestrado por um mecanismo fisiológico fascinante e, em certa medida, paradoxal. Durante o período de repouso, o estresse hídrico moderado atua como um modulador, suspendendo o crescimento das gemas em estágios avançados de maturação (notadamente E4) e impedindo florescimentos esparsos que comprometeriam a eficiência da colheita futura (Damatta *et al.*, 2007; Meireles *et al.*, 2009; Damatta *et al.*, 2019; Martins *et al.*, 2019; Damatta; Martins; Ramalho, 2025).

Contudo, para esses mesmos autores, a transição para a antese exige uma mudança abrupta no *status* hídrico da planta. A entrada de água no sistema, seja por precipitação pluviométrica ou irrigação, reduz o potencial hídrico no xilema, permitindo que as células das pétalas aumentem sua turgidez de forma explosiva. Este influxo não apenas fornece o suporte físico para a expansão floral, mas também atua como o gatilho absoluto e imprescindível que reativa o metabolismo enzimático, culminando em uma florada exuberante e sincronizada. Essa vigorosa floração, capturada em momentos de rara beleza no campo, é a materialização da resiliência da planta frente ao manejo hídrico estratégico.

Além do estímulo hídrico, a eficiência da antese está diretamente associada ao estado fisiológico da planta e às condições ambientais vigentes no momento da reidratação. Temperaturas amenas, adequada disponibilidade de carboidratos acumulados nos ramos produtivos e bom estado nutricional favorecem a rápida expansão dos tecidos florais e aumentam a viabilidade do processo reprodutivo. Em contrapartida, condições de estresse prolongado,

associadas a temperaturas elevadas ou deficiências nutricionais, podem comprometer a abertura uniforme das flores e reduzir o potencial de pegamento dos frutos. Dessa forma, a antese representa não apenas a resposta imediata ao retorno da disponibilidade hídrica, mas também o resultado da interação entre fatores fisiológicos, nutricionais e ambientais acumulados ao longo do período de dormência (*ibidem*). A expressão visual desse processo pode ser observada na intensa florada apresentada na Figura 10, que evidencia a elevada capacidade de resposta fisiológica do cafeeiro após a retomada da disponibilidade hídrica.



Figura 10. Florada do cafeeiro após evento de precipitação, evidenciando a intensa emissão de flores ao longo dos ramos produtivos. Fonte: Acervo Fernanda Barcelos, 2022.

Durante o período de estresse hídrico que antecede este evento, os botões florais evoluem até atingir um estado de prontidão ou dormência. Essa restrição temporária atua como um ajuste biológico, garantindo que a planta concentre suas energias para uma resposta uniforme. Com o retorno das chuvas ou o acionamento da irrigação, a rápida absorção de água pelas raízes eleva a pressão de turgor nos tecidos florais, forçando a expansão das pétalas e consolidando a antese (Carvalho, 2008; Laviola *et al.*, 2020). Esse é o momento em que a lavoura se transforma, exalando o aroma característico que sinaliza o início de um novo ciclo produtivo (G6 e FL).

Contudo, a escassez de água neste momento crítico, ou imediatamente após, pode converter esse potencial em perda. A insuficiência hídrica durante a antese é um dos fatores mais limitantes para o cafeicultor, resultando em altos índices de abortamento floral e na baixa taxa de pegamento dos frutos. Um dos sintomas mais visíveis desse estresse é a formação de flores mal desenvolvidas e precocemente dessecadas, popularmente denominadas “estrelinhas”, que não possuem viabilidade para evoluir a frutos (Martins *et al.*, 2015; Damatta *et al.*, 2019; Damatta; Martins; Ramalho, 2025). Esse fenômeno reduz drasticamente o número de frutos por roseta e compromete o potencial produtivo da safra, uma vez que a perda de flores viáveis diminui diretamente a capacidade de formação dos frutos, conforme ilustrado na Figura 11.



Figura 11. Efeito do déficit hídrico sobre a antese do cafeeiro: formação de flores atrofiadas (“estrelinhas”), associada à redução do pegamento floral e do potencial produtivo da lavoura. Fonte: Carvalho, 2023.

Os prejuízos decorrentes do déficit hídrico durante a antese extrapolam a simples redução do número de frutos formados. A perda de flores viáveis compromete a uniformidade da produção, intensifica a variabilidade no desenvolvimento dos frutos e pode aumentar a ocorrência de diferentes estádios de maturação na mesma planta. Além disso, a redução do pegamento floral limita o aproveitamento do potencial produtivo previamente construído durante as fases de indução e diferenciação das gemas, refletindo diretamente na produtividade final da lavoura. Em anos de estiagens prolongadas, esses efeitos

tendem a ser ainda mais expressivos, tornando a disponibilidade hídrica um dos principais fatores condicionantes do desempenho reprodutivo do cafeeiro (Damatta *et al.*, 2019; Damatta; Martins; Ramalho, 2025).

Dessa forma, a gestão hídrica precisa deixar de ser apenas uma técnica de suporte para se tornar a garantia do sucesso reprodutivo. Em regiões marcadas pela instabilidade pluviométrica, o monitoramento rigoroso da umidade do solo e a adoção de estratégias de irrigação suplementar controlada são fundamentais para proteger a lavoura contra o abortamento e assegurar a sustentabilidade econômica e biológica da planta. Adicionalmente, práticas conservacionistas voltadas à manutenção da umidade do solo contribuem para aumentar a resiliência dos cafezais frente aos períodos de estiagem, reduzindo os riscos associados às oscilações climáticas (Ferreira *et al.*, 2019; Nunes *et al.*, 2021) (Figura 12).

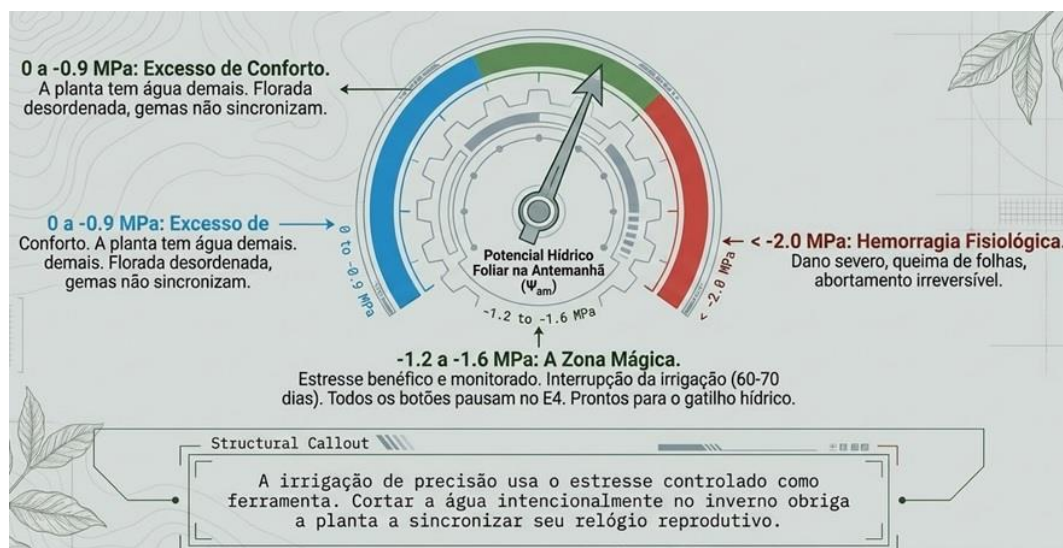


Figura 12. Diagnóstico e manejo: cenários de estresse hídrico *versus* o protocolo de irrigação deficitária controlada. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A análise comparativa dos cenários apresentados na Figura 12 evidencia que o sucesso reprodutivo do cafeeiro não reside na ausência total de estresse, mas sim no domínio de sua intensidade e temporalidade. Enquanto os cenários de déficit hídrico severo ou prolongado resultam em abortamento floral massivo e exaustão fisiológica dos ramos, a condição de água controlada demonstra o ápice da inteligência agrônoma.

Neste estado ideal, o estresse moderado é utilizado como um modulador biológico para sincronizar a antese, seguido por uma reposição hídrica precisa que garante a turgidez necessária para o vingamento inicial dos frutos. Assim, a transição entre o repouso induzido e a plena atividade metabólica torna-se o diferencial estratégico para mitigar a bienalidade e aperfeiçoar a partição de fotoassimilados em direção aos órgãos reprodutivos.

5. Granação inicial: fases de chumbinho e chumbão

Após a fecundação, o cafeeiro ingressa na terceira fase de seu ciclo reprodutivo, denominada granação inicial. Este período abrange os estágios de “chumbinho”, caracterizado pelo fruto recém-formado, e “chumbão”, momento em que ocorre a intensa expansão celular e o crescimento volumétrico do fruto. Nestas etapas, a água assume um papel de protagonista biológico, sendo o veículo indispensável para o transporte de fotoassimilados, a manutenção da turgidez celular e a definição da arquitetura final do fruto (Arruda; Grande, 2003; Alves, 2008; Silva *et al.*, 2018; Alves *et al.*, 2020).

Durante essa fase, o fruto passa por rápidas transformações morfofisiológicas que determinarão sua capacidade futura de acumular reservas e atingir adequado padrão de desenvolvimento. O sucesso desse processo depende da manutenção de um balanço favorável entre a produção de fotoassimilados pelas folhas e a capacidade dos frutos em formação de absorver e utilizar esses compostos. Simultaneamente, ocorre intensa atividade metabólica associada à síntese de novos tecidos, ao crescimento do pericarpo e à estruturação inicial do endosperma, tornando os frutos altamente dependentes do suprimento contínuo de água e nutrientes. Nesse período, os frutos passam a atuar como importantes drenos metabólicos, direcionando para si grande parte dos fotoassimilados produzidos pela planta. Como consequência, qualquer restrição hídrica pode comprometer a divisão e a expansão celular, reduzir o crescimento inicial dos frutos e limitar o potencial produtivo da lavoura (Damatta *et al.*, 2019; Damatta; Martins; Ramalho, 2025).

Além do crescimento visível dos frutos, essa etapa é marcada por intensa reorganização fisiológica dos tecidos reprodutivos. Durante a formação inicial do

fruto, ocorre elevada demanda energética para sustentar os processos de divisão celular, diferenciação tecidual e estabelecimento das estruturas responsáveis pelo armazenamento futuro de reservas. Nesse contexto, a disponibilidade de água influencia diretamente a atividade fotossintética, o transporte de nutrientes e a manutenção do potencial de crescimento dos frutos. Alterações no balanço hídrico da planta podem reduzir a eficiência desses processos, comprometendo não apenas o desenvolvimento inicial dos frutos, mas também sua capacidade posterior de enchimento e acúmulo de matéria seca (Damatta *et al.*, 2019; Damatta; Martins; Ramalho, 2025) (Figura 13).

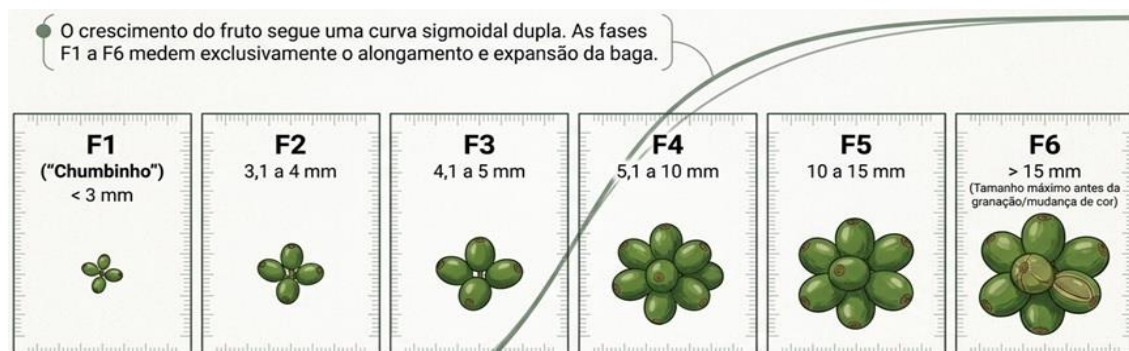


Figura 13. Desenvolvimento fenológico dos frutos do cafeeiro: evolução dos estádios de chumbinho, chumbão, expansão celular e granação (F1 a F6). Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A ocorrência de déficit hídrico neste intervalo é particularmente severa, pois coincide com a fase de rápida expansão celular do fruto, momento em que a turgidez hídrica é o motor do crescimento. Sob condições de estresse hídrico acentuado, o cafeeiro ativa mecanismos fisiológicos de defesa destinados à preservação de seus recursos metabólicos e hídricos. Essa resposta envolve alterações hormonais, especialmente o aumento da síntese de ácido abscísico e etileno, que favorecem a redução da carga reprodutiva da planta. Como consequência, ocorre a abscisão de parte dos frutos em formação, fenômeno que representa uma estratégia adaptativa para garantir a sobrevivência do organismo materno, embora resulte em perdas produtivas significativas (Damatta *et al.*, 2007; Damatta *et al.*, 2019; Laviola *et al.*, 2020; Damatta; Martins; Ramalho, 2025).

Os impactos do estresse hídrico sobre os frutos em formação não se restringem à redução do crescimento. Para esses mesmos autores, em

condições de deficiência de água, ocorrem diminuição da atividade fotossintética, da translocação de carboidratos e da absorção de nutrientes, comprometendo o suprimento energético necessário para sustentar o desenvolvimento dos frutos. Como resultado, a planta passa a priorizar a manutenção de suas funções vitais e intensifica mecanismos fisiológicos que favorecem a eliminação de parte dos frutos em formação. Essa resposta adaptativa, embora importante para a conservação dos recursos internos da planta, representa uma das principais causas de perdas produtivas durante a fase inicial de frutificação, sendo frequentemente observados pela queda prematura dos chamados “chumbinhos”, conforme ilustrado nas Figuras 14a e 14b.



Figuras 14a e 14 b. Efeitos do déficit hídrico durante a fase de chumbinho: sintomas de clorose, redução do vigor vegetativo e abscisão prematura de frutos em desenvolvimento. Fonte: (a) Notícias Agrícolas (2015); (b) elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (Google Gemini).

Além da queda prematura dos frutos, a escassez de água impõe limitações ao potencial de expansão volumétrica do fruto. Como o crescimento dos lóculos

e dos tecidos internos depende diretamente da manutenção da turgidez celular, a deficiência hídrica durante essa fase reduz a capacidade de expansão dos frutos e restringe a formação de estruturas destinadas ao acúmulo posterior de reservas. Como consequência, mesmo quando as condições ambientais se tornam mais favoráveis em fases subsequentes, o potencial de enchimento dos grãos já pode estar comprometido em razão das limitações estruturais estabelecidas durante o período crítico de expansão celular. O resultado é a formação de grãos menores, mal desenvolvidos e com menor valor comercial (Damatta *et al.*, 2007; Damatta *et al.*, 2019; Laviola *et al.*, 2020; Damatta; Martins; Ramalho, 2025).

Adicionalmente, a deficiência hídrica prejudica a formação adequada do pergaminho, a membrana que protege o endosperma. Uma falha estrutural nessa camada reflete negativamente não apenas na integridade física do grão, mas também na sua qualidade sensorial após o beneficiamento (Ferreira *et al.*, 2019; Nascimento *et al.*, 2021). Portanto, garantir a estabilidade hídrica durante as fases de chumbinho e chumbão é uma estratégia vital para assegurar que o potencial genético da cultivar se traduza em frutos bem formados e aptos a sustentar adequadamente os processos subsequentes de enchimento e acúmulo de reservas.

6. Enchimento do grão

A fase de enchimento do grão (Fase 4) representa o ápice da demanda metabólica no ciclo do *Coffea arabica* L., configurando-se como uma janela de extrema vulnerabilidade fisiológica. Nesse estágio, ocorre intenso acúmulo de matéria seca no endosperma, processo responsável pela formação da massa, densidade e composição química dos grãos. A água atua como o veículo indispensável para a translocação de minerais, açúcares e demais fotoassimilados sintetizados nas folhas em direção às sementes em desenvolvimento. É esse fluxo contínuo que sustenta o acúmulo de reservas e assegura a adequada formação dos grãos, influenciando diretamente seu tamanho, peso e qualidade final (Damatta *et al.*, 2007; Alves, 2008; Damatta *et al.*, 2019; Nascimento *et al.*, 2021; Damatta; Martins; Ramalho, 2025).

Durante esse período, os frutos atuam como os principais drenos metabólicos da planta, competindo intensamente pelos fotoassimilados produzidos nas folhas e pelas reservas acumuladas nos ramos produtivos. O sucesso do enchimento depende da manutenção de elevadas taxas fotossintéticas e da eficiência dos mecanismos de transporte no floema, que garantem o suprimento contínuo de compostos orgânicos necessários à formação do endosperma. Dessa forma, qualquer limitação na disponibilidade hídrica repercute diretamente sobre a capacidade da planta de sustentar o crescimento e o acúmulo de reservas nos frutos em desenvolvimento.

Sob estresse hídrico severo, os frutos, que atuam como drenos preferenciais, podem exaurir as reservas dos ramos produtivos, levando ao fenômeno do depauperamento. Nesse cenário de escassez, a planta passa a priorizar a manutenção de suas funções vitais e a sobrevivência celular em detrimento da deposição de sólidos solúveis nos grãos. As implicações são drásticas e multifatoriais: a interrupção desse aporte culmina na formação de grãos “chochos” ou de menor peneira e, simultaneamente, compromete a complexidade química da bebida (Ferreira *et al.*, 2019).

Além das perdas quantitativas, o déficit hídrico durante o enchimento dos grãos compromete atributos diretamente relacionados à qualidade física da produção. A redução do fluxo de fotoassimilados limita o acúmulo de matéria seca e reduz a densidade dos grãos, aumentando a ocorrência de sementes mal formadas, leves e com menor uniformidade. Esses efeitos repercutem negativamente sobre a classificação física do café, reduzindo o rendimento após o beneficiamento e a proporção de grãos retidos em peneiras superiores (Damatta *et al.*, 2019; Damatta; Martins; Ramalho, 2025).

Em situações mais severas, para esses mesmos autores, o comprometimento do enchimento pode resultar na formação de grãos chochos, caracterizados pelo baixo peso específico e pela reduzida capacidade de expressão do potencial qualitativo da bebida, situação frequentemente observada em lavouras submetidas a déficit hídrico durante a fase de enchimento dos grãos.

As consequências do déficit hídrico durante o enchimento dos frutos são evidenciadas nas Figuras 15a e 15b, nas quais se observa a formação de grãos

mal desenvolvidos e chochos em comparação com grãos adequadamente preenchidos. Os reflexos da deficiência hídrica estendem-se também à composição química dos grãos. A limitação no transporte de açúcares, aminoácidos e compostos precursores dos atributos sensoriais interfere diretamente na formação do perfil químico responsável pelo aroma, sabor, doçura, acidez e equilíbrio da bebida (Damatta *et al.*, 2019; Ferreira *et al.*, 2019; Damatta; Martins; Ramalho, 2025).



Figuras 15a e 15b. Efeitos do déficit hídrico durante a fase de enchimento dos grãos: formação de grãos mal desenvolvidos e “chochos” em comparação com grãos normais. Fonte: (a) Rehagro, 2025; e (b) elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (Google Gemini).

Consequentemente, mesmo quando a produtividade não é drasticamente reduzida, a qualidade final do café pode ser comprometida em razão das alterações ocorridas durante o enchimento dos frutos. Esses impactos evidenciam que a disponibilidade hídrica nessa fase influencia não apenas a quantidade produzida, mas também o valor agregado e a expressão do potencial

genético da cultivar na xícara (Damatta *et al.*, 2019; Damatta; Martins; Ramalho, 2025).

Dessa forma, a manutenção de condições hídricas adequadas durante o enchimento dos grãos não apenas preserva a produtividade da lavoura, mas também constitui um fator determinante para a obtenção de cafés de elevada qualidade física e sensorial (Damatta *et al.*, 2007; Alves, 2008; Nascimento *et al.*, 2021).

Em cenários de estresse hídrico agudo e persistente, a planta pode manifestar a anomalia denominada “coração negro” (Figura 16). Esse fenômeno, resultante da necrose dos tecidos internos do grão, representa uma perda extremamente severa, pois compromete simultaneamente a qualidade física, o potencial sensorial e o valor comercial do café beneficiado (Ferreira *et al.*, 2019; Nascimento *et al.*, 2021).



Figura 16. Efeito do déficit hídrico severo sobre a qualidade dos grãos: ocorrência de “coração negro”, caracterizada pela necrose dos tecidos internos e pela perda do valor físico e sensorial do café. Fonte: Notícias Agrícolas, 2014.

Em situações nas quais o déficit hídrico se prolonga por períodos extensos e coincide com fases críticas do desenvolvimento dos frutos, os danos deixam de se restringir à redução do enchimento dos grãos e passam a comprometer a

integridade dos tecidos internos. A intensa limitação do fluxo de água e nutrientes para os frutos provoca desequilíbrios metabólicos, acelera processos degenerativos e favorece a morte celular em regiões específicas da semente. Como consequência, surgem alterações fisiológicas irreversíveis que comprometem severamente a qualidade física e sensorial do café, tornando os defeitos perceptíveis mesmo após o beneficiamento e a torrefação.

Adicionalmente aos danos estruturais, a escassez de água compromete a composição fitoquímica da semente, alterando elementos essenciais para a qualidade final. Compostos precursores do sabor e aroma, como lipídios, açúcares redutores e ácidos clorogênicos, têm sua síntese e acúmulo comprometidos sob estresse (Rocha *et al.*, 2018; Laviola *et al.*, 2020). O resultado é uma bebida com perfil sensorial empobrecido, privando o produtor do acesso aos mercados de cafés especiais. Portanto, a manutenção de níveis ótimos de umidade no solo durante o enchimento não é apenas uma medida de produtividade, mas um ato de preservação da essência e da qualidade que definem a cafeicultura de excelência.

7. Maturação dos frutos

A fase de maturação caracteriza-se por uma série de transformações bioquímicas responsáveis pela consolidação da qualidade final do café. Nesse período, ocorre degradação gradual da clorofila, síntese e acúmulo de pigmentos, alterações na composição da mucilagem e intensificação do metabolismo de compostos associados ao aroma e ao sabor da bebida. Paralelamente, os frutos aproximam-se do estágio cereja, considerado ideal para a colheita de cafés de maior qualidade. A uniformidade desse processo é fundamental para garantir lotes homogêneos e maximizar o potencial físico e sensorial da produção (Laviola *et al.*, 2020; Nascimento *et al.*, 2021) (Figura 17).

A desuniformidade da maturação constitui uma das consequências mais frequentes do déficit hídrico durante a fase final de desenvolvimento dos frutos. A ocorrência de períodos de estresse hídrico alternados com chuvas ou irrigações tardias pode estimular sucessivas floradas e gerar diferentes ciclos reprodutivos dentro da mesma lavoura. Como resultado, frutos originados em

momentos distintos passam a coexistir na planta, apresentando ritmos diferenciados de crescimento e maturação. Esse descompasso fenológico compromete a uniformidade da colheita e reduz a eficiência das operações de pós-colheita, tornando mais difícil a obtenção de lotes homogêneos e de elevada qualidade.



Figura 17. Desenvolvimento fenológico da maturação dos frutos do cafeeiro (M1 a M5): evolução dos estádios do fruto verde ao maduro e identificação do ponto ideal de colheita (M3). Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

A escassez hídrica nesta etapa final compromete, primordialmente, a homogeneidade do processo. Sob estresse, a planta perde a capacidade de sincronizar a maturação de seus frutos, resultando em ramos que exibem, simultaneamente, frutos em estágios de “verde”, “cereja” e “passa” (Figura 18). Para o cafeicultor, esse descompasso fenológico é um desafio logístico e econômico: ele impõe uma colheita com alta variabilidade, o que dificulta o processamento pós-colheita, eleva o índice de defeitos e, por consequência, reduz o rendimento líquido e a rentabilidade da safra (Alves, 2008; Ferreira *et al.*, 2019; Damatta *et al.*, 2019; Damatta; Martins; Ramalho, 2025).

A Figura 18 materializa uma das principais consequências do déficit hídrico sobre a dinâmica fenológica do cafeeiro: a desuniformidade da maturação dos frutos. Como discutido anteriormente, períodos de estresse hídrico sem o devido controle agrônomo podem desencadear sucessivas floradas e diferentes ciclos de desenvolvimento reprodutivo ao longo da mesma

safrá. Como resultado, observa-se a coexistência de frutos verdes, cereja e passa no mesmo ramo, caracterizando um quadro de elevada heterogeneidade fenológica. Essa falta de uniformidade não apenas eleva os custos operacionais da colheita seletiva, mas também compromete a qualidade do lote, uma vez que a presença de frutos em diferentes estágios de maturação interfere diretamente na composição química dos grãos, na eficiência da secagem e na padronização sensorial da bebida.



Figura 18. Desuniformidade da maturação dos frutos do cafeeiro em decorrência do déficit hídrico, evidenciando a coexistência de frutos verdes, cereja e passa no mesmo ramo produtivo. Fonte: Cafeicultura, 2010.

Além dos obstáculos operacionais, a maturação desuniforme é um entrave a excelência sensorial. A presença de frutos colhidos fora do ponto ideal, seja pela imaturidade ou pelo excesso de seca no pé, introduz notas indesejadas de adstringência, sabores herbáceos ou fermentações descontroladas na bebida (Rocha *et al.*, 2018). Nesse sentido, a gestão hídrica criteriosa até as vésperas da colheita, aliada ao uso de indicadores precisos de maturação e ao

planejamento do escalonamento, não são apenas práticas de manejo, mas estratégias essenciais para preservar o potencial qualitativo que a planta construiu ao longo de todo o ano.

8. Estratégias para mitigação dos efeitos do déficit hídrico

A compreensão da dinâmica hídrica no cafeeiro revela que a deficiência de água não deve ser vista apenas como um fator limitante, mas como uma variável de manejo. Em momentos específicos, como na fase de indução floral e diferenciação de gemas (Fase 2), o estresse hídrico leve e controlado atua como um gatilho fisiológico fundamental. Essa “sede estratégica” promove uma florada mais uniforme e concentrada, o que simplifica o manejo e potencializa a produtividade da safra (Meireles *et al.*, 2009; Ferreira *et al.*, 2019; Damatta; Martins; Ramalho, 2025).

Entretanto, a linha entre o estímulo positivo e o dano severo é tênue. Qualquer intensificação ou prolongamento imprevisto do estresse pode desencadear perdas em cascata, especialmente nas fases de granação inicial (Fase 3) e enchimento do grão (Fase 4). Nesses estágios, a planta é altamente dependente da água para o transporte de fotoassimilados, para a expansão celular dos frutos e para a biossíntese dos compostos responsáveis pela qualidade física e sensorial da bebida. Diante dessa sensibilidade fisiológica, a cafeicultura moderna exige a implantação de estratégias robustas de mitigação e adaptação às oscilações climáticas.

Além da irrigação, a mitigação dos efeitos do déficit hídrico envolve um conjunto integrado de práticas conservacionistas voltadas à ampliação da resiliência dos sistemas cafeeiros. Entre elas destacam-se a manutenção da cobertura vegetal nas entrelinhas, o uso de plantas de cobertura, a incorporação de matéria orgânica ao solo, a redução da evaporação superficial e a adoção de sistemas agroflorestais capazes de melhorar o microclima da lavoura. Essas estratégias contribuem para aumentar a infiltração e o armazenamento de água no solo, reduzindo a vulnerabilidade dos cafeeiros durante os períodos de estiagem (Souza, 2026e).

Nesse contexto, as tecnologias de irrigação localizada, como o gotejamento e a microaspersão, consolidam-se como ferramentas de precisão. Elas permitem ao gestor aplicar lâminas de água adequadas diretamente na zona radicular ativa, minimizando perdas por evaporação e garantindo que a planta atavesse os períodos críticos sem entrar em exaustão fisiológica (Figura 19).

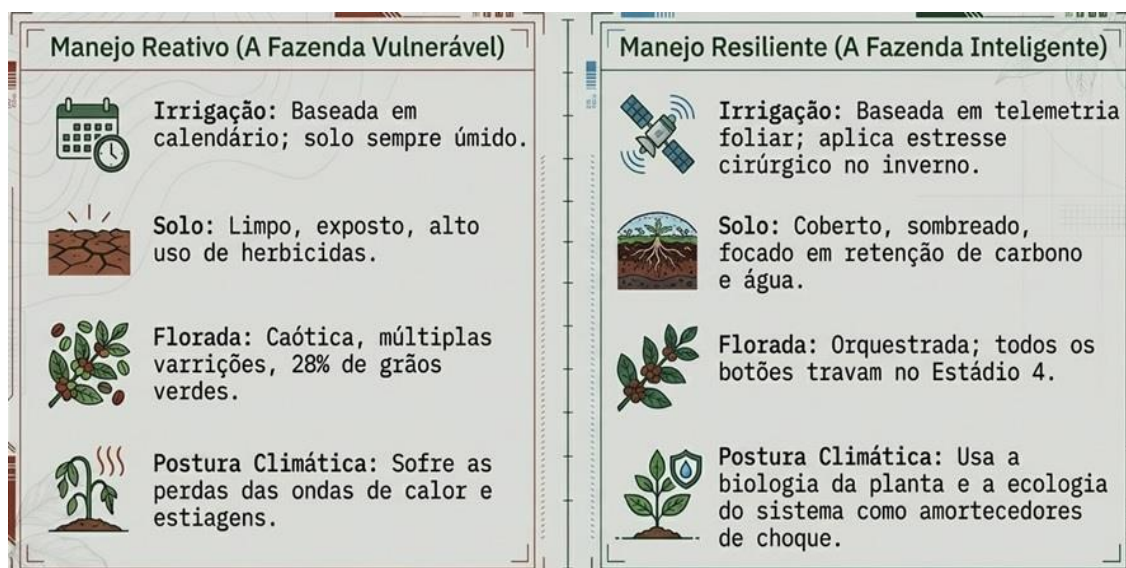


Figura 19. Da vulnerabilidade climática à cafeicultura inteligente: integração entre monitoramento, irrigação de precisão e manejo hídrico estratégico para mitigação dos efeitos do déficit hídrico. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Associadas ao monitoramento da umidade do solo, ao uso de sensores e às ferramentas de agricultura digital, essas tecnologias representam um dos pilares da chamada cafeicultura inteligente, na qual as decisões de manejo passam a ser fundamentadas em informações climáticas e fisiológicas em tempo real (Ferreira *et al.*, 2019; Mantovani; Soares; Bernardo, 2021)

Complementarmente, o manejo conservacionista do solo emerge como um pilar de sustentabilidade e resiliência. A manutenção de coberturas vegetais, sejam elas vivas ou mortas, como braquiárias e leguminosas, cria um microclima favorável, reduzindo a temperatura do solo e aumentando sua capacidade de retenção hídrica (Cunha *et al.*, 2022; Souza, 2026e). Esse aporte contínuo de matéria orgânica melhora as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, favorecendo a infiltração da água, reduzindo perdas por escoamento superficial e ampliando o armazenamento hídrico no perfil explorado pelas raízes.

Além da conservação da umidade, a cobertura permanente do solo estimula a atividade microbiológica, favorece a formação e estabilidade dos agregados e reduz significativamente os processos erosivos. Como consequência, o sistema radicular do cafeeiro passa a explorar um ambiente mais equilibrado e biologicamente ativo, aumentando sua eficiência na absorção de água e nutrientes. Em cenários de irregularidade pluviométrica, essas condições contribuem para reduzir os impactos dos veranicos e aumentar a estabilidade produtiva das lavouras (*ibidem*).

Além dos benefícios proporcionados pela cobertura permanente do solo, estratégias integradas de manejo, como a arborização dos cafezais e os sistemas agroflorestais, ampliam a capacidade de conservação hídrica e de regulação microclimática. A presença de árvores reduz a incidência direta da radiação solar, atenua as oscilações térmicas e contribui para a manutenção de condições mais favoráveis ao desenvolvimento do cafeeiro durante períodos de déficit hídrico (*ibidem*) (Figura 20).



Figura 20. Integração café-árvore como estratégia de adaptação climática: conservação da água, regulação microclimática e resiliência dos sistemas cafeeiros. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Os benefícios dessas práticas transcendem a simples conservação da água. A integração entre cobertura do solo, matéria orgânica, biodiversidade

funcional e manejo nutricional equilibrado fortalece os mecanismos fisiológicos de adaptação das plantas ao estresse hídrico. Dessa forma, sistemas cafeeiros conduzidos sob princípios conservacionistas apresentam maior capacidade de resistência e recuperação frente aos eventos climáticos extremos, constituindo uma importante estratégia de adaptação às mudanças climáticas e de fortalecimento da sustentabilidade da cafeicultura.

No planejamento de novas áreas, a dimensão genética assume um papel determinante na construção da resiliência. A seleção de cultivares desenvolvidas especificamente para a tolerância à seca, fruto de avançados programas de melhoramento, assegura não apenas uma maior eficiência no uso da água, mas a estabilidade produtiva necessária para enfrentar a irregularidade das chuvas (Carvalho, 2008; Nunes *et al.*, 2021).

Complementarmente, a integração de geotecnologias e o monitoramento remoto elevam o patamar da gestão agrônoma. Por meio de sensores espectrais, *drones* e imagens de satélite, torna-se possível identificar o estresse hídrico em sua fase silenciosa, antes mesmo da manifestação de sintomas visíveis a olho nu. Ao associar esse diagnóstico precoce a modelos de previsão climática, o produtor deixa de ser um observador passivo das intempéries para tornar-se um estrategista, transformando o que seria uma resposta reativa em uma gestão preventiva e adaptativa (Gontijo *et al.*, 2020).

9. Agroecologia: da mitigação do estresse hídrico à construção de agroecossistemas resilientes

A agroecologia, enquanto ciência e prática integradora que aplica princípios ecológicos à agricultura, oferece um caminho robusto para a mitigação dos impactos do déficit hídrico no cafeeiro (*Coffea arabica* L.). Seus fundamentos transcendem o manejo isolado da planta, priorizando a recuperação da saúde do ecossistema e o fortalecimento da resiliência das lavouras. Entre as práticas centrais, destaca-se a manutenção de coberturas vegetais permanentes, como braquiárias e leguminosas, que reduzem a evaporação direta do solo, favorecem a infiltração da água da chuva e melhoram a porosidade biológica. Como resultado, promove-se maior retenção de umidade e maior estabilidade hídrica

no sistema produtivo (Altieri, 2009; Cunha *et al.*, 2022; Souza, 2025; Souza, 2026e; Sousa *et al.*, 2026).

A revitalização do solo por meio da adubação orgânica e da adubação verde constitui um pilar estratégico para a sustentabilidade do sistema produtivo. Ao elevar os teores de matéria orgânica, essas práticas promovem melhorias na estrutura do solo, ampliando sua capacidade de retenção hídrica e reduzindo os efeitos da compactação. Nesse contexto, o solo deixa de atuar apenas como suporte mecânico e passa a exercer importante função reguladora, favorecendo a eficiência do uso da água e contribuindo para o suprimento hídrico das plantas durante períodos de estiagem (Silva; Souza, 2021; Souza, 2026b) (Figura 21).



Figura 21. Relação entre qualidade biológica do solo, desenvolvimento radicular e resiliência hídrica do cafeeiro em sistemas agroecológicos. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Além dos benefícios físicos proporcionados ao solo, os sistemas agroecológicos favorecem o restabelecimento de processos ecológicos essenciais à estabilidade hídrica dos agroecossistemas. O aumento da biodiversidade vegetal estimula a atividade da fauna edáfica e dos microrganismos do solo, intensificando a ciclagem de nutrientes, a formação de agregados estáveis e o desenvolvimento de sistemas radiculares mais profundos. O incremento da matéria orgânica também melhora a infiltração e a retenção de água, fortalecendo a capacidade adaptativa dos cafeeiros frente aos períodos de restrição hídrica.

Como consequência, ocorre maior exploração do perfil do solo pelas raízes e ampliação da capacidade de absorção de água durante períodos de baixa disponibilidade hídrica. Essa interação entre solo, plantas e organismos vivos constitui um dos principais mecanismos pelos quais a agroecologia fortalece a resiliência dos sistemas cafeeiros frente aos eventos climáticos extremos. Dessa forma, a qualidade biológica do solo deixa de ser apenas um indicador ecológico e passa a representar um componente estratégico para a sustentabilidade e a estabilidade produtiva da cafeicultura.

Adicionalmente, o sombreamento estratégico em sistemas agroflorestais desempenha um papel vital na regulação térmica e hídrica da lavoura. A presença de espécies arbóreas atua como um escudo pedológico, atenuando a incidência da radiação solar direta sobre o dossel do cafeeiro e reduzindo a taxa de evapotranspiração. Esse arranjo eleva a umidade relativa no microclima, protegendo a integridade fisiológica da planta precisamente nas fases de maior vulnerabilidade reprodutiva (Laviola *et al.*, 2020; Mogor *et al.*, 2020).

Essa configuração sistêmica extrapola a proteção imediata, promovendo uma estabilidade funcional que favorece a longevidade dos ramos produtivos. Ao suavizar os picos de temperatura foliar, o sistema agroflorestal evita o fechamento estomático precoce nas horas de maior demanda evaporativa, permitindo que a planta mantenha sua atividade fotossintética por períodos mais prolongados. Essa harmonia entre a biologia do solo e a arquitetura do sistema é o que define a verdadeira engenharia de resiliência, transformando a paisagem agrícola em um ecossistema produtivo capaz de autorregular-se frente aos desafios do novo normal climático (Altieri; Nicholls, 2017; Salvador *et al.*, 2025).

Inversamente, para esses mesmos autores, a desconsideração desses processos ecossistêmicos expõe a cafeicultura a elevados níveis de vulnerabilidade ambiental e produtiva. Em sistemas de monocultivo a pleno sol e solos desprovidos de cobertura vegetal, a ausência de mecanismos biológicos de regulação favorece a degradação da matéria orgânica, a compactação superficial e a redução da infiltração de água no perfil do solo.

Como consequência, ocorre menor disponibilidade hídrica para as raízes, aumento da temperatura edáfica e redução da atividade biológica, comprometendo processos fundamentais para o desenvolvimento do cafeeiro.

Nesse cenário de fragilidade agroecológica, períodos de veranico tendem a desencadear respostas fisiológicas mais intensas, ampliando os riscos de estresse hídrico, redução do crescimento vegetativo, comprometimento da formação de gemas florais e diminuição do potencial produtivo da safra subsequente (Figura 22).



Figura 22. Vulnerabilidade hídrica em sistemas cafeeiros degradados: efeitos da baixa matéria orgânica e da degradação estrutural do solo sobre a retenção de água e a saúde do cafeeiro. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Nesse sentido, a diversificação biológica inerente aos consórcios agroecológicos atua como uma estratégia de alívio da pressão hídrica sobre o sistema. Ao promover o equilíbrio ecológico e o controle natural de pragas, a agroecologia reduz a dependência de insumos externos e intervenções químicas que, muitas vezes, elevam o estresse metabólico da planta e, consequentemente, sua demanda por água. Assim, o manejo da biodiversidade deixa de ser um componente meramente ambiental para tornar-se um regulador da eficiência hídrica e da resiliência econômica do produtor (Altieri; Nicholls, 2017; Salvador *et al.*, 2025).

Soma-se a essa engenharia de resiliência a valorização do saber local e a seleção participativa de variedades adaptadas às especificidades de cada território. Esse processo transcende a simples escolha técnica, configurando-se

como um resgate da soberania genética do produtor. Ao invés de depender exclusivamente de pacotes tecnológicos padronizados, a seleção participativa permite que o cafeicultor identifique, em seu próprio ecossistema, os genótipos que demonstram maior rusticidade e estabilidade produtiva sob as condições reais de estresse hídrico e variações térmicas regionais (Caporal; Costabeber, 2004; Machado; Machado Filho, 2014; Gliessman, 2015; Souza, 2026b).

Essa abordagem promove uma produção mais autônoma e harmonizada com as realidades climáticas, uma vez que as variedades selecionadas localmente carregam uma “memória de adaptação” ao bioma. Diferente das cultivares de alto desempenho em ambientes controlados, os materiais rústicos priorizam o equilíbrio metabólico e o vigor radicular, garantindo a perenidade da lavoura mesmo em cenários de incerteza climática. Assim, a integração entre o conhecimento empírico do cafeicultor e os princípios da agroecologia transforma o território em um laboratório vivo, onde a diversidade genética atua como o principal ativo de segurança econômica e ambiental (Souza, 2026e).

Sob essa perspectiva, a resiliência hídrica deixa de ser interpretada como uma característica isolada da planta e passa a ser compreendida como uma propriedade emergente do agroecossistema. A interação entre diversidade genética, qualidade biológica do solo, cobertura vegetal permanente e conhecimento local gera mecanismos complementares de adaptação capazes de reduzir os impactos das oscilações climáticas.

Em vez de depender exclusivamente de insumos externos para corrigir desequilíbrios ambientais, os sistemas agroecológicos fortalecem processos naturais de autorregulação, tornando a produção mais estável, eficiente e sustentável ao longo do tempo. Essa visão sistêmica evidencia que a segurança hídrica da cafeicultura está diretamente relacionada à capacidade do agroecossistema de conservar biodiversidade, reciclar nutrientes e manter sua funcionalidade ecológica diante das adversidades climáticas (Figura 23).

A lógica agroecológica de manejo da água não se limita à conservação da umidade no solo ou à redução das perdas por evaporação. Ela incorpora uma visão integrada da paisagem, na qual a água da chuva é compreendida como um recurso estratégico que deve ser captado, armazenado e utilizado de forma racional dentro do próprio agroecossistema. Nesse contexto, práticas voltadas à

infiltração da água no solo, à recarga dos aquíferos e à redução do escoamento superficial tornam-se componentes fundamentais para a construção da segurança hídrica das propriedades rurais. Além de reduzirem a vulnerabilidade dos cultivos durante os períodos de estiagem, essas estratégias contribuem para a conservação dos recursos hídricos em escala de microbacia, fortalecendo simultaneamente a sustentabilidade produtiva e ambiental dos territórios cafeeiros (Souza, 2018).

Estratégia	Retenção Hídrica	Ciclagem Nutricional	Impacto Ambiental
Vegetação Espontânea 	Baixa / Média (Compete na seca)	Média (Adiciona Nitrogênio)	Positivo
Filme de Polietileno (Mulching) 	Altíssima (Bloqueia evaporação)	Nula	Passivo ambiental (Geração de resíduos)
Braquiária (Urochloa decumbens) 	Alta	Altíssima (Aumenta o potássio em até 50%)	Extremamente Positivo (Biomassa contínua)

Figura 23. Manejo conservacionista e resiliência hídrica na cafeicultura: análise comparativa da vegetação espontânea, do filme de polietileno e da braquiária quanto à retenção de água, ciclagem nutricional e sustentabilidade ambiental. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

No campo das soluções hídricas, a agroecologia incorpora tecnologias sociais de gestão da água de baixo impacto e alta eficiência, como a construção de cisternas e barraginhas para a captação e armazenamento de águas pluviais (Figura 24). Essas estruturas, aliadas ao monitoramento atento e empírico do clima pelo produtor, criam uma rede de segurança contra períodos de escassez prolongada (Nora *et al.*, 2015; Menon *et al.*, 2025). Assim, a abordagem agroecológica não apenas propõe técnicas de sobrevivência à seca, mas promove uma gestão integrada e ética dos recursos naturais, fundindo ciência e tradição para assegurar o futuro da cafeicultura frente às incertezas globais.



Figura 24. Tecnologias socioambientais para conservação da água: contribuição de barraginhas e cochinchos para a infiltração, retenção hídrica e recarga de aquíferos em Atílio Vivácqua, Espírito Santo. Fonte: Acervo Márcio Menon, 2025.

As tecnologias socioambientais de conservação da água demonstram que a resiliência hídrica da cafeicultura depende da integração entre práticas de manejo, conservação dos recursos naturais e planejamento territorial. Entretanto, mesmo em sistemas conduzidos sob princípios agroecológicos, a capacidade de resposta da lavoura aos eventos climáticos extremos permanece condicionada às características genéticas das plantas cultivadas. Nesse contexto, a escolha de cultivares adaptadas às condições edafoclimáticas locais assume papel estratégico, complementando os benefícios proporcionados pelo manejo conservacionista e ampliando a capacidade dos cafezais de suportar períodos prolongados de deficiência hídrica sem perdas expressivas de produtividade e qualidade.

10. Cultivares de café com maior resiliência ao estresse hídrico

A seleção de cultivares geneticamente adaptadas a regimes de restrição hídrica constitui uma das estratégias mais eficazes para assegurar a sustentabilidade da cafeicultura moderna. Em um cenário de alta variabilidade climática, o avanço dos programas de melhoramento genético no Brasil tem sido

um divisor de águas, permitindo a obtenção de materiais de *Coffea arabica* que aliam a tolerância à seca à alta produtividade e a excelência sensorial.

Dentre os materiais de destaque, as cultivares “Catucaí Amarelo 2SL”, “Acauã”, “Siriema” e “Araponga MG1” têm demonstrado um desempenho agrônômico superior sob déficit hídrico moderado. Essa resiliência não é fruto do acaso, mas de adaptações morfofisiológicas específicas: sistemas radiculares mais profundos e ramificados, mecanismos de fechamento estomático mais eficientes e uma maior capacidade de recuperação da hidratação tecidual (Carvalho, 2008; Ramalho *et al.*, 2014).

A cultivar “Acauã”, por exemplo, consolidou-se em regiões de Cerrado e no semiárido brasileiro devido à sua notável estabilidade produtiva mesmo em anos de pluviosidade escassa. Paralelamente, o “Catucaí 2SL” destaca-se por harmonizar a tolerância ao estresse com uma maturação uniforme, característica que o torna ideal para sistemas agroecológicos e consórcios, onde o manejo da luz e da água é mais complexo (Martins *et al.*, 2015). Já o “Siriema” é reconhecido por sua rusticidade e vigor vegetativo, apresentando-se como uma opção segura para áreas de sequeiro e altitudes intermediárias.

Adicionalmente, materiais como o “IAC 125 RN” e o “IAC Obatã 1669-20” têm comprovado sua adaptabilidade a sistemas com baixa disponibilidade hídrica, sendo recomendados para lavouras que utilizam irrigação de precisão ou estratégias de déficit controlado (Carvalho *et al.*, 2010).

Entretanto, o potencial genético de uma cultivar somente se expressa plenamente quando associado a condições ambientais favoráveis e a práticas de manejo adequadas. Os avanços obtidos pelos programas de melhoramento genético evidenciam que a adaptação às condições de déficit hídrico não depende exclusivamente do aumento da produtividade ou da tolerância fisiológica das plantas. A estabilidade produtiva em ambientes sujeitos à irregularidade climática resulta da interação contínua entre o potencial genético da cultivar, as características ambientais do local de cultivo e as práticas de manejo adotadas pelo produtor (Carvalho, 2008; DaMatta *et al.*, 2018; Ferrão *et al.*, 2019).

Dessa forma, cultivares reconhecidas por sua rusticidade tendem a expressar melhor seu desempenho quando cultivadas em solos bem estruturados, com adequada disponibilidade de matéria orgânica e sob sistemas de manejo que favoreçam a conservação da água. Essa interação sinérgica entre genética, ambiente e manejo constitui a base para a construção de sistemas cafeeiros mais resilientes e sustentáveis frente aos desafios impostos pelas mudanças climáticas (Figura 25).



Figura 25. Construção da resiliência na cafeicultura: a interação entre genética, ambiente e manejo como determinante da tolerância ao déficit hídrico. Fonte: elaborada por Maurício Novaes (2026), com auxílio de IA (NotebookLM).

Para que o potencial de tolerância se manifeste plenamente, a escolha do material deve estar intrinsecamente ligada a um manejo conservacionista que preserve a saúde do solo e a eficiência hídrica. A genética oferece o alicerce, mas é o manejo atento que garante a resiliência e a longevidade da lavoura frente aos desafios ambientais. Nessa perspectiva, a tolerância à seca deixa de ser compreendida como uma característica isolada do DNA da cultivar e passa a ser interpretada como o resultado da interação dinâmica entre genética, ambiente e manejo, constituindo uma propriedade emergente de agroecossistemas equilibrados e resilientes (Carvalho, 2008; DaMatta *et al.*, 2018; Ferrão *et al.*, 2019).

Para esses mesmos autores, a interação entre as raízes profundas de materiais geneticamente melhorados e a estrutura porosa de solos ricos em

matéria orgânica cria uma rede de segurança que mitiga as flutuações extremas de disponibilidade hídrica. É esta sinergia que permite ao cafeicultor não apenas sobreviver aos eventos climáticos adversos, mas manter a estabilidade econômica e a qualidade sensorial de sua produção. Portanto, a transição para uma cafeicultura regenerativa exige que o produtor atue como gestor de agroecossistemas complexos, integrando inovação tecnológica, melhoramento genético e práticas conservacionistas capazes de fortalecer a resiliência hídrica, a estabilidade produtiva e a sustentabilidade da atividade cafeeira no longo prazo.

11. Considerações

O déficit hídrico consolida-se como um dos fatores ambientais de maior influência sobre a ontogenia do cafeeiro (*Coffea arabica* L.), atuando diretamente sobre os processos fisiológicos, reprodutivos e produtivos que determinam o desempenho da cultura. Ao longo das diferentes fases fenológicas, a disponibilidade de água exerce funções específicas e indispensáveis, influenciando desde a diferenciação das gemas florais até a formação, o enchimento e a maturação dos frutos. Esta revisão demonstrou que a relação entre o cafeeiro e o regime hídrico é complexa e multifacetada, exigindo uma compreensão integrada dos mecanismos fisiológicos que regulam o desenvolvimento da planta.

Os resultados apresentados evidenciam que a sensibilidade ao déficit hídrico varia conforme o estágio fenológico. Enquanto restrições hídricas moderadas e controladas podem desempenhar papel positivo na uniformização da florada, déficits prolongados ou intensos comprometem severamente os processos de frutificação e enchimento dos grãos. O abortamento floral, a queda de chumbinhos, a redução do crescimento dos frutos, a formação de grãos chochos e a ocorrência de anomalias fisiológicas, como o “coração negro”, constituem manifestações claras dos impactos do estresse hídrico sobre a produtividade e a qualidade do café.

Além das perdas quantitativas, os efeitos da deficiência hídrica repercutem diretamente sobre a qualidade física e sensorial da bebida. A limitação na

translocação de fotoassimilados e compostos precursores do aroma interferem na formação do perfil químico dos grãos, reduzindo atributos como doçura, acidez, complexidade aromática e equilíbrio sensorial. Da mesma forma, a desuniformidade da maturação compromete a eficiência da colheita e do processamento pós-colheita, dificultando a obtenção de lotes homogêneos e de elevado valor agregado.

Diante desse cenário, a adaptação da cafeicultura aos novos desafios climáticos exige uma abordagem integrada, capaz de combinar tecnologias modernas e princípios ecológicos. Estratégias como irrigação localizada, monitoramento da umidade do solo, uso de sensores, geotecnologias e ferramentas de agricultura digital ampliam a capacidade de diagnóstico e permitem uma gestão mais eficiente dos recursos hídricos. Paralelamente, práticas conservacionistas, como a manutenção de coberturas vegetais, a adubação verde, o incremento da matéria orgânica, os sistemas agroflorestais e as tecnologias sociais de captação de água, fortalecem a capacidade de retenção hídrica dos agroecossistemas e reduzem sua vulnerabilidade frente aos períodos de estiagem.

A agroecologia emerge, nesse contexto, não apenas como um conjunto de práticas, mas como uma estratégia de reconstrução da resiliência dos sistemas cafeeiros. Ao promover a biodiversidade funcional, a conservação do solo, a valorização dos conhecimentos locais e a gestão integrada da paisagem, essa abordagem amplia a capacidade adaptativa das propriedades rurais e fortalece a sustentabilidade ambiental, social e econômica da atividade.

Adicionalmente, os avanços dos programas de melhoramento genético demonstram que a seleção de cultivares adaptadas às condições de déficit hídrico representa um importante componente da estratégia de adaptação climática. Entretanto, a tolerância à seca não deve ser compreendida como uma característica isolada do material genético, mas como o resultado da interação dinâmica entre genótipo, ambiente e manejo. A estabilidade produtiva e a qualidade da bebida dependem da sinergia entre cultivares adequadas, solos saudáveis, disponibilidade hídrica e práticas de manejo compatíveis com as condições locais.

Dessa forma, é possível concluir que a construção de uma cafeicultura resiliente demanda uma visão sistêmica, na qual água, solo, biodiversidade, genética e gestão atuam de forma integrada. Em um cenário marcado pela crescente frequência de eventos climáticos extremos, a sustentabilidade da produção cafeeira dependerá da capacidade dos produtores e das instituições de pesquisa em promover sistemas produtivos mais eficientes, regenerativos e adaptados às novas condições ambientais. Mais do que um desafio agrônômico, a gestão hídrica passa a representar um compromisso estratégico com a segurança alimentar, a conservação dos recursos naturais, a competitividade da cafeicultura brasileira e o futuro das regiões produtoras.

12. Referências

AGROADVANCE. **Colheita de café**: tudo o que você precisa saber. Disponível em: <https://agroadvance.com.br/blog-colheita-de-cafe/>. Acesso em: 2 abr. 2024.

ALMEIDA, S. R. de; ALMEIDA, A. R. de; RIBEIRO, M. de F.; SILVA, M. A. V.; CARVALHO, G. R. Fenologia do cafeeiro: aplicações e perspectivas para a cafeicultura brasileira. **Cadernos de Agroecologia**, [S. l.], v. 11, n. 2, p. 1-8, 2016.

ALTIERI, M. A. **Agroecologia**: bases científicas para uma agricultura sustentável. 3. ed. São Paulo: Expressão Popular, 2009.

ALTIERI, M. A.; NICHOLLS, C. I. **Agroecologia e os princípios da agricultura sustentável**. São Paulo: Expressão Popular, 2017.

ALTIERI, M. A.; NICHOLLS, C. I.; HENAO, A.; LANA, M. A. Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. **Agronomy for sustainable development**, v. 35, n. 3, p. 869-890, 2015.

ALVES, E. R.; SILVA, T. M. da; SOUZA, F. A. de; SANTOS, R. C. dos. Impact of water deficit on the development and chemical composition of coffee fruits. **Journal of Agricultural Science**, [S. l.], v. 12, n. 4, p. 88-102, 2020.

ALVES, H. M. R.; SILVA, T. M. da; SOUZA, F. A. de; SANTOS, R. C. dos. Ecofisiologia do cafeeiro arábica sob estresse hídrico. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, [S. l.], v. 50, e61552, p. 1-9, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-40632020v5061552>.

ALVES, H. M. R. Impacto do déficit hídrico em fases fenológicas do cafeeiro. **Informe Agropecuário**, v. 29, n. 253, p. 36-45, 2008.

ALVES, J. D. Morfologia do Cafeeiro. In: CARVALHO, C. H. S. (Org.). **Cultivares de Café**. Varginha, MG: EMBRAPA, 2008. p. 31-48. Disponível em:

http://www.sapc.embrapa.br/arquivos/consorcio/publicacoes_tecnicas/Livro_Cultivares.pdf. Acesso em: 24 jul. 2025.

ARRUDA, F. B.; GRANDE, M. A.. Fator de resposta da produção do cafeeiro ao déficit hídrico em Campinas. **Bragantia**, v. 62, n. 1, p. 139-145, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052003000100017>. Acesso em: 18 jun. 2025.

ASSAD, E. D.; PINTO, H. S.; ZULLO JUNIOR, J.; AVILA, A. M. H. de; EVANGELISTA, B. A.; MARIN, F. R. Impactos das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 11, p. 1057-1064, nov. 2004.

BARBOSA, J. N.; VOLTOLINI, G. B.; SOUZA, K. R. D. de; SANTOS, M. O. dos. Relação entre déficit hídrico e produtividade do cafeeiro arábica em diferentes altitudes. **Coffee Science**, Lavras, v. 11, n. 4, p. 489-497, 2016.

BENCKE, C. S. C.; MORELLATO, L. P. C.. Comparação de dois métodos de avaliação da fenologia de plantas, sua interpretação e representação. **Brazilian Journal of Botany**, v. 25, n. 3, p. 269–275, set. 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-84042002000300003>. Acesso em: 18 jun. 2025.

CAMARGO, Â. P. D.; CAMARGO, M. B. P. D.. Definição e esquematização das fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil. **Bragantia**, v. 60, n. 1, p. 65-68, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052001000100008>. Acesso em: 18 jun. 2025.

CAPORAL, F. R.; COSTABEBER, J. A. **Agroecologia: enfoques científicos e estratégicos**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004.

CARVALHO, C. H. S. de (org.). **Cultivares de café: origem, características e recomendações**. Brasília, DF: Embrapa Café, 2008. 334 p.

CARVALHO, G. R.; REIS, T. H. M.; GOMES, A. P. de M.; REIS, A. M. dos; BOTELHO, C. E. Tolerância de cultivares de café arábica à seca. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 31, n. 257, p. 24-33, 2010.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Café: primeiro levantamento, janeiro 2024**. Brasília: Conab, 2024. (Fonte para dados de produção e economia no Brasil).

CUNHA, F. F.; CHITARRA, S. M. G.; REIS, A. C. dos; LEITE, S. A. de F.; SOUZA, J. A. de. Conservação da água e cobertura vegetal no manejo de cafezais em regiões de sequeiro. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 16, n. 3, p. 676–688, 2022. DOI: <https://doi.org/10.7127/rbai.v16n3001481>.

DAMATTA, F. M.; AVILA, R. T.; CARDOSO, A. A.; MARTINS, S. C. V.; RAMALHO, J. C. Physiological and agronomic performance of the coffee crop in the context of climate change and global warming: a review. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 66, n. 21, p. 5264-5274, 2018. DOI: 10.1021/acs.jafc.7b04537.

DAMATTA, F. M.; MARTINS, S. C. V.; RAMALHO, J. D. C. Ecophysiology of coffee growth and production in a context of climate changes. In: DAMATTA, F. M.; RAMALHO, J. C. (Ed.). *Coffee: A Glimpse into the Future*. London: Academic Press/Elsevier, 2025. p. 97-139. **Advances in Botanical Research**, v. 114. DOI: 10.1016/bs.abr.2024.07.004.

DAMATTA, F. M.; RAHN, E.; LÄDERACH, P.; GHINI, R.; RAMALHO, J. C. Why could the coffee crop endure climate change and global warming to a greater extent than previously estimated? **Climatic Change**, v. 152, n. 1, p. 167-178, 2019. DOI: 10.1007/s10584-018-2346-4.

DAMATTA, F. M.; RAMALHO, J. D. C. Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: a review. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 18, p. 55-81, 2006.

DAMATTA, F. M.; RENA, A. B.; CARVALHO, C. H. S. de. Aspectos fisiológicos do crescimento e da produção do cafeeiro. In: CARVALHO, C. H. S. (org.). **Cultivares de Café**. Varginha, MG: EMBRAPA, 2008. p. 49-56. Disponível em: http://www.sapc.embrapa.br/arquivos/consorcio/publicacoes_tecnicas/Livro_Cultivares.pdf. Acesso em: 18 jun. 2025.

DAMATTA, F. M.; RONCHI, C. P.; MAESTRI, M.; BARROS, R. S. Ecophysiology of coffee growth and production. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Londrina, v. 19, n. 4, p. 485–510, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1677-04202007000400014>.

DUBBERSTEIN, D.; PARTELLI, F. L.; MARQUARDT, L. S.; RAMALHO, J. C. Ecophysiological responses of *Coffea canephora* clones to deficit irrigation. **Genetics and Molecular Research**, [S. l.], v. 16, n. 1, p. 1-13, 2017.

FERRÃO, R. G.; FONSECA, A. F. A. da; FERRÃO, M. A. G.; DE MUNER, L. H. (Ed.). **Conilon Coffee**. 3. ed. atual. e ampl. Vitória: Incaper, 2019. 974 p. ISBN 978-85-89274-32-6.

FERREIRA, W. P. M.; SOUZA, C. F. de; OLIVEIRA, A. D. de; RIBEIRO, M. de F.; VOLTOLINI, G. B. Estratégias para mitigação dos impactos do déficit hídrico na cafeicultura. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 40, n. 307, p. 57-66, 2019.

GLIESSMAN, S. R. **Agroecology**: the ecology of sustainable food systems. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2015.

GONTIJO, G. L.; REIS, E. F. dos; SANTOS, A. R. dos; ROCHA, F. S. da; ALVES, T. L. Uso de geotecnologias na cafeicultura: identificação de áreas de estresse e apoio à gestão hídrica. **Revista Agrogeoambiental**, Pouso Alegre, v. 12, n. 1, p. 29-42, 2020. DOI: <https://doi.org/10.18406/2316-1817v12n120201389>.

GONTIJO, T. S.; OLIVEIRA, S. F. de; ALCÂNTARA, E. H. de; GOMES, L. N. Sensoriamento remoto aplicado à identificação de estresse hídrico em cafeeiro. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, Tupã, v. 14, n. 4, p. 385-398, 2020.

LAVIOLA, B. G.; GOMES, A. P. de M.; BOTELHO, C. E.; CARVALHO, G. R.; RESENDE, J. C. de. Compreendendo o ciclo fenológico do cafeeiro para aprimorar o manejo da cultura. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 41, n. 308, p. 44-52, 2020.

LEMES, E. M.; SOUZA, K. R. D. de; CARVALHO, G. R.; BARBOSA, J. N. Maturação de frutos de cafeeiro sob diferentes regimes hídricos. **Coffee Science**, Lavras, v. 10, n. 3, p. 308-316, jul./set. 2015.

MACHADO, L. C. P.; MACHADO FILHO, L. C. P. **Agroecologia 2.0**: princípios e reflexões conceituais. 2. ed. Viçosa, MG: Editora dos Autores, 2014.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; SOARES, A. A. **Manual de Irrigação**. 9. ed. Viçosa: Ed. UFV, 2021. 545 p.

MARTINS, L. D.; SILVA, T. M. da; SOUZA, F. A. de; SANTOS, R. C. dos. Clima e cafeicultura: impactos, adaptação e vulnerabilidade. In: SOUZA, A. P. (org.). **Agrometeorologia aplicada à produção agrícola**. Jaboticabal: Maria de Lourdes Brandel, 2015. p. 125-148.

MARTINS, M. Q.; OLIVEIRA, S. F. de; ALCÂNTARA, E. H. de; GOMES, L. N. Cultivares de café arábica para ambientes com restrição hídrica. **Café Arábica – Manejo e Sustentabilidade**, [S. l.], v. 1, p. 33-46, 2015.

MARTINS, M. Q.; RIBEIRO, M. de F.; SOUZA, K. R. D. de; SANTOS, M. O. dos; CARVALHO, G. R. High-quality coffee production is not compromised by moderate deficit irrigation. **Agricultural Water Management**, [S. l.], v. 221, n. 1, p. 544-553, 2019.

MARTINS, M. Q.; DAMATTA, F. M.; SILVA, T. M. da; REIS, A. M. dos; BOTELHO, C. E. Physiological impacts of drought and recovery on the antioxidative system of *Coffea* species. **Plant Physiology and Biochemistry**, [S. l.], v. 86, p. 1-10, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2014.10.002>.

MEIRELES, E. J. L.; ALVES, H. M. R.; FERREIRA, W. P. M.; REIS, C. O. **Fenologia do cafeeiro**: condições agrometeorológicas e balanço hídrico do ano agrícola 2004–2005. Brasília: Embrapa Café, 2009. 128 p. (Documentos, n. 5). Disponível em: <http://www.sbicafe.ufv.br:80/handle/123456789/3381>. Acesso em: 18 jun. 2025.

MENON, M. M.; SÁ, W. G. de; VIEIRA, R. C.; SOUZA, M. N. Barraginhas e cochinhos em curva de nível: estratégias de conservação do solo e da água em Atílio Vivácqua–ES. In: SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em gestão ambiental. Vol. IV**. Canoas, RS: Mérida Publishers, 2025. p. 196-242. ISBN: 978-65-84548-36-7. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-36-7>.

MOGOR, A. F.; CHITARRA, S. M. G.; REIS, A. C. dos; LEITE, S. A. de F. Sistemas agroflorestais como alternativa para a cafeicultura familiar em áreas de relevo acidentado. **Cadernos de Agroecologia**, [S. l.], v. 15, n. 1, 2020.

MORAIS, H.; CARAMORI, P. H.; RIBEIRO, A. M. de A.; GOMES, J. C.; KOGUISHI, M. S. Escala fenológica detalhada da fase reprodutiva de *Coffea*

arabica. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 1, p. 257-260, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052008000100031>. Acesso em: 21 jun. 2025.

NASCIMENTO, A. R.; VOLTOLINI, G. B.; SOUZA, K. R. D. de; SANTOS, M. O. dos. Qualidade de grãos de café em função do déficit hídrico e do tipo de solo. **Coffee Science**, Lavras, v. 16, p. e161879, 2021. DOI: <https://doi.org/10.25186/cs.v16i.1879>.

NASCIMENTO, M. F.; SILVA, V. A.; SOUZA, K. R. D. de; CARVALHO, G. R.; BOTELHO, C. E. Alterações fisiológicas e produtividade do cafeeiro arábica submetido a diferentes regimes hídricos. **Coffee Science**, Lavras, v. 16, p. e161834, 2021.

NORA, R. D.; CHITARRA, S. M. G.; REIS, A. C. dos; LEITE, S. A. de F. Tecnologias sociais de convivência com o semiárido: experiências em agroecologia. **Revista Extensão Rural**, Santa Maria, n. 22, p. 113-130, 2015.

NUNES, L. S.; SILVA, V. A.; SOUZA, K. R. D. de; CARVALHO, G. R.; BOTELHO, C. E. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo e produtividade de café sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 45, e0200156, 2021.

NUNES, M. A.; ROCHA, F. S. da; ALVES, T. L.; SOUZA, F. A. de; SANTOS, R. C. dos. Resposta fisiológica de cultivares de café arábica ao déficit hídrico em diferentes altitudes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 56, e02603, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2021.v56.02603>.

PIZOL, J. V. Fenologia – Estádios Fenológicos. **Nutrição de Safras**. 1 set. 2021. Disponível em: <https://nutricaodesafras.com.br/estadios-fenologicos-fenologia>. Acesso em: 18 jun. 2025.

RAMALHO, A. R.; SILVA, V. A.; SOUZA, K. R. D. de; CARVALHO, G. R.; BOTELHO, C. E. Estresse hídrico em cafeeiros arábica: mecanismos fisiológicos de tolerância e estratégias de manejo. **Coffee Science**, Lavras, v. 9, n. 3, p. 314-322, 2014.

RAMALHO, J. C.; DUBBERSTEIN, D.; PARTELLI, F. L.; MARQUARDT, L. S. Resposta do cafeeiro ao estresse hídrico: uma abordagem integrada dos mecanismos de tolerância. **Coffee Science**, Lavras, v. 9, n. 2, p. 272-288, 2014.

RENA, A. B.; MAESTRI, M. Ecofisiologia do cafeeiro. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 1986, Campinas. **Anais...** Campinas: EMBRAPA-CPAC, 1986. p. 125-138.

ROCHA, A. C.; SILVA, V. A.; SOUZA, K. R. D. de; CARVALHO, G. R.; BOTELHO, C. E. Qualidade de grãos de café arábica submetidos a diferentes regimes de irrigação e adubação. **Coffee Science**, Lavras, v. 13, n. 4, p. 456-466, 2018.

ROCHA, O. C. G.; VOLTOLINI, G. B.; SOUZA, M. R. de; SANTOS, T. L. dos. Deficiência hídrica e qualidade do café: efeitos na composição química dos grãos

e na bebida. **Journal of Agricultural Studies**, [S. l.], v. 6, n. 4, p. 89-101, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5296/jas.v6i4.13845>.

SALVADOR, L.; BARBOSA, E. de M.; ZACARIAS, A. J.; RODRIGUES, P. D.; BRUNELI, L. V.; BESTETI, P. I. de O.; BERMOND, K. Z.; ADÃO, J. E. A.; PAULA, F. B. de; SOUZA, M. N. Mudanças climáticas e a vulnerabilidade da cafeicultura no Espírito Santo: riscos, impactos e estratégias de adaptação. In: SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em Cafeicultura Vol. V – Cafeicultura Agroecológica**. Canoas: Mérida Publishers, 2025, p. 27-51. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-35-0.c1>.

SILVA, J. M. V. O.; SOUZA, M. N. **Produção de café orgânico: práticas agroecológicas conservacionistas e novas tecnologias disponíveis ao produtor rural**. 1. ed. Meidrum Street, Mauritius: Novas Edições Acadêmicas, 2021. 72 p.

SILVA, S. A.; CHITARRA, S. M. G.; REIS, A. C. dos; LEITE, S. A. de F. Phenological stages of coffee plants under different irrigation regimes. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 49, n. 3, p. 456-464, 2018.

SILVA, S. A.; SOUZA, J. S. Manejo agroecológico do solo e seus impactos na disponibilidade hídrica para a cultura do café. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Pombal, v. 16, n. 2, p. 142-150, 2021.

SOUSA, D. G. ; PEREIRA, L. L.; OLIVEIRA, E. C. S.; MOREIRA, T. R. de. **Métodos de processamento para o café conilon: novas perspectivas para a produção de café conilon de especialidade**. Vitória: Edifes Acadêmico, 2026. E-book (21 p.). ISBN 978-65-5331-161-9.

SOUSA, D. S. M. de; BRUNELI, L. V.; SANTOS, A. T. B. dos; MACHADO, L. C. A.; RODRIGUES, R. M.; OLIMPIO, S. de O.; COSTA, W. M. da; AMARAL, A. A. do; SILVA, E. P. da; LIMA, O. A.; SOUZA, M. N. Defesa vegetal em sistemas agroecológicos: fundamentos fisiológicos, microbiológicos e interações ecológicas. In: SOUZA, M. N. (org.). **Tópicos em Gestão Ambiental: v. 5**. Canoas, RS: Mérida Publishers, 2026. p. 59-103. ISBN 978-65-84548-45-9. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-45-9.c2>

SOUZA, A. P.; SANTOS, M. O. dos; SOUZA, K. R. D. de; SILVA, T. M. da. Manejo conservacionista da água na cultura do café: alternativas para agricultura familiar. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Pombal, v. 8, n. 4, p. 240-247, 2013.

SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em cafeicultura Vol. V - cafeicultura agroecológica I**. Canoas, RS: Mérida Publishers, 2025. 310 p. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-35-0>.

SOUZA, M. N. Agroecologia: fundamentos conceituais e princípios orientadores. In: SOUZA, M. N. **Agroecologia: a sustentabilidade verde - da agricultura convencional à transformação agroecológica**. Canoas, RS: Mérida Publishers, 2026b. p. 21-32. **ISBN: 978-65-84548-44-2**. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-44-2.c1>.

SOUZA, M. N. Conversão da agricultura convencional para agroecológica. In: SOUZA, M. N. **Agroecologia: a sustentabilidade verde - da agricultura convencional à transformação agroecológica**. Canoas, RS: Mérida Publishers, 2026e. p. 123-130. **ISBN: 978-65-84548-44-2**. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-44-2.c7>.

SOUZA, M. N.; COSTA, W. M. da; AMARAL, A. A. do; GUMIERE, T. S.; MACHADO, L. C. A.; XAVIER, S. A. B.; GUIA, I. B. da; SANTOS, A. T. B. dos; ALMEIDA, D. S. de. Gestão ambiental e as dimensões da sustentabilidade agroecológica. In: SOUZA, M. N. (org.). **Tópicos em Gestão Ambiental: v. 5**. Canoas, RS: Mérida Publishers, 2026. p. 36-58. ISBN 978-65-84548-45-9. DOI: <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-45-9.c1>

SOUZA, M. N.; MANTOVANI, E. C.; ORELLANA GONZÁLEZ, A. M. G.; SANCHEZ ROMAN, R. M.; SILVA, M. A. A. Software STELLA and the hydrologic behavior in the basin of the Entre Ribeiro river, Paracatu river tributary, in scnery of climatic change. **Cadernos UNICAMP**, v.84, p.67-79, 2012.