



ECOFISIOLOGIA DE PLANTAS CULTIVADAS

CASSIO PEREIRA HONDA FILHO



EDITORA
SCHREIBEN

CASSIO PEREIRA HONDA FILHO



ECOFISIOLOGIA DE PLANTAS CULTIVADAS




EDITORA
SCHREIBEN

2025

© Do autor - 2025

Editoração e capa: Schreiben

Imagem da capa: Freepik.com

Revisão: o autor

Livro publicado em: 25/11/2025

Termo de publicação: TP1242025

Conselho Editorial (Editora Schreiben):

Dr. Adelar Heinsfeld (UPF)

Dr. Airtton Spies (EPAGRI)

Dra. Ana Carolina Martins da Silva (UERGS)

Dr. Cleber Duarte Coelho (UFSC)

Dr. Daniel Marcelo Loponte (CONICET – Argentina)

Dr. Deivid Alex dos Santos (UEL)

Dr. Douglas Orestes Franzen (UCEFF)

Dr. Eduardo Ramón Palermo López (MPR - Uruguai)

Dr. Fábio Antônio Gabriel (SEED/PR)

Dra. Geuciane Felipe Guerim Fernandes (UENP)

Dra. Ivânia Campigotto Aquino (UPF)

Dr. João Carlos Tedesco (UPF)

Dr. Joel Cardoso da Silva (UFPA)

Dr. José Antonio Ribeiro de Moura (FEEVALE)

Dr. Klebson Souza Santos (UEFS)

Dr. Leandro Hahn (UNIARP)

Dr. Leandro Mayer (SED-SC)

Dra. Marcela Mary José da Silva (UFRB)

Dra. Marciane Kessler (URI)

Dr. Marcos Pereira dos Santos (FAQ)

Dra. Natércia de Andrade Lopes Neta (UNEAL)

Dr. Odair Neitzel (UFFS)

Dr. Wanilton Dudek (UNESPAR)

Esta obra é uma produção independente. A exatidão das informações, opiniões e conceitos emitidos, bem como da procedência e da apresentação das tabelas, quadros, mapas, fotografias e referências é de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

Editora Schreiben

Linha Cordilheira - SC-163

89896-000 Itapiranga/SC

Tel: (49) 3678 7254

editoraschreiben@gmail.com

www.editoraschreiben.com

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

H771 Honda Filho, Cassio Pereira.

Ecofisiologia de plantas cultivadas / Cassio Pereira Honda Filho. –

Itapiranga, SC : Schreiben, 2025.

62 p. ; e-book.

Inclui bibliografia

E-book no formato PDF.

ISBN: 978-65-5440-580-5

DOI: 10.29327/5728391

1. Ecofisiologia vegetal. 2. Plantas cultivadas – Fisiologia. I. Título.

CDD 581.1

Bibliotecária responsável Juliane Steffen CRB14/1736

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

Ecofisiologia da soja (*Glycine max*) no Brasil.....4

CAPÍTULO 2

Ecofisiologia do milho (*Zea mays*) no Brasil.....11

CAPÍTULO 3

Ecofisiologia do cafeeiro (*Coffea arabica* e *C. Canephora*)..... 18

CAPÍTULO 4

Ecofisiologia da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) no Brasil.....27

CAPÍTULO 5

Ecofisiologia do algodão (*Gossypium hirsutum*) no Brasil.....35

CAPÍTULO 6

Ecofisiologia de cultivos de inverno no Brasil
(trigo, cevada, aveia e canola).....40

CAPÍTULO 7

Ecofisiologia das culturas do tomate, cebola, alho e cenoura.....47

Referências..... 57

- CAPÍTULO 1 -

Ecofisiologia da Soja (*Glycine max*) no Brasil

A ecofisiologia da soja busca entender como o metabolismo (fotossíntese, respiração, fixação biológica de N_2 , crescimento e reprodução) responde ao ambiente (radiação, temperatura, água, CO_2) e ao manejo (época de semeadura, grupo de maturidade, arranjo de plantas, fertilidade, biologia do solo). No Brasil, que abrange latitudes subtropicais (Sul/Sudeste) até tropicais (Cerrado e MATOPIBA), a chave é posicionar os estádios críticos reprodutivos (R3–R6) em janelas de menor risco térmico/hídrico, mantendo plantas eficientes para luz e água, e um sistema solo–raiz com boa qualidade física e química. O Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC), atualizado anualmente pelo MAPA, é o guia para datas de semeadura de menor risco por município/tipo de solo/ciclo, e hoje compõe portarias específicas por estado para cada safra.

A adaptação da soja ao Brasil tropical foi catalisada pelo uso do período juvenil longo, que atrasa a indução floral sob dias curtos e permite maior crescimento vegetativo antes do florescimento, abrindo fronteira de cultivo em baixas latitudes e flexibilizando janelas de semeadura.

Fenologia, arquitetura e fotoperíodo: alicerces do manejo temporal

O desenvolvimento segue a escala Fehr & Caviness: estádios vegetativos (V1...Vn) e reprodutivos R1 (início do florescimento) a R8 (maturação). Para manejo de risco e rendimento, a janela R3–R6 (início de vagens até enchimento de grãos) é a mais sensível, pois define número e massa de grãos.

A soja combina folhas trifolioladas, ramificação variável e hábito

de crescimento determinado ou indeterminado conforme o grupo de maturidade (GM). Essa plasticidade permite compensar falhas moderadas de estande via ramificação e ajuste na retenção/aborto de flores e vagens, desde que haja luz, água e nutriente suficientes na janela R3–R6.

Espécie de dias curtos, a soja floresce quando o dia cai abaixo de um limiar crítico (genótipo-dependente). O período juvenil longo reduz a sensibilidade inicial ao fotoperíodo, permitindo semeaduras mais precoces em baixas latitudes sem florescimento “precoce demais”. A taxa de desenvolvimento é termo-fotoperiódica: temperatura média modula a velocidade com que a planta transita entre estádios, condicionando a adequação do GM à latitude e à data de semeadura.

Implicação prática: ajustar GM × data para que R3–R6 ocorra quando a probabilidade de calor seco e/ou déficit hídrico for menor, usando o ZARC local (e o calendário sanitário estadual).

Processos ecofisiológicos que “fabricam” o rendimento

Fotossíntese (A) em C_3 responde a PAR (radiação fotossinteticamente ativa), concentração de CO_2 , temperatura foliar e condutância estomática (g_s). Em condição de déficit hídrico e/ou alto DPV (déficit de pressão de vapor), os estômatos fecham para conter transpiração (E), caindo g_s e, em menor grau inicial, A; com isso cresce a eficiência intrínseca de uso da água, $iWUE = A/g_s$. Porém, sob estresse severo, A entra em queda pronunciada e o balanço colapsa.

Eficiência do uso da radiação (RUE) quantifica a conversão de radiação absorvida em biomassa ($g\ MJ^{-1}$). Em soja, valores de campo variam tipicamente de $\sim 0,6$ a $1,6\ g\ MJ^{-1}$, com estudos reportando faixas por genótipo/ambiente de $\sim 0,84$ – $1,15\ g\ MJ^{-1}$ e até $\sim 0,62$ – $1,59\ g\ MJ^{-1}$ em avaliações no R6. Essa amplitude reflete clima, arquitetura do dossel (LAI, ângulo foliar), sanidade e nutrição.

Métricas rápidas e não destrutivas

Fluorescência da clorofila (F_v/F_m) indica fotoinibição/estresse do PSII. Em folhas bem adaptadas e não estressadas, $F_v/F_m \approx 0,83$ é referência; quedas persistentes sugerem estresse (luminoso, térmico,

hídrico, nutricional).

SPAD (índice de clorofila) correlaciona-se com teor de clorofila e, com ressalvas, com N foliar. A relação varia por espécie/tecido/condição de luz; convém calibrar por cultivar/ambiente e integrar com diagnóstico visual e análise foliar.

Formação do rendimento: número × tamanho de grãos

Rendimento = plantas × vagens/planta × grãos/vagem × massa de 100 grãos. O dossel precisa interceptar e usar radiação com folhagem funcional em R3–R6. Calor e seca nessa janela reduzem pegamento floral/vagens, número de grãos e tamanho de grãos; análises recentes confirmam que eventos quentes e secos combinados são os mais danosos no reprodutivo.

Fixação biológica de nitrogênio (FBN), inoculação e coinoculação

A soja supre a maior parte do N via simbiose com *Bradyrhizobium*; inoculação anual amplia a chance de nodulação efetiva, especialmente em áreas novas, solos quentes e de baixa MO. Coinoculação com *Azospirillum* tem ganhado espaço: publicações brasileiras e internacionais relatam ganhos médios e, em anos de seca, incrementos de produtividade acima de 10%. Diretrizes recentes da Embrapa padronizam doses e vias para coinoculação (via semente/sulco), alertando para não “superdosar” bioinsumos. Em safras com estresse hídrico, trabalhos de 2024 observaram respostas positivas consistentes à coinoculação.

Fatores edafoclimáticos determinantes

Clima: temperatura, água e época

Temperatura. A cultura performa melhor em 20–30 °C ao longo do ciclo; picos $\geq$ ~35 °C durante o florescimento/enchimento elevam risco de aborto e reduzem massa de grãos (com sensibilidade extra a temperatura noturna elevada).

Água (ETc) e distribuição. A demanda hídrica concentra-se nos estádios R1–R6, respondendo por > 60% do uso sazonal. Picos diários

de uso de água podem atingir $\sim 5\text{--}7,5 \text{ mm dia}^{-1}$ ($\approx 0,2\text{--}0,3 \text{ pol dia}^{-1}$) em condições quentes, secas e ventosas. Assim, déficits moderados no vegetativo são mais toleráveis que déficits no reprodutivo.

Planejamento por Kc (FAO-56). Para irrigação suplementar (onde couber), use $ET_c = ET_o \times K_c$ (ou $K_{cb} + K_e$ no método dual). Kc varia por estágio e manejo hídrico; o método dual permite tratar separadamente transpiração do dossel (K_{cb}) e evaporação do solo (K_e) — útil em linhas largas e/ou palhada exposta.

Época de semeadura e risco climático. No Brasil Central, priorize o início efetivo das chuvas; no Sul, evite frio na emergência e calor/estiagens em enchimento. Use o ZARC da safra vigente para escolher janelas $\leq 20\text{--}30\%$ de risco municipal/solo/ciclo.

Solo – química (pH, V%, K, P, S)

Acidez e saturação por bases. Trabalhar em $\text{pH}(\text{CaCl}_2) \approx 5,4\text{--}5,9$ e V% compatível (frequentemente $\sim 50\text{--}60\%$ em Latossolos) reduz Al^{3+} tóxico e otimiza disponibilidade; calagem bem feita aprofunda raízes e melhora eficiência de água e nutrientes.

Potássio (K). A soja absorve $\sim 38 \text{ kg K}_2\text{O t}^{-1}$ de grãos produzidos e exporta $\sim 20 \text{ kg K}_2\text{O t}^{-1}$ via colheita, o que embasa a manutenção em torno de $\sim 20 \text{ kg K}_2\text{O}$ por tonelada de grãos esperada (ajustar por análise de solo, textura, histórico e balanço do sistema).

Fósforo (P) e Enxofre (S). Seguir manuais regionais (SBCS, Embrapa) e balanços; solos arenosos/oxissolos costumam requerer S de manutenção.

Gesso agrícola. Indicado quando há acidez subsuperficial/ Al^{3+} no subsolo e baixo Ca^{2+} em profundidade; melhora o perfil radicular e a resiliência hídrica.

Solo – física e água no perfil

A qualidade física determina quanta água do solo é realmente acessível às raízes. O Intervalo Hídrico Ótimo (IHO/LLWR) integra água disponível, porosidade de aeração e resistência à penetração em uma faixa de umidade na

qual o crescimento radicular não é limitado. Sob compactação e/ou umidade inadequada, o LLWR se estreita (até zero em casos severos), aumentando a frequência de estresse mesmo com chuva “normal”. Em Latossolos sob tráfego, estudos com soja mostram queda de produtividade antes mesmo de o LLWR “zerar”, reforçando práticas de SPD com palha, controle de tráfego, gessagem (quando indicada) e rotação com raízes exploradoras.

Ecofisiologia aplicada ao manejo

Época de semeadura (ZARC) e posicionamento de R3–R6

Use as portarias ZARC da safra vigente do seu estado e escolha janelas com classe de risco $\leq 20\text{--}30\%$ (conforme regulamentação local).

Objetivo: encaixar R3–R6 fora de estiagens prováveis e picos de calor, mantendo LAI e arquitetura favoráveis à interceptação/uso de luz durante o enchimento.

No Cerrado/MATOPIBA, usar início das chuvas efetivas; no Sul/Sudeste, evitar frio na emergência e calor seco em R5–R6.

População de plantas e espaçamento

A soja é plástica; porém, ciclos curtos (menor área foliar por planta) respondem melhor a densidades maiores e linhas mais estreitas (fechamento precoce do dossel, maior fração difusa interna, menor evaporação do solo). Ciclos longos valorizam uniformidade de emergência e controle de plantas dominadas/tardias. Evite adensamentos que aumentem acamamento ou sombrite excessivo nos estratos inferiores.

Nutrição e FBN — integrando SPAD e análise

K de manutenção: planeje pelo balanço (exportação $\times$ reposição) e pela análise de solo.

FBN: inocular anualmente; coinocular quando recomendado, respeitando dose/compatibilidade de produtos (sementes/sulco). Em áreas com histórico, reforce qualidade de operação (aderência do inoculante, evitar mistura com químicos incompatíveis, logística para evitar calor/UV).

Água/irrigação suplementar (quando aplicável)

Adote $ET_c = ET_o \times K_c$ (ou $K_{cb} + K_e$ no método dual); acompanhe ET_o local e chuvas efetivas.

Em solos de baixa CAD, é preferível antecipar lâminas na transição $V \rightarrow R$ e manter déficit mínimo em $R1-R5$ a tentar “recuperar” tardiamente.

Estresses abióticos: mecanismos, sinais e manejo

Déficit hídrico (seca)

Sinais rápidos: queda de g_s , A e temperatura foliar mais alta; SPAD e F_v/F_m podem cair se o estresse persistir. No reprodutivo, seca reduz fortemente vagens/grãos e peso de grãos — sobretudo quando coincide com calor; a literatura mostra que eventos compostos (quente + seco) geram as maiores perdas. Estratégias: ZARC, perfil radicular profundo (gesso quando indicado; evitar camadas adensadas), palhada para reduzir evaporação e amplitude térmica do solo, e genótipos com maior $iWUE$.

Calor e calor noturno

Temperaturas acima de $\sim 30-35^\circ\text{C}$ em $R2-R5$ reduz pegamento, altera metabolismo de carboidratos e acelera senescência foliar. Temperaturas noturnas elevadas prejudicam o uso de assimilados e reduzem rendimento. Ajuste $GM \times data$, use densidades/arquiteturas que favoreçam ventilação moderada e mitigação de calor no dossel.

Encharcamento/alagamento

Provoca hipóxia, epinastia e senescência; a planta reage com raízes adventícias e formação de aerênquima, mecanismos que aumentam a aeração interna e reduzem a perda radial de O_2 , processos mediados por etileno/ABA/ROS. Evite semeadura em baixadas mal drenadas, corrija drenagem e use coberturas/rotação para melhorar estrutura.

Salinidade (cenários localizados)

Reduz a eficiência no uso da água, condutância e crescimento radicular. Em solos de textura fina e drenagem limitada, efeitos são mais marcantes; priorize lixiviação controlada, gesso agrícola quando indicado e cultivares mais tolerantes.

- CAPÍTULO 2 -

Ecofisiologia do Milho (*Zea mays*) no Brasil

O milho (*Zea mays* L.) é uma espécie C4, com mecanismo de concentração de CO₂ que minimiza fotorrespiração e sustenta altas taxas fotossintéticas sob ampla faixa de radiação e temperatura. Esse arranjo anatômico-bioquímico cria um “teto fisiológico” elevado para conversão de luz em biomassa, sobretudo quando água e nitrogênio não são limitantes.

No Brasil, o milho é cultivado na safra de verão (principalmente set.–dez., com variação regional) e na segunda safra (“safrinha”), usualmente semeada de jan.–abr. após soja precoce nas regiões Centro-Oeste, Sudeste, Sul e MATOPIBA. A definição fina da janela de semeadura é orientada pelo Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC), estabelecido por Portarias do MAPA específicas para milho de primeira e segunda safras por município e tipo de solo.

Fenologia térmica, morfologia e definição do rendimento

A fenologia do milho é fortemente modulada pela soma térmica (graus-dia, GDD), com temperatura-base operativa frequentemente tomada como 10 °C ($\beta=10$ °C) para fins de planejamento (ajustável a híbridos e ambientes). O período VT (pendoamento)–R1 (espigamento) inaugura a fase crítica de definição do número de grãos; de R1 a R3 consolida-se o “pegamento” (seed set) e se inicia o enchimento. Esse intervalo é simultaneamente o mais sensível a estresses hídricos e térmicos.

Híbridos atuais exibem porte mais contido, folhas mais eretas e melhor tolerância a altas densidades, favorecendo índice de área foliar (LAI) eficaz e maior fração de PAR absorvida (fPAR). Em materiais de

arquitetura ereta, valores de LAI eficaz para alto rendimento tendem à faixa ~3,5–5,5, embora ambientes e híbridos possam deslocar o ótimo; estudos reportam LAI máximo próximo de 5–5,5 e ótimos operacionais entre ~4,5 e ~6, dependendo de densidade e N.

Por ser C4, o milho tem menor fotossaturação e menor fotorrespiração, o que eleva a eficiência de uso da radiação (RUE) em condições favoráveis. Em campo, metanálises e séries de ensaios relatam RUE de ~3,5–4,0 g MS MJ⁻¹ de APAR (variando por N, densidade, microclima e sanidade).

LAI: alvo frequente entre 3,5 e 5,5 para alto rendimento; otimização depende de arquitetura (folha ereta) e uniformidade de estande.

NDVI/NDRE e SPAD: índices óticos úteis para rastrear vigor, status de N e senescência, apoiando decisões de cobertura nitrogenada e diagnósticos de limitação de dossel. Ensaios brasileiros validam SPAD para N em milho e aplicações táticas com NDRE no reprodutivo para inferir rendimento.

O número de grãos é predominantemente definido entre VT–R2/R3 e responde ao crescimento do dossel no período crítico; a massa de grãos depende da taxa e duração do enchimento, condicionadas ao suprimento de assimilados e nitrogênio. (Integração de estudos de rendimento em milho.)

A demanda sazonal de água do milho situa-se tipicamente em ~500–800 mm por ciclo, com pico de ET_c de VT a R3. A estimativa operacional mais difundida usa ET_o (Penman–Monteith parametrizado FAO-56) e coeficientes de cultura (K_c) em curva simples, com valores de referência amplamente usados: K_{c_ini} ≈ 0,40; K_{c_mid} ≈ 1,15–1,20; K_{c_end} ≈ 0,35–0,60 (ajustáveis ao clima, cultivar e senescência).

A “faixa hídrica menos limitante” (LLWR) integra água, aeração e resistência à penetração (PR) num único indicador. Valores de PR > ~2,0 MPa são classicamente associados à limitação do alongamento radicular; a LLWR define a faixa de umidade em que o crescimento radicular é minimamente restrito por falta de ar (no úmido) e por resistência mecânica (no seco). Em SPD, palhada e tráfego controlado ampliam a LLWR; gessagem e raízes mais profundas ajudam a explorar água subsuperficial.

Quanto maior a fração de transpiração (T) na evapotranspiração

(ET), maior tende a ser a eficiência produtiva do uso da água (WUEg). Em lavouras de milho, estudos de particionamento reportam T/ET em torno de 0,60–0,65 na estação de crescimento, com correlação positiva com LAI e fechamento do dossel—objetivos que também orientam adensamento e manejo de palhada.

O crescimento vegetativo e a fisiologia do milho são favorecidos em amplitudes ~20–32/35 °C, com maior risco de distúrbios reprodutivos acima disso. O calor em VT–R2 reduz viabilidade/germinação de pólen, sincronismo floral e crescimento de tubos polínicos, afetando diretamente o número de grãos; umidade relativa mais alta (VPD menor) pode atenuar perdas de “seed set”.

Semeaduras sobre solo frio (baixa soma térmica) atrasam emergência e podem reduzir estande efetivo e área foliar inicial, comprometendo a interceptação de luz na fase crítica. Em SPD, cobertura de solo e escolha da data mitigam parte do problema (princípios consolidados).

Em Latossolos, recomenda-se V% alvo ~50–60 e pH(CaCl₂) ~5,2–5,8 como faixas operacionais para milho; a gessagem não substitui a calagem, mas é complementar para acidez subsuperficial, incremento de Ca²⁺ no subsolo e redução de Al³⁺, favorecendo aprofundamento radicular onde indicado por diagnóstico (textura/CTC/teores).

A demanda de N acelera de V6 até VT, período em que a cobertura (ou fertirrigação) mais contribui para produtividade, desde que o dossel esteja saudável e a água no crítico seja adequada. Curvas de absorção e estudos fisiológicos reforçam esse pico e as vantagens de sincronizar oferta (parcelamento/fertirrigação) com essa janela.

O fósforo é frequentemente limitante em solos do Cerrado; recomenda-se construir disponibilidade no perfil (correção e manejo de banda/parcelas) e posicionar estrategicamente o fertilizante em função de textura e histórico (sínteses Embrapa e literatura de manejo do Cerrado).

O grão exporta fração pequena do K absorvido; parte expressiva permanece em colmos/palhada. Em sistemas de silagem ou de remoção de resíduos, a exportação de K aumenta muito e o plano de adubação deve contemplar essa saída adicional. (Ensaio da Embrapa detalham a baixa exportação via grãos e a retenção de K na palhada.)

Solos arenosos e ambientes de alta remoção/baixa MO pedem

atenção a S; Zn e Mn podem se tornar limitantes em pH elevado e B em ambientes secos (diagnóstico foliar/solo e correções direcionadas).

Estresses combinados (hídrico + térmico; hídrico + deficiência de N) não são aditivos: o dano pode ser menor, igual ou maior que a soma dos estresses isolados, porque partilham vias de sinalização e alvos fisiológicos (por exemplo, fechamento estomático reduz C interno e aumenta a temperatura foliar, amplificando dano térmico). Revisões recentes enfatizam essa natureza interativa e a importância de abordagens integradas de manejo e genética.

No adensamento, ganhos de captação de luz e aumento de T/ET se acumulam até limites impostos por água/N e pela arquitetura do híbrido. Em água limitada, densidades excessivas penalizam crescimento no período crítico e reduzem WUE no nível de grãos; em ambientes de alto potencial, densidades elevadas com folhas eretas sustentam LAI funcional e alongam a duração do dossel verde pós-pendoamento.

ZARC (MAPA): Portarias atualizadas publicam as janelas de semeadura por município, tipo de solo e ciclo (1ª e 2ª safras). Para milho safrinha, a Embrapa define o cultivo como de sequeiro, extemporâneo, de janeiro a abril, normalmente após soja precoce; obedecer ao ZARC reduz a exposição do VT-R3 a veranicos e picos de calor.

Calendário prático: no Centro-Oeste e Sudeste, a 1ª safra tende a ocorrer de set.-dez.; a 2ª, jan.-mar. imediatamente após a soja. No Sul, janelas deslocam-se um pouco mais tarde. Fontes setoriais e de extensão indicam janelas semelhantes, mas sempre subordinar à Portaria vigente e à previsão local.

O intervalo operacional é amplo (~45–90 mil plantas ha⁻¹). Em sequeiro limitado (água/N), ótimos em ~50–65 mil são frequentes; em alto potencial/irrigado, 70–85 mil com linhas estreitas (0,45–0,50 m) e híbridos de arquitetura ereta são comuns, sempre respeitando a recomendação do híbrido e a capacidade hídrica do sistema. Documentos da Embrapa indicam 55–65 mil plantas ha⁻¹ como densidade operacional típica e sinalizam incremento sob tecnologias modernas e materiais tolerantes a adensamento.

Evitar déficit entre VT-R3 é prioridade. Em irrigação suplementar,

antecipe lâminas com base em $ETo \times Kc$ (FAO-56) e capacidade de aplicação do sistema, lembrando que o Kc_{mid} atinge ~1,15–1,20.

No Cerrado, construir perfil (calagem profunda quando possível, gessagem por diagnóstico), reduzir tráfego em solo úmido e manter palhada abundante são pilares para ampliar LLWR e estabilizar a oferta hídrica durante VT–R3.

Trocas gasosas/porometria: medir A, gs, E em V8–V12 e R1–R3 ajuda a interpretar microclima e limitações (água/compactação/calor).

Fluorescência (Fv/Fm) e SPAD: Fv/Fm sinaliza integridade fotoquímica; SPAD informa status de N e senescência; quedas persistentes indicam reavaliar N/água.

Temperaturas em torno ou acima de ~35 °C próximas à antese prejudicam viabilidade de pólen e crescimento de tubos polínicos. As perdas agrônômicas tendem a ser maiores quando DPV alto e déficit hídrico ocorrem conjuntamente.

A compactação estreita a LLWR: no úmido, falta ar; no seco, PR > 2 MPa limita elongação de raízes. Em SPD, palhada reduz E do solo e eleva a fração T/ET; tráfego controlado e janelas de operação evitam a geração de PR crítico em camadas ativas. (Sínteses de LLWR e PR em solos agrícolas.)

Nutrição: N, P, K e S na perspectiva ecofisiológica

N: sincronizar cobertura V6–VT com água adequada eleva RUE e evita senescência antecipada do dossel (stay-green funcional).

P: restrição muito comum em Latossolos; trabalhar construção no perfil e posicionamento.

K: grãos exportam pouco K; remover a palhada (silagem) muda o balanço de K e exige reposição compatível.

S: imprescindível em areias e ambientes de alta remoção.

Integração a sistemas e práticas contemporâneas

Safrinha como sistema

A safrinha consolidou-se como a principal época do milho em muitas regiões; seu sucesso depende da rapidez de transição soja → milho (desempenho da soja precoce e colheita), respeitando janelas ZARC para escapar de estiagens outonais e picos térmicos no florescimento. Tecnologias como semeadura antecipada (sistema Antecipe) possibilitam adiantar em até ~20 dias a implantação do milho 2ª safra antes da colheita plena da soja, desde que cumpridos critérios agrônômicos e legais, mitigando risco climático do VT–R3.

Arranjos de plantas, arquitetura

Em sequeiro, fechar o dossel cedo (adensamento até o ponto ótimo do ambiente e do híbrido) eleva a fração transpiração, reduz perdas por evaporação (E) e sustenta LAI produtivo na fase crítica; em alto potencial, linhas estreitas e híbridos eretos aumentam a eficiência da radiação no perfil do dossel.

Sensoriamento e manejo adaptativo

UAV/índices espectrais: priorizar VT, R1, R2–R3 para previsão de rendimento e detecção de estresse; NDRE/GNDVI no pós-florescimento são fortes preditores; integrar com SPAD em pontos-chave.

Termometria infravermelha: aplicar CWSI para definir irrigação em pivôs e ajustar lâminas em tempo quase real.

Diretrizes práticas por macroambiente

Cerrado/MATOPIBA

Semeadura: logo após soja precoce, dentro do ZARC municipal; evitar atrasos que empurrem VT–R3 para abril-maio mais secos/quentes.

Solo: V% 50–60, pH(CaCl₂) 5,2–5,8; gessagem por diagnóstico para subsolo ácido (Ca²⁺/redução de Al³⁺); palhada robusta e tráfego controlado ampliam LLWR e a resiliência hídrica.

Densidade: 60–80 mil plantas ha⁻¹ para híbridos tolerantes e bom suprimento; reduzir para 50–65 mil com risco hídrico e Kc_{mid} alto sem irrigação. N e PGPB: alinhar N V6–VT;

Sul/Sudeste

1ª safra: plantar de set.–dez. (conforme região), evitando frio no estabelecimento e calor/estiagens na fase reprodutiva por meio do ZARC.

2ª safra: alinhar colheita da soja e semeadura até feb.–mar. para proteger VT–R3; densidade definida pelo potencial hídrico do ano.

Solo: corrigir acidez (calagem) e usar gesso quando houver acidez subsuperficial/Al³⁺; manter SPD e palhada para estabilidade hídrica e térmica.

- CAPÍTULO 3 -

Ecofisiologia do Cafeeiro (*Coffea arabica* e *C. canephora*)

O cafeeiro é uma perene C3 notoriamente sensível ao ambiente: disponibilidade de água no solo e no ar (via déficit de pressão de vapor, DPV), temperatura e radiação governam o acoplamento entre fontes (folhas e, em menor escala, frutos verdes) e drenos (flores, frutos em expansão, crescimento vegetativo), determinando produtividade, estabilidade interanual e qualidade. Em sistemas brasileiros, do Sul/Sudeste ao Cerrado e ao norte do Espírito Santo/Rondônia, o sucesso de longo prazo vem de alinhar processos ecofisiológicos a decisões de manejo: arranjo espacial/LAI, nutrição, sombreamento quando indicado, irrigação e sincronização de floradas, além de poda para modular a carga. Revisões de referências mostram que, embora o cafeeiro seja vulnerável a seca/DPV alto e calor, ele apresenta grande capacidade de aclimação quando bem nutrido e manejado, e pode se beneficiar de CO₂ elevado mantendo aparato fotoquímico funcional mesmo sob calor moderado.

A conjuntura climática recente reforça a necessidade de uma leitura dinâmica de risco: ondas de calor, veranicos e eventos de geadas ganharam relevância operacional, e o Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC) passou por atualizações para café *canephora* em 2024, com portarias nacionais para cultivo irrigado e de sequeiro; para arábica, as portarias de 2021 delimitaram períodos/áreas por estado, e são a base regulatória até novas revisões.

Cafeeiros possuem um eixo ortotrópico (tronco) e ramos plagiotrópicos produtivos, com sistema radicular concentrado nos primeiros 30–40 cm, embora com plasticidade conforme textura, estrutura e manejo. Estudos de campo e de sistemas sombreados mostram predominância de

raízes finas no topo do perfil (0–30 cm), com distribuição mais uniforme até ~40 cm, e sensibilidade à compactação, o que afeta condutância hidráulica e, por consequência, o controle estomático.

Em condições tropicais/sazonais, pulsos vegetativos alternam-se com os reprodutivos. Um período seco curto ($\approx$ 2–4 meses) induz a diferenciação floral; o retorno das chuvas (ou irrigação estratégica) “destrava” a antese, e floradas múltiplas sob chuvas esparsas geram maturação desuniforme. A bienalidade emerge quando cargas elevadas deprimem a renovação vegetativa e elevam a respiração de manutenção; o manejo via poda (esqueletamento, safra-zero em conilon) e balanceamento nutricional modula esse ciclo. Revisões clássicas e estudos fisiológicos relacionam a competição fonte–dreno com dieback e alternância de safra.

Fisiologia de processo

Trocas gasosas, DPV, fotossíntese (*A*), condutância estomática (*gs*)

Em campo, *A* é tipicamente maior pela manhã, quando a condutância estomática está alta e o DPV é moderado; com o aquecimento do ar, o aumento do DPV induz fechamento estomático e depressão vespertina de *A*. Em folhas expostas, esse padrão é quase sempre estomático, com pouca evidência de fotoinibição quando a nutrição está adequada. O acoplamento *A*–*gs* tende a ser mais forte em *C. arabica* do que em *C. canephora*; em condições quentes-secas, sombreamento moderado reduz DPV foliar e ameniza a limitação estomática. Indicadores operacionais como *iWUE* (*A*/*gs*) e *WUE* (*A*/*E*) são úteis para comparar genótipos e ambientes e para decisões hídricas in-season.

Fotoproteção, radiação e temperatura foliar

Sob alta luz, o cafeeiro aciona rotas dissipativas (ciclo das xantofilas, transporte alternativo de elétrons e fotorrespiração) e antioxidantes (SOD, APX, catalase, carotenoides, tocoferóis), protegendo o PSII. Isso explica por que *Fv/Fm* raramente cai de modo persistente em plantas adequadas, mesmo sob pleno sol, desde que água e nutrição não sejam limitantes; já DPV elevado + *gs* baixo elevam a temperatura foliar e

podem precipitar queima, queda foliar e dano a frutos. Em sítios quentes e secos, sombreamento moderado (20–40%) é uma ferramenta fisiológica para manter o balanço energético do dossel e reduzir estresse térmico. Em análises micrometeorológicas, folhas de cafeeiro podem aquecer vários graus acima do ar em tardes secas e radiativas; o efeito é mitigado por *gs* mais alto e por sombreamento.

Fonte–dreno, carga e o papel dos frutos

O rendimento resulta de (i) ramos produtivos por planta, (ii) frutos por nó/ramo e (iii) massa de grãos. Manipulações de carga (desbaste, poda) alteram o estado hídrico e *gs* por vias estomáticas (via demanda de assimilados), ajudando a conter dieback e bienalidade. Quanto aos frutos, há fotossíntese no pericarpo; estimativas sugerem contribuição relevante para a respiração diária dos frutos e, em cargas altas, os frutos podem representar até 20–30% da área fotossintética do conjunto planta + frutos. Entretanto, a contribuição líquida para o crescimento do grão é contexto-dependente (luz, posição no dossel, carga). O consenso atual é que essa fotossíntese recicla CO₂ respiratório e contribui pontualmente para o balanço local, sem substituir a necessidade de uma fonte foliar robusta.

Exigências edafoclimáticas e aptidão no Brasil

Temperatura e precipitação

Para arábica, a faixa ótima média anual situa-se $\approx 18\text{--}23\text{ }^{\circ}\text{C}$; acima disso acelera-se a maturação (potencialmente afetando qualidade), e abaixo de $17\text{--}18\text{ }^{\circ}\text{C}$ o crescimento deprime. Para canephora, o ótimo é $\approx 22\text{--}26\text{ }^{\circ}\text{C}$, com vantagem relativa sob aquecimento. Projeções recentes para o Brasil apontam deslocamento altitudinal de áreas aptas e maior risco em zonas já quentes/semiáridas, reforçando a importância de sombreamento, irrigação e materiais adaptados. A precipitação anual $\approx 1.200\text{--}1.800\text{ mm}$, com uma seca curta (2–4 meses) para induzir florada, é um alvo clássico de aptidão; chuvas o ano todo dificultam a concentração de floradas e colheita.

Vento, radiação e risco de geada

Ventos intensificam ETo e elevam DPV no dossel, agravando estresse hidrotérmico; quebra-ventos e desenho de renques reduzem perdas. Quanto às geadas, estudos recentes com sensoriamento mostram grande variabilidade espacial do dano; referências técnicas indicam que temperaturas em torno de $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (tronco) a $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (folha) já são suficientes para morte de folhas/ramos jovens. Em lavouras novas, o risco é ainda maior, e arranjos de relevo, quebra-ventos e escolha de cultivares mais tolerantes são decisivos.

Solo, química e física: onde a ecofisiologia encontra o manejo

Química: pH, V% e gesso

Em sistemas brasileiros, metas usuais de $\text{pH}(\text{CaCl}_2) \sim 5,2\text{--}5,8$ e V% 60–70% equilibram a disponibilidade de Ca/Mg, mitigam Al^{3+} tóxico e favorecem atividade radicular na camada arável; a gessagem ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) complementa a calagem para acidez subsuperficial, aprofundando raízes quando indicada (textura/CTC e teores no perfil). Recomendações recentes destacam que o V% alvo depende da CTC: solos de CTC baixa pedem V% mais alto para oferta adequada de Ca/Mg, enquanto solos de CTC alta operam bem com V% mais modesto.

Física: LLWR, compactação e água no perfil

A Faixa Hídrica Menos Limitante (LLWR) integra água disponível, aeração e resistência à penetração (PR). Em cafeeiros, $\text{PR} > \approx 2\text{ MPa}$ já restringe crescimento radicular; camadas adensadas elevam o risco de “seca fisiológica” mesmo com chuva normal, pois a condutância hidráulica do solo-raiz-xilema cai e o controle estomático se antecipa. Ensaios controlados confirmam que a compactação reduz g_s , A e crescimento, além de alterar a anatomia radicular. No campo, SPD com palhada abundante e tráfego controlado são chaves para estabilizar LLWR.

Luz, sombreamento e arquitetura do dossel

Quando e por que sombrear

Em ambientes amenos e bem supridos de água, pleno sol tende a maximizar a produção anual. Em ambientes quentes/secos ou sob DPV alto, sombreamento moderado (20–40%) reduz a temperatura foliar, estabiliza g_s e diminui a depressão vespertina de A , com ganhos em estabilidade de safra e, em vários casos, melhorias de qualidade de bebida (efeitos em açúcares e precursores). O mecanismo primário é microclimático: queda de DPV e de carga radiativa na folha, com manutenção da fotoproteção dentro de limites menos onerosos.

LAI e interceptação

O LAI operacional em arábicas de porte baixo tende a oscilar entre ~ 3 e 6 nos estádios de maior interceptação, podendo atingir patamares mais altos em cultivos densos/irrigados; o objetivo é fechar o dossel sem exagerar a autocobertura, que acelera a senescência basal e aumenta a umidade do ar na copa (pragas/doenças). Relações empíricas K_c –LAI mostram que, à medida que o LAI cresce, K_c aumenta (maior transpiração), mas com ganhos marginais decrescentes, informação valiosa para desenhar densidade e ritmar a irrigação.

Água, irrigação e sincronização de floradas

Demanda hídrica e coeficientes de cultura

A demanda sazonal típica gira em ≈ 900 – 1.200 mm ano⁻¹ em cafezais produtivos (chuva + irrigação), variando com LAI, clima e idade. Para manejo prático, usa-se E_{To} com K_c específico da lavoura. Em condições brasileiras, medidas e modelos relacionam K_c ao LAI e ao estádio: valores médios de K_c “meio de temporada” em café adulto frequentemente se aproximam de 1,0–1,2, variando com cobertura do solo, manejo de plantas daninhas e arquitetura do dossel. A abordagem dual ($K_{cb} + K_e$) permite separar transpiração do dossel e evaporação do solo, aumentando precisão sob palhada/entrelinhas ativas.

Irrigação estratégica e “seca controlada”

No arábica de sequeiro, um período seco breve sincroniza a diferenciação floral; no canephora irrigado, práticas de “estresse hídrico controlado” (redução de lâminas até um alvo de umidade do solo) seguidas de reidratação são usadas para concentrar floradas e a colheita, reduzindo desuniformidade. A literatura técnica nacional e a prática de campo sustentam essa estratégia, desde que não se estenda o estresse durante chumbinho–enchimento, quando a sensibilidade hídrica é máxima.

Diagnósticos dinâmicos

Além de balanços hídricos, termografia (Temperatura foliar), porometria (*gs*) e fluorescência (Φ PSII/NPQ) ajudam a ajustar lâminas em tempo real, sobretudo em tardes com DPV alto e vento. A termografia tem sido aplicada ao cafeeiro para inferir condutância estomática e antecipar estresse antes que a queda de *A* seja visível a olho nu.

Calor, frio e estresses combinados

Calor × seca × alta luz

Sob calor e DPV alto, as limitações estomáticas dominam a queda de *A*; se os mecanismos de fotoproteção ficam sobrecarregados, aparece escaldadura e acelera a senescência. Somar sombreamento moderado, mulch e irrigação oportuna reduz o risco. A elevação de $[CO_2]$ tende a ampliar a resiliência térmica, sustentando *A* e integridade do aparato fotoquímico em regimes de 37/30 °C (dia/noite) quando o estresse hídrico é controlado. Ensaios de FACE em *C. arabica* mostram aumentos sustentados de *A* sem “downregulation” bioquímico, sinalizando potencial de mitigação parcial do aquecimento via CO_2 , desde que não haja déficit hídrico.

Frio e geada

A tolerância ao frio define limites de aptidão em altitudes/latitudes mais baixas; geadas podem causar perdas severas e até morte de plantas, especialmente em talhões jovens. Estudos recentes com VANTs mostram que índices espectrais conseguem mapear dano e orientar intervenções localizadas após o evento. Em termos de limiar, valores na ordem de -2°C (tronco) e -3°C (folha) já são críticos.

Nutrição e biologia do solo: N e K no centro, com S, Ca e Mg “tracionando” resiliência

N e K dominam a demanda anual; parcelamentos/fertirrigação elevam a eficiência (sobretudo em *canephora* irrigado), e o K é crucial em ambientes de alto DPV por seu papel osmótico/estomático. S, Ca e Mg precisam ser monitorados por análise foliar/solo, e micronutrientes (B, Zn, Mn) devem receber atenção em solos com pH elevado ou muito arenosos. A biologia do solo (MO, cobertura, diversidade microbiana) melhora a infiltração e amortece variações de umidade e temperatura, refletindo em gs mais estável ao longo do dia. Guias regionais e manuais de adubação da pesquisa pública sustentam esses princípios.

Diretrizes por ambiente

Sul de Minas/Mogiana/Caparaó — *C. arabica*

Riscos: frio outono-inverno e calor/estiagens no enchimento.

Arranjo: densidades medianas visando LAI $\sim 3-5$ com boa areação; podas regulares para conter bienalidade.

Solo: calagem para V% 60–70% e pH(CaCl_2) 5,2–5,8, gessagem se houver acidez subsuperficial; cobertura permanente.

Água: em sequeiro, usar ZARC para posicionar plantio e manejar “seco curto” pré-florada; irrigação suplementar (quando disponível) com $\text{Kc} \times \text{ET}_0$ e leitura de Tfolha/gs.

Cerrado Mineiro/Goiás/Oeste da BA — *C. arabica*

Riscos: DPV alto primavera-verão e veranicos; calor no enchimento.

Arranjo: densidades um pouco maiores para fechar dossel cedo, sem déficit de areação; mulch abundante.

Sombra moderada (20–30%) como ferramenta ecofisiológica onde a carga térmica é alta, sopesando possíveis perdas de pico de rendimento vs estabilidade/qualidade.

Água: irrigação de suporte nos picos de ETo; usar Kc-LAI para refinar lâminas, preferindo abordagem dual quando houver palhada/entrelinhas ativas.

Norte do ES/RO/BA sul — *C. canephora* (conilon/robusta)

Base do sistema moderno: irrigação + adensamento + manejo de hastes (multiestípete) e sincronização de floradas por controle hídrico (seco controlado + reidratação).

Nutrição: altas respostas a K; fertirrigação escalonada.

Solo: atenção a acidez subsuperficial (gesso) e a PR sob mecanização; cobertura permanente.

ZARC: seguir portarias 6 e 7/2024 (sequeiro/irrigado) por estado/DF.

Monitoramento ecofisiológico e diagnóstico

Trocas gasosas/porometria: A , g_s e E em manhã vs tarde (folhas expostas) revelam restrições estomáticas por DPV/água.

Fluorescência: F_v/F_m , Φ_{PSII} e NPQ sinalizam fotoinibição/recuperação; quedas persistentes pedem investigação nutricional/hídrica.

Termografia infravermelha: Tfolha como proxy de g_s e estresse térmico, sensível a variações rápidas de DPV.

Sensoriamento remoto (UAV): índices espectrais para uniformidade intra-talhão e mapeamento de geada/estresse pós-evento.

Estresses combinados e trade-offs de manejo

Seca + calor + alta luz raramente somam efeitos de maneira linear, podem ser sinérgicos (i.e., g_s baixo + DPV alto $\rightarrow$ aquecimento foliar, exigindo mais fotoproteção). Adensar melhora a fração de radiação usada (maior transpiração/evaporação sombreadora do dossel), mas sob água limitante densidades muito altas penalizam crescimento no crítico e WUEg, além de elevarem risco de doença se a areação cair. Mitigações eficientes combinam: perfil de solo funcional (química + física), mulch/palhada, sombrite ou árvores quando o sítio é quente/seco, ritmo de N e K ajustado ao crescimento e, se possível, irrigação de precisão. O aumento de $[CO_2]$ atenua parte dos danos do calor em *C. arabica* quando a água não limita, mas não compensa déficits hídricos prolongados.

- CAPÍTULO 4 -

Ecofisiologia da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) no Brasil

A cana-de-açúcar é uma gramínea semi-perene de metabolismo C₄, cultivada em ampla faixa climática no Brasil para produção de açúcar, etanol e bioeletricidade. Sua notória eficiência fotossintética e a capacidade de formar grande área foliar e colmos ricos em sacarose permitem produtividades de biomassa superiores às da maioria das culturas anuais. Porém, esse teto fisiológico só se traduz em rendimento quando o sistema solo-planta-atmosfera está bem acoplado: raízes ativas em profundidade, dossel que intercepta e utiliza radiação de forma eficiente, água disponível sem restrições críticas e manejo nutricional afinado com a partição fonte-dreno (folhas/colmos). O objetivo deste capítulo é integrar os fundamentos ecofisiológicos, fotossíntese C₄, interceptação e uso da radiação, relações hídricas, crescimento radicular, partição de assimilados e maturação, às decisões agronômicas de plantio, adubação, irrigação, manejo de palhada e colheita, com ênfase nas condições brasileiras (sequeiro e irrigado, cana-planta e socas).

Morfofenologia e estádios

Arquitetura e órgãos

A cultura forma touceiras de colmos cilíndricos com nós/internós, folhas alternas (bainha + lâmina) e um sistema radicular fasciculado, com raízes de origem do “set” (gemas do colmo-semente) e, depois, raízes adventícias (“shoot roots”) que sustentam a safra e as socas. A literatura clássica descreve sistemas com grande densidade radicular superficial, raízes orientadas para baixo e, em alguns materiais, feixes profundos,

com atividade hídrica documentada além de 2 m e relatos históricos de profundidades superiores a 6 m quando o ambiente permite. A distribuição com a profundidade decai exponencialmente e é fortemente modulada por textura, estrutura, compactação e manejo.

Estádios operacionais (cana-planta) — (i) Germinação/brotação (0–45 d): dependente de temperatura do solo e umidade no sulco; (ii) Perfilhamento (até ~120 d): define população de colmos efetivos; (iii) Crescimento rápido (~120–300 d): expansão do IAF e alongamento de colmos; (iv) Maturação: desaceleração do crescimento vegetativo, aumento de °Brix/Pol e pureza do caldo. Nas socas o ciclo é mais curto, com forte sensibilidade a danos de soqueira/altura de corte, compactação por tráfego e reservas de colmo pós-colheita que alimentam o rebalço fonte–dreno.

Duração do ciclo — Em ambientes tropicais brasileiros, predominam “cana de ano” (≈ 12 meses) e “cana de ano e meio” (≈ 15 –18 meses). O tempo térmico (graus-dia) e a disponibilidade hídrica determinam a velocidade de fechamento do dossel e a taxa de alongamento dos colmos. Em casos de alto potencial (água/nutrição não limitantes e temperaturas elevadas, porém não excessivas), o dossel pode se fechar ~70–80 dias após o plantio, explicando produtividades excepcionais de biomassa observadas em estudos de alto insumo no NE brasileiro.

Fotossíntese C4, interceptação de radiação e eficiência

Via C4 — A cana apresenta anatomia Kranz e uma via C4, com atividade da pepcase detectada em diferentes intensidades, o que lhe confere alta taxa fotossintética sob radiação intensa e temperaturas elevadas, com baixa fotorrespiração. Essa bioquímica sustenta altas taxas de assimilação (A) em dosséis fechados e luminosos, desde que água e nitrogênio não limitem a condutância estomática e as reações bioquímicas associadas.

Interceptação luminosa — A fração de PAR absorvida ($fPAR$) cresce à medida que o índice de área foliar (IAF) aumenta; cana de alto vigor atinge $IAF > 4$ –5, com coeficiente de extinção de luz (k) em torno de 0,45–0,50 em arranjos comuns. Em campo, a eficiência de uso da radiação (RUE) para a matéria seca tende a variar, em lavouras bem manejadas,

aproximadamente entre 1,5 e 2,8 g MS MJ⁻¹ de PAR interceptada, com variações de densidade, arquitetura e microclima. Ensaios no NE brasileiro estimaram $k \approx 0,48-0,51$ e quantificaram a conversão energética do dossel sob dois espaçamentos, demonstrando que o arranjo de linhas modula a distribuição de luz e a RUE efetiva.

Fonte–dreno e acúmulo de sacarose — Durante o perfilhamento, a partição favorece colmos (crescimento estrutural). A maturação envolve ajuste de drenos e metabolismo para acumular sacarose no parênquima do colmo; noites mais amenas e leve déficit hídrico benigno deslocam o balanço fonte–dreno a favor do acúmulo de açúcar, desde que não se perca massa de colmo por estresse excessivo. O uso de maturadores químicos (p. ex., glifosato em doses subletais, etefom, sulfometuron) insere-se como ferramenta pontual para antecipar e concentrar maturação em cenários específicos, sempre condicionada ao ambiente e à legislação.

Relações hídricas, demanda de água e coeficientes de cultura

Demanda sazonal e fases sensíveis — O consumo hídrico ao longo do ciclo varia amplamente ($\approx 900-2.500$ mm), de acordo com duração do ciclo, clima e manejo (sequeiro vs irrigado). As fases mais sensíveis a déficit são: estabelecimento/brotação, perfilhamento inicial e alongação de colmos. Próximo da colheita, déficits moderados podem favorecer a sacarose, mas déficit severo reduz massa de colmos e açúcar total recuperável (ATR). Em trópicos úmidos/subúmidos, o pico de ET_c ocorre no período de IAF máximo, com evapotranspiração diária frequentemente acima de 5–6 mm quando a água não limita. Sínteses brasileiras recentes consolidam valores regionais de ET e requisitos de irrigação em diferentes climas.

K_c — Os coeficientes de cultura (K_c) de referência (condição padrão FAO-56) para cana são tipicamente K_{c_ini} $\approx 0,4$; K_{c_mid} $\approx 1,20-1,25$; K_{c_end} $\approx 0,7-0,8$, com variações por clima e manejo. Em ambientes de alta demanda evaporativa (DPV elevado, ventos), o K_c efetivo pode ficar $< 1,0$ mesmo com dossel fechado, porque o fechamento estomático diante de DPV alto reduz a fração transpirativa da ET_c. A abordagem dual (K_{cb} + K_e), que separa transpiração do dossel (K_{cb}) da evaporação do solo (K_e), é especialmente útil em gotejo/fertirrigação e em áreas com palhada.

ET_o e critério operacional — Estimar lâminas a partir de ET_o (Penman–Monteith FAO-56) e K_c/K_{cb} é prática consolidada para irrigação suplementar. Em regiões brasileiras, integrações agrometeorológicas e observações de campo ajudam a definir calendários e potenciais de irrigação por micro-regiões. Ferramentas de sensoriamento remoto, como o geeSEBAL (SEBAL no GEE), têm sido validadas em cana irrigada para estimar ET_a e qualificar o manejo em escala de talhão.

Palhada e frações de ET — Em sistemas de colheita mecanizada sem despalha a fogo, a palhada reduz K_e (evaporação do solo), aumenta armazenamento de água no perfil e pode manter ET_c por mais tempo sob estiagens, porque retarda a perda de água superficial e protege a interface solo–atmosfera; esses efeitos favorecem a estabilidade inter-safras, com trade-offs discutidos adiante.

Temperatura, fotoperíodo e limites térmicos

Faixas térmicas por processo — A cana germina/brota melhor em 25–32 °C (base térmica variável ~12–16 °C). O alongamento de colmos e o crescimento foliar performam em ≈ 28–32/35 °C; abaixo de 20 °C desacelera, e acima de 35 °C surgem perdas por calor. Na maturação, dias ensolarados e noites amenas (≈ 18–22 °C) favorecem o acúmulo de sacarose. Estudos fisiológicos detalhados demonstram alterações na alocação e no armazenamento de açúcar quando se cultiva abaixo ou acima do ótimo, destacando a importância de combinar clima local e calendário de colheita. O fotoperíodo tem efeito secundário em comparação ao tempo térmico.

Fechamento de dossel como meta térmica — Em condições tropicais com insumos não limitantes, fechar o dossel até ~70 dias após o plantio (alto IAF/fPAR) explica parte dos casos de altíssimas produtividades; esse “alvo” resulta da combinação de temperaturas elevadas, mas não excessivas, e regime hídrico/nutricional que sustenta crescimento contínuo.

Sistema radicular, física do solo e qualidade estrutural

Raiz como gargalo/seguro — Em cana, a captação de água e nutrientes depende de um sistema radicular vigoroso e profundo. Revisões mostram grande plasticidade, mas um padrão recorrente de alta densidade nas camadas superficiais e atividade hídrica detectável abaixo de 2 m quando o solo permite. Camadas adensadas e alta resistência à penetração (> 2 MPa) limitam alongamento radicular, atrasam fechamento do dossel e reduzem a resiliência hídrica. Planejar tráfego controlado, manejar a umidade de colheita e realizar subsolagem dirigida por diagnóstico são estratégias-chave para preservar a faixa hídrica menos limitante (LLWR) e o volume de solo explorável.

Plantio e renovação — Em renovação de área (cana-planta), o preparo da área afeta fortemente o ambiente radicular e o rendimento da primeira colheita, com evidências em Cerrado de que sistemas que aliviam compactação e otimizam a estrutura elevam enraizamento e produtividade. Em cultivares brasileiras sob fertirrigação subsuperficial, estudos com minirrizotrons estimaram profundidade efetiva de enraizamento e o perfil de distribuição, útil para calibrar Kcb por camada.

Nutrição mineral, calagem/gessagem e reciclagem orgânica

Calagem e gessagem — Em muitos Latossolos, trabalhar com pH (H_2O) próximo de 6,0 e $V\% \approx 60$ é um alvo operacional frequente. A gessagem complementa a calagem quando há acidez subsuperficial/ Al^{3+} em excesso, elevando Ca^{2+} em profundidade e favorecendo o aprofundamento radicular; sua dose depende de textura/CTC e diagnóstico. A relação entre calagem e potássio é sensível: supercalagem pode afetar a disponibilidade de K e micronutrientes, exigindo manejo cuidadoso.

Macronutrientes

Nitrogênio (N): a resposta depende de matéria orgânica, palhada e histórico; doses e parcelamentos ajustam-se ao sistema (planta vs soca) e à meta (açúcar vs biomassa). Fósforo (P): foco no plantio (no sulco), com manutenção estratégica em solos de baixa disponibilidade. Potássio (K):

exigência elevada e reciclagem intensa via palhada e vinhaça; adubação posicionada (sulco, a lanço, fertirrigação) e fonte/dose compatíveis com textura e regime de chuvas. Revisões sobre vinhaça mostram ganhos de fertilidade e de qualidade do solo quando bem manejada (inclusive como fonte de K), ao mesmo tempo em que apontam riscos e a necessidade de critérios ambientais (dose, área, distância de cursos d'água, monitoramento).

Fontes orgânicas e economia circular — Vinhaça e torta de filtro integram estratégias de reciclagem de nutrientes e água no sistema canavieiro; sínteses técnico-científicas relatam melhoria de atributos químicos, físicos e biológicos do solo e contribuição significativa de K e água às lavouras quando usados com governança ambiental (rastreamento de cargas, limites de aplicação, risco de salinização localizada). Há inovação recente em ultrafiltração/condicionamento de vinhaça para aumentar eficiência e reduzir custos logísticos.

Diretrizes de adubação — Manuais brasileiros de fertilidade para cana detalham metas de análise de solo/folha, balanços de exportação e recomendações por textura e ambiente; a atualização frequente desses guias e a integração com dados de produtividade/qualidade são essenciais à tomada de decisão por talhão.

Palhada, colheita e balanço de carbono

A colheita crua deposita $\approx 8\text{--}20 \text{ t MS ha}^{-1}$ de palhada (varia por cultivar/ambiente), reduz a evaporação direta do solo, diminui a amplitude térmica superficial e contribui para o estoque de carbono. Por outro lado, pode imobilizar N (relação C:N elevada), abrigar pragas/doenças e exigir ajustes finos nas doses/timing de N e K. Revisões de decomposição de palhada no Brasil quantificam ritmos de mineralização e cenários em que remoções parciais (para fins energéticos) reduzem C do solo e água armazenada, penalizando a resiliência hídrica.

Estresses abióticos: seca, calor, frio e combinações

Déficit hídrico e DPV — Em DPV elevado, a cana regula a condutância estomática (gs), antecipando queda de transpiração e K_c efetivo, mesmo sem limitação hídrica imediata no solo; o efeito protege o aparato fotossintético, mas reduz a fração transpirativa da ET e pode limitar A e alongamento de colmos quando persistente. Esse comportamento explica o $K_c_mid < 1$ observado em climas quentes e secos apesar de dossel fechado.

Calor — Temperaturas acima do ótimo ($\geq 35\text{ }^{\circ}\text{C}$) elevam o risco de distúrbios no crescimento e no balanço de sacarose, sobretudo quando coincidem com DPV alto e ventos secos. O manejo com palhada, irrigação estratégica e seleção varietal ajuda a amortecer picos térmicos do dossel.

Frio e geada — Temperaturas $< 8\text{--}12\text{ }^{\circ}\text{C}$ desaceleram drasticamente processos fisiológicos; geadas definem limites de aptidão em altitudes/latitudes de risco, impondo ajustes de calendário (plantio/colheita), escolha de materiais adaptados e planejamento de paisagem (barreiras de vento, topografia). Diretrizes do ZARC consolidam o risco térmico por decêndio e tipo de solo/ciclo.

Estresses combinados — Secas tardias + calor + alta radiação tendem a acelerar senescência e reduzir a vida útil do canavial. Em contrapartida, déficits moderados e de curta duração no fim do ciclo podem intensificar maturação (aumentar $^{\circ}\text{Brix}/\text{Pol}$) se o manejo priorizar ATR por unidade de água (produtividade da água para açúcar), e não apenas massa de colmos.

Arranjo espacial, arquitetura e fechamento rápido do dossel

O tempo até o fechamento é um dos grandes determinantes do rendimento. Em ambientes de alto potencial, fechar o dossel em ~ 10 semanas (≈ 73 dias, em média) explica ganhos de produtividade porque aumenta precocemente a fração de radiação absorvida (fPAR), reduz o crescimento de plantas daninhas e maximiza a RUE do ciclo. Ajustes de densidade, espaçamento (linhas simples/duplas, 1,5–1,8 m ou arranjos combinados) e arquitetura (folhas mais eretas) contribuem para atingir IAF alvo sem comprometer a colheita mecanizada.

Irrigação e manejo de água (sequeiro e irrigado)

Planejamento em sequeiro — No Brasil Centro-Sul, escalonar plantios para que perfilhamento e início do grand growth coincidam com a estação chuvosa é estratégia central. O ZARC por estado/município/ciclo, alimentado por séries históricas e modelos de balanço hídrico e limites térmicos, indica janelas de menor risco (20–30–40%), orientando decisões de época e, por consequência, de colheita.

Irrigação suplementar — Onde disponível, utilizar $ET_o \times K_c / K_{cb}$ com gatilhos por fase (umidade do solo por θ /tensão) e priorizar açúcar por água no período de maturação. Em demanda evaporativa alta, considerar K_c efetivo < FAO-56 devido a fechamento estomático por DPV; calibrar por talhão reduz erros de lâmina. Adoção de sensoriamento remoto (geeSEBAL), aliado a observações em solo, tem mostrado ganhos de eficiência no manejo em cana irrigada no Brasil.

Maturação: clima, “seco controlado” e maturadores

A maturação é favorecida por dias ensolarados e noites amenas; estresse hídrico leve e transitório pode concentrar açúcares sem perda significativa de biomassa de colmos, desde que o “seco controlado” não desencadeie senescência precoce. Em contextos específicos, maturadores (p. ex., glifosato em dose subletal, etefom, sulfometuron-metílico) antecipam e uniformizam a colheita, mas seu desempenho e a resposta varietal são condicionados por clima e fisiologia de dossel, exigindo validação local e cumprimento regulatório.

Qualidade tecnológica e trade-offs

Indicadores — °Brix, Pol, pureza e ATR guiam a colheita. Em planejamento de irrigação e nutrição, é prudente perseguir produtividade da água para açúcar (e não só para massa de colmo). Palhada melhora estabilidade de ATR entre safras ao amortecer estresses hídricos, mas pode demandar ajustes de N para mitigar imobilização.

- CAPÍTULO 5 -

Ecofisiologia do Algodão (*Gossypium hirsutum*) no Brasil

O algodoeiro herbáceo (*G. hirsutum*) é uma espécie C3, perene e cultivada como anual, de hábito indeterminado e elevada plasticidade fenotípica. Sua ecofisiologia é fortemente modulada pelo microclima do dossel (radiação, temperatura foliar e DPV), pela água do solo (perfil, LLWR) e pela nutrição (especialmente N e K), com reflexos diretos em retenção de estruturas reprodutivas, massa de maçãs/capulhos e qualidade de fibra. Este capítulo integra processos (trocas gasosas, fotoproteção, fonte-dreno), estádios fenológicos e fatores edafoclimáticos brasileiros (Cerrado, MATOPIBA, MS/GO/MT/BA) em diretrizes práticas de manejo.

Morfologia funcional e fenologia

Arquitetura — eixo principal com ramos vegetativos e frutíferos; folhas cordiformes com tricomas (pubescência) que influenciam energia/limiar térmico; raiz pivotante com laterais profundas quando o perfil não é adensado/ácido.

Estádios práticos — (i) emergência; (ii) botão floral; (iii) florescimento; (iv) frutificação/enchimento de maçãs; (v) abertura de capulhos e maturação. O crescimento é indeterminado: vegetativo e reprodutivo coexistem, exigindo balanço via adensamento, N/K e regulador de crescimento (cloreto de mepiquat) quando necessário.

Tempo térmico (DD60) — o desenvolvimento é bem descrito por graus-dia base 15,6 °C (60°F). Alvos operacionais: 1º square ~425–475 DD60; 1ª flor ~775–850 DD60; abertura de capulhos ~>1.600 DD60 após florescimento; colheita ~2.200–2.600 DD60 (varia por ambiente/cultivar).

Fisiologia do crescimento e produção

Fotossíntese C3, estômatos e DPV

A (assimilação) é fortemente acoplada a g_s (condutância estomática) e ao DPV; há típica depressão vespertina de A em dias secos/quentes. A pubescência e o ângulo foliar modulam a temperatura de folha.

iWUE (A/g_s) e WUE (A/E) são métricas úteis para comparar materiais/sítios; balanço adequado de N e K sustenta fonte (folha) e dreno (maçã/fibra) sob DPV alto.

Fonte–dreno e definição do rendimento

Número de maçãs/capulhos e retenção em posições basais/primárias definem o potencial; o período chave → florescimento → 3 semanas pós-flor é crítico para retenção.

Excesso vegetativo (N/água altos + espaçamento largo) desloca assimilados para folhas/ramos → maior aborto e atraso na maturação; mepiquat ajuda a restabelecer a relação fonte–dreno.

Temperatura e calor

Ótimos de crescimento/pegamento próximo de 30 °C; picos > 35–36 °C no florescimento/enchimento reduzem viabilidade de pólen, alongamento do tubo polínico e retenção de maçãs; noites acima de 24–26 °C aumentam respiração e pioram o balanço fonte–dreno.

Água, demanda evaporativa e Kc

Demanda

Necessidade hídrica do ciclo (sequeiro/irrigado): ~600–1.000+ mm, variando com duração do ciclo, clima e manejo. Picos de ETc do florescimento ao enchimento.

Fases mais sensíveis ao déficit: estabelecimento, botonização (squares), florescimento e fase inicial de enchimento de maçãs.

Coeficientes de cultura

Kc (simples, referência): ini $\approx 0,35-0,40$; meio $\approx 1,15$; final $\approx 0,50-0,60$ (antes da queda foliar). Em alta demanda (VPD alto/vento), o Kc efetivo pode ficar $< 1,0$ mesmo com dossel fechado.

Abordagem dual ($K_{cb} + K_e$) é recomendada em gotejo/fertirrigação e em SPD com palhada, separando transpiração do dossel e evaporação do solo.

Estratégias

Em sequeiro, posicionar semeadura para coincidir botonização–florescimento com a estação chuvosa (ZARC) e fechar dossel cedo (densidade/linhas). Em irrigação, manejar por $ETo \times K_c / K_{cb}$, umidade/tensão no perfil e limites por fase; buscar WP (kg de fibra por mm) elevado.

Solo, calagem e nutrição

reação — em Cerrado, mirar pH ($CaCl_2$) $\sim 5,5-6,0$ e V% $\sim 50-60$, corrigindo acidez subsuperficial (gesso) quando indicado.

Nitrogênio (N) — alta resposta, mas excessos elevam área foliar e reduzem retenção/precocidade; parcelamentos em cobertura conforme chuva/irrigação.

Fósforo (P) — foco no sulco (plantio) e manutenção por análise do solo/estado; PP limita crescimento inicial/raiz.

Potássio (K) — mais demandado pela cultura; calibrar dose conforme K no solo e meta produtiva; atenção à manutenção em sistemas intensivos e à qualidade da fibra (micronaire/maturidade) sensível ao suprimento de K.

Enxofre e micronutrientes — S em solos arenosos/oxissolos; monitorar B/Zn/Mn/Fe (fibra e pegamento).

Arranjo espacial, densidade e reguladores

População e espaçamento — referência operacional para sistema convencional: $0,80-0,90$ m entre linhas com $\sim 80-120$ mil plantas ha^{-1} ($\approx 8-12$ plantas m^{-1}); em adensado ($0,45-0,50$ m), reduzir plantas por metro para manter LAI sem excesso vegetativo.

Arquitetura do dossel — linhas mais estreitas e densidades moderadas reduzem o período crítico de competição com daninhas, fecham dossel mais cedo e elevam a fração de T/ET. Ajustar à cultivar/ambiente.

Reguladores de crescimento (mepiquat) — ferramenta para conter altura e alongamento de ramos, melhorar retenção nas primeiras posições e uniformizar maturação, sobretudo em ambientes de alto N/água.

Cavitação, embolia e segurança hidráulica

conceitos-chave — Cavitação é a formação de bolhas na seiva xilemática sob forte tensão; quando os vasos ficam preenchidos por ar ocorre embolia, reduzindo a condutância hidráulica e o suprimento de água ao dossel.

Estratégia do algodoeiro — Em *Gossypium hirsutum*, a cultura evita falha hidráulica via fechamento estomático precoce e, em secas prolongadas, abscisão foliar, preservando a integridade do xilema de caule e raiz. As folhas são mais vulneráveis à embolia do que caules e raízes, e o fechamento estomático (g_s) antecede o início de embolia, configurando margem de segurança hidráulica positiva. Sinais acústicos de cavitação acompanham a queda de assimilação (A) e condutância estomática (g_s) em seca controlada.

Segmentação hidráulica e órgãos reprodutivos — O sistema é segmentado: órgãos periféricos (folhas e estruturas reprodutivas jovens) cedem primeiro, protegendo o caule. Estudos recentes descrevem propriedades hidráulicas do pedicelo/maçã e a transpiração do fruto, úteis para reduzir aborto de maçãs sob estresse

Implicações práticas

planejamento hídrico: posicione pré-florescimento e florescimento nas janelas ZARC e evite veranicos nesta fase.

Gatilhos de irrigação: use potencial hídrico da folha (Ψ_{folha} , câmara de pressão) ou do caule (Ψ_{caule} , microtensiômetro ou método de ensacamento) para intervir antes de se atingir o g_s típico do material.

Dossel e DPV: feche o dossel cedo (densidade/espacamento) para reduzir temperatura foliar e DPV; monitore com termometria infravermelha.

Solo e nutrição: mantenha perfil descompactado, K e Ca adequados (parede/xilema), cobertura/mulch e gesso quando indicado.

Ciclos de seca-rega: evite regimes “liga-desliga” que provoquem ciclos repetidos de cavitação-refill (possível fadiga de cavitação); prefira lâminas estáveis no reprodutivo.

Procedimento de campo (resumo): medir Ψ_{folha} ao meio-dia (folha de sol) e ao amanhecer; registrar A, gs e temperatura foliar em dias representativos; acompanhar NDVI/NDRE e LAI para antecipar queda de condutância hidráulica. Em irrigado, integrar $E_{\text{To}} \times K_c / K_{cb}$ com Ψ .

Estresses abióticos e respostas

calor + seca (estresses combinados): reduzem g_s e A; picos térmicos no reprodutivo derrubam retenção de maçãs/capulhos e encurtam fibras. Medidas: janelas ZARC, densidade/arquitetura para fechar dossel, manejo de K e uso de mepiquat; em irrigado, resfriar o dossel via lâminas oportunas.

Encharcamento/baixa aeração: limita raízes e aumenta abortos; evitar compactação e sulcos mal drenados.

Diretrizes regionais (Brasil)

mato Grosso/GO/MS (Cerrado) — priorizar semeadura de 1ª safra em janelas ZARC; em 2ª safra (póssoja), atenção a veranicos e ao menor potencial de água/temperatura. Densidades moderadas e mepiquat conforme vigor/cultivar.

Bahia (Oeste)/MATOPIBA — DPV alto e ventos: fechar dossel cedo; considerar arranjos mais estreitos; irrigação suplementar onde disponível.

Sul/Sudeste — risco de frio na implantação; ajustar semeadura, cultivares e reguladores para garantir precocidade e evitar chuvas de colheita.

Monitoramento ecofisiológico (campo)

trocas gasosas/porometria (A, g_s , E) e iWUE em botonização e florescimento.

Clorofila/SPAD e $F_v/F_m/\Phi_{PSII}$ para status de N e fotoinibição em ondas de calor.

Clima de dossel — DPV, Tfolha (termometria IR), PAR e NDVI/NDRE para uniformidade; K_c/K_{cb} sazonal ajustado a LAI.

- CAPÍTULO 6 -

Ecofisiologia de Cultivos de Inverno no Brasil (Trigo, Cevada, Aveia e Canola)

Oscultivos de inverno ocupam papel central na sustentabilidade dos sistemas brasileiros de sequeiro e irrigados, sobretudo no Sul, Sudeste e Centro-Oeste de altitude. Como espécies C3, compartilham princípios ecofisiológicos: (i) fotossíntese sensível a temperatura e déficit de pressão de vapor (DPV); (ii) fonte–dreno modulando o número de estruturas reprodutivas e o enchimento de grãos/síliquas; (iii) forte influência de vernalização (exposição ao frio) e fotoperíodo na transição vegetativa→reprodutiva; (iv) respostas marcantes a frio/geada, calor e déficit hídrico em janelas críticas. Integrar época de semeadura (ZARC), arranjo de plantas, água (ETc) e nutrição posiciona os estádios sensíveis (antese/floração e enchimento inicial) em condições menos estressantes, elevando rendimento e qualidade.

Bases ecofisiológicas comuns

Fotossíntese C3, estômatos e DPV

A assimilação de CO₂ (A) em C3 aumenta com PAR até a saturação e é modulada por temperatura e condutância estomática (g_s). Em tardes secas/ventosas, o DPV elevado induz fechamento estomático (queda de g_s) e depressão vespertina de A. O acoplamento A–g_s explica parte da variabilidade intratalhão e entre ambientes; iWUE = A/g_s e WUE = A/E (ou rendimento/ET) são úteis para comparar materiais e manejos, especialmente quando há limitação de água.

Fonte–dreno e definição de rendimento

em cereais de inverno, o número de grãos m^{-2} (NGM) resulta do número de espigas/espiguetas e da fertilidade de flores na antese; a massa de grão depende da duração e da taxa de enchimento. Em canola, o rendimento é dado por panículas $\text{m}^{-2} \times$ grãos por panícula $\times$ massa de mil grãos; florescimento bem sincronizado e dossel estável melhoram a distribuição vertical de panículas. Limitações estomáticas (água/calor/vento) e térmicas (frio, geada, calor) na janela crítica (emborrachamento→antese→início do enchimento) são as de maior impacto.

Vernalização e fotoperíodo

trigo, cevada e aveia apresentam níveis distintos de requerimento de vernalização e sensibilidade ao fotoperíodo (longos dias) que regulam a transição para o reprodutivo e a duração das fases (perfilhamento, alongamento, espigamento). Em canola de primavera, a vernalização é baixa; temperatura amena na implantação e no florescimento é decisiva para pegamento e enchimento inicial.

Temperatura, grausdia e janelas

o tempo térmico (GDD) organiza o avanço fenológico. Faixas ótimas típicas para crescimento vegetativo dos C3 de inverno situam-se entre 15–22 °C; abaixo de ~5 °C, o crescimento desacelera acentuadamente; acima de ~28–30 °C, há encurtamento de fases e queda de área foliar funcional. Em antese, geadas leves a moderadas podem esterilizar flores; picos de calor reduzem viabilidade polínica, fecundação e encurtam o enchimento.

Fenologia e morfologia por cultura

Trigo (*triticum aestivum*)

Arquitetura: colmo com nós/internódios, folhas alternas, sistema radicular fasciculado; perfilhos determinam parte do NGM. Escalas BBCH/Feekes: perfilhamento (Feekes 2–4), alongamento (5–7), emborrachamento (10), espigamento (10.1–10.5), antese (10.5.1), grão leitoso (11.1), pastoso (11.2), duro (11.3) e maturação fisiológica.

Vernalização/fotoperíodo: cultivares de primavera predominam. Em regiões mais quentes, materiais menos sensíveis ao dia e com baixa vernalização antecipam espigamento/antese.

Janela crítica: do emborrachamento à antese e 10–15 dias após; geadas ($\approx -2\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$) podem esterilizar espiguetas; calor em antese/enchimento inicial reduz NGM e massa.

Cevada (*Hordeum vulgare*)

Arquitetura: semelhante ao trigo, com espiguetas bem definidas; qualidade de malte requer proteína moderada e uniformidade de maturação. A antese é sensível a geada e calor; a ramificação/perfilhamento deve ser ajustada para evitar excesso vegetativo que aumente acamamento.

Aveia (*Avena sativa* / *A. strigosa*)

Arquitetura: panícula, alta plasticidade (grãos, forragem e cobertura). Em grãos, a estabilidade depende de posicionar antese fora de geadas e de ondas de calor. *A. strigosa* é usada como cobertura/pastejo, gerando palhada de alta qualidade (benefícios ao SPD e à ciclagem de nutrientes).

Canola (*Brassica napus ssp. oleifera*)

Arquitetura: haste principal e ramos laterais; LAI com pico no florescimento; flores amarelas (autógamas, alógamas ocasionais); síliquas ao longo do dossel. Em ambientes amenos, pleno sol maximiza produtividade; em ondas de vento seco/DPV alto e calor, há maior risco de aborto floral e queda de espiguetas. O Boro (B) é crítico no florescimento (crescimento do tubo polínico) e o Enxofre (S) na síntese de óleo/proteína.

Água, ETc e coeficientes de cultura (Kc)

Demanda hídrica e sensibilidade por fase

Trigo/cevada/aveia (sequeiro): necessidade sazonal $\sim 300\text{--}550\text{ mm}$, com pico de ETc do alongamento ao início do enchimento. Em irrigado, o total aumenta conforme duração e clima.

Canola: demanda contínua do vegetativo ao florescimento e início do enchimento; déficits neste período reduzem espiguetas × grãos, a principal alavanca de rendimento.

Kc de referência

cereais de inverno: $Kc_{ini} \approx 0,30-0,40$; $Kc_{meio} \approx 1,10-1,15$; $Kc_{fim} \approx 0,25-0,40$ (antes da senescência total).

Canola: $Kc_{ini} \approx 0,35-0,45$; $Kc_{meio} \approx 1,05-1,15$; $Kc_{fim} \approx 0,25-0,45$.

Nota: em climas secos/ventosos (alto DPV/vento), o Kc_{meio} efetivo pode ficar $< 1,0$, pela redução estomática da transpiração e menor evaporação do solo sob palhada.

Kc dual ($Kcb+Ke$) e dinâmica por estádio

A abordagem dual separa transpiração do dossel (Kcb) e evaporação do solo (Ke), útil em gotejo/fertirrigação e sob palhada. Em trigo/cevada/aveia, o Kcb elevase do perfilhamento ao florescimento e cai na senescência; em canola, atinge o pico em florescimento (LAI máximo) e decresce com a queda foliar. Séries por dias após emergência evidenciam picos próximos à antese/início do enchimento, úteis para agendamento de irrigações.

Estratégias práticas de água

em sequeiro, usar ZARC para posicionar emborrachamento→antese com maior probabilidade de chuva; evitar semeaduras tardias que exponham antese a calor.

Em irrigado, manejar por $ET_o \times Kc/Kcb$ e umidade/tensão do solo; reduzir reposições no final para preservar qualidade (trigo/cevada/aveia) e evitar deiscência na canola.

Temperatura, frio, geada e calor

Estabelecimento e vegetativo

Germinação/emergência favorecidas por 10–20 °C e boa umidade. Geadas precoces podem reduzir estande (necrose de plântulas). Crescimento vegetativo ótimo em 15–22 °C; sob > 28–30 °C, a fenologia acelera e a área foliar funcional tende a reduzir.

Antese, florescimento e enchimento inicial (janela crítica)

Trigo/cevada/aveia: geadas durante espigamento/antese causam esterilidade; calor próximo à antese e no início do enchimento reduz viabilidade de pólen, encurta duração de enchimento e diminui massa de grãos. Em avaliações controladas e de campo, o estresse térmico nesse período explica grande parte da variação de rendimento intersafra.

Canola: frio intenso no florescimento e calor > ~30 °C com vento seco elevam aborto floral/queda de siliquas; o enchimento inicial exige água contínua e S/B disponíveis.

Solo, calagem e nutrição

Reação do solo e perfil

O desempenho maximiza com perfil descompactado, boa estrutura e reação ajustada (pH em CaCl₂ ou em H₂O, conforme recomendação local). Em solos argilosos e sob SPD, cuidar de camadas adensadas (tráfego controlado, rotação com raízes agressivas), pois o encharcamento reduz difusão de O₂, limita absorção e eleva perdas de N.

Macronutrientes

nitrogênio (N): nos cereais, define perfilhamento, fertilidade de espiguetas e proteína do grão (qualidade tecnológica); fracionar em coberturas no alongamento e préantese reduz risco de perdas e melhora eficiência. Na canola, N sustenta LAI e número de siliquas; excesso muito tardio atrasa a maturação e pode elevar acamamento.

Fósforo (P): crítico no estabelecimento e no perfilhamento (raízes/

meristemas).

Potássio (K): regula balanço hídrico/estomático, transporte de açúcares e qualidade (peso hectolítrico/proteína nos cereais; óleo na canola).

Enxofre (S): essencial para síntese de proteína/óleo; em canola, as exigências são mais elevadas que nos cereais de inverno.

Micronutrientes

boro (B): crítico na canola (florescimento/pegamento; crescimento do tubo polínico); deficiência implica aborto floral e menos grãos/síliqua.

Zinco (Zn), Manganês (Mn), Cobre (Cu): influenciam perfilhamento, resistência a estresses e sanidade em cereais de inverno; ajustes conforme análise foliar/solo.

Estresses abióticos e manejo

Frio e geada

Trigo/cevada/aveia: geadas em espigamento/antese podem causar esterilidade parcial/total; no enchimento, reduzem taxa de deposição de amido e resultam em grãos chochos.

Canola: geadas reprodutivas provocam aborto e quedas significativas de síliquas; aclimação prévia atenua danos, mas não elimina riscos.

Diretrizes regionais

Sul (RS/SC/PR)

Riscos: geadas tardias, chuva na colheita (qualidade) e períodos de vento/alto DPV na primavera. Trigo/cevada: alinhar antese fora de ondas de frio; em cevada para malte, controlar proteína com N calibrado e evitar acamamento (densidade/arranjo/cultivar). Canola: florescimento sob vento seco exige manejo de água e S/B. Aveia: ótima opção de rotação/palhada; em grãos, evitar calor tardio.

Sudeste (SP/MG de altitude)

Janelas mais curtas; trigo e aveia em altitudes médias; canola em sítios mais frios/altos. Em irrigado, atenção à qualidade (peso hectolítrico, teor de proteína/óleo) e à sanidade.

Centro-oeste (MS/GO/DF)

Trigo/cevada irrigados: risco de calor no reprodutivo e veranicos; manejar por Kc/Kcb e umidade/tensão do solo, posicionando antese para evitar picos térmicos. Canola em altitudes maiores/irrigada requer água contínua até o início do enchimento e S/B adequados.

ZARC — Zoneamento Agrícola de Risco Climático

Consultar as portarias vigentes por estado/município/cultivar/sistema (sequeiro/irrigado; inclusive duplo propósito em trigo). Usar as janelas $\leq 20\text{--}30\%$ de risco, ajustadas por tipo de solo e ciclo, para posicionar antese/floração fora de geadas/ondas de calor e maximizar a chance de chuvas efetivas nas fases de maior ETc.

- CAPÍTULO 7 -

Ecofisiologia das culturas do Tomate, Cebola, Alho e Cenoura

As hortaliças de maior relevância econômica no Brasil, como tomate (*Solanum lycopersicum*), cebola (*Allium cepa*), alho (*Allium sativum*) e cenoura (*Daucus carota* subsp. *sativus*), compartilham princípios ecofisiológicos comuns, mas exibem particularidades marcantes quanto a fotoperíodo, temperatura, exigência hídrica e estratégias de manejo. Este capítulo integra bases ecofisiológicas com recomendações práticas para ambientes brasileiros (Sul, Sudeste, Centro-Oeste/Cerrado, Nordeste e MATOPIBA), contemplando cultivo a céu aberto e sistemas protegidos (túneis, estufas), com foco em: (i) estrutura do dossel e captura de luz; (ii) relações hídricas e uso de coeficientes de cultura (K_c); (iii) desenvolvimento fenológico e estádios críticos; (iv) nutrição mineral e distúrbios fisiológicos; (v) adaptações edafoclimáticas.

Eixos ecofisiológicos transversais

fotossíntese e trocas gasosas (C_3): todas as espécies tratadas aqui são C_3 , com sensibilidade de A (assimilação) a DPV, temperatura da folha e fechamento estomático. A eficiência instantânea do uso da água ($iWUE = A/gs$) é um bom indicador comparativo entre cultivares e manejos.

Evapotranspiração e K_c : o manejo de irrigação via $ET_c = K_c \times ET_o$ (métodos FAO-56, coeficiente simples ou dual) é a ponte entre microclima e fisiologia de campo. O K_c varia por fase fenológica, arquitetura do dossel, cobertura do solo e frequência de molhamento superficial.

Partição de assimilados: a relação fonte-dreno muda rapidamente nos períodos reprodutivos (frutificação ou formação de bulbos/raízes), sendo estes os estádios mais sensíveis a estresses hídricos, térmicos e nutricionais.

Qualidade do produto: atributos como teor de sólidos solúveis (tomate), pungência e matéria seca (cebola/alho) e acúmulo de carotenoides (cenoura) respondem a microclima, nutrição e disponibilidade de água.

Parâmetros gerais úteis

dPV operante: 0,8–1,8 kPa em manhãs amenas e 2,0–3,5 kPa em tardes quentes de verão; acima de ~2,5–3,0 kPa, gs tende a cair acentuadamente, reduzindo A.

LAI funcional: LAI 2,5–3,5 costuma maximizar a fração de radiação fotossinteticamente ativa interceptada (fPAR) sem penalizar ventilação no dossel em campo; em protegido, LAI alvo pode ser ligeiramente menor no verão para evitar aquecimento do fruto/folha.

Reabilitação pós-estresse: após eventos de seca curta, priorizar lâminas pequenas e frequentes, evitando “choques hídricos” que agravam rachaduras de raiz (cenoura) e BER (tomate).

Tomate (*Solanum lycopersicum*)

Fenologia, arquitetura e ambiente

O tomateiro apresenta ciclo variável (90–140 dias após transplante, a depender de cultivar e ambiente) e grande plasticidade arquitetural sob condução tutorada (1–2 hastes) ou rasteiro (industrial). Em ambiente tropical/subtropical, temperaturas noturnas moderadas e dias não excessivamente quentes favorecem pegamento e desenvolvimento de frutos. Em cultivo protegido, a gestão de ventilação e sombreamento reduz temperatura foliar e DPV no entardecer.

Temperatura, frutificação e qualidade

Faixas térmicas de referência

Germinação/estabelecimento: 15–25 °C (ótimo), com emergência acelerada em 7–10 dias e stand mais uniforme.

Crescimento vegetativo: 18–25 °C favorecem expansão foliar e formação de inflorescências com entrenós moderados.

Frutificação/enchimento: noites entre 16–20 °C e dias 22–29 °C são favoráveis; noites ≥ 21 °C por vários dias reduzem viabilidade polínica e pegamento.

Pegamento floral e polinização

temperaturas diurnas muito elevadas ($> 32\text{--}35$ °C) desorganizam microsporogênese, espessam parede polínica e encurtam a fase receptiva; em protegido, ventilação e sombreamento leve (20–30%) reduzem temperatura de fruto/folha e melhoram pegamento.

Qualidade industrial e de mesa

licopeno: maximizado em faixas amenas de temperatura do fruto; calor extremo suprime biossíntese e eleva carotenoides alternativos, alterando a coloração.

Sólidos solúveis (°Brix) e acidez: manejo de K e água durante enchimento de frutos molda o balanço açúcar/ácido. Déficit hídrico controlado no final do ciclo pode elevar Brix, mas risco de rachadura exige cautela.

Relações hídricas e Kc

abordagem prática: utilizar FAO-56 (Kc simples) ou método dual ($K_{cb} + K_e$) ajustado ao microclima e ao sistema de irrigação (gotejamento reduz K_e). Em campo, valores de Kc típicos: inicial $\approx 0,6$; intermediário $\approx 1,10\text{--}1,15$; final $\approx 0,70\text{--}0,90$. Em cultivo protegido, o Kc é sensível a ventilação, densidade e coberturas plásticas.

Protocolos de irrigação:

- Estime ETo diária (Penman–Monteith/estação local).
- Aplique Kc do estádio (ou K_{cb} e K_e no dual, reduzindo K_e sob gotejo).
- Corrija por eficiência do sistema (ex.: 0,92 no gotejo; 0,70–0,85 na aspersão, conforme vento/uniformidade).
- Converta para mm/parcela e programe turnos curtos no início da manhã.

Estádios críticos: botão floral→floração→pegamento e início de enchimento. Interromper oscilações fortes de umidade do solo (evitam rachaduras e BER). Indicadores em tempo real: tensiômetro (−10 a −25 kPa em solos francos), SPAD (N), Tleaf-Tair (termômetro IR) e Fv/Fm (fotoinibição).

Nutrição e distúrbios fisiológicos

- Cálcio: a apodrecimento apical está ligado a baixa disponibilidade de Ca no fruto combinada a fluxos transpiratórios irregulares. Estratégias: manter umidade estável do solo (sem picos de estresse), garantir Ca no sistema radicular (calagem bem-feita; fontes cálcicas na fertirrigação quando cabível), conduzir o dossel para evitar supertranspiração de folhas em detrimento dos frutos e evitar excesso de N e K em fases iniciais da frutificação; evitar poda foliar excessiva que exponha os frutos ao sol direto e aumente a temperatura de fruto.

- Potássio: ajusta Brix e coloração, mas doses muito altas em início de frutificação podem competir com Ca no xilema. Balanceamento N–K–Ca é chave para produtividade e qualidade.

- Magnésio e micronutrientes: Mg sustenta clorofila e resposta a alta irradiância; Zn/B influenciam frutificação e sanidade de flores.

Manejo ecofisiológico

densidade e poda: conduções mais abertas em épocas quentes para reduzir temperatura e melhorar aeração; densidade mais alta em épocas amenas para capturar luz sem sombreamento excessivo da camada de frutos.

Irrigação: priorizar gotejamento com turnos curtos; em picos de calor, iniciar irrigações no início da manhã para baixar temperatura foliar, complementando à tarde apenas se necessário (evitando molhamento noturno em sistemas de aspersão). O monitoramento por tensiometria (−10 a −25 kPa em solos francos) e balanço hídrico diário por ETc confere previsibilidade.

Cultivo protegido: ventilação cruzada, telados de sombreamento 20–30% no verão e controle de DPV para conter abortos florais e granizo de frutos.

Checklist prático (tomate)

- Planeje janela de plantio para colocar frutificação fora dos picos de calor.
- Use Kc por estágio e ajuste por sistema (Ke baixo no gotejo).
- Mantenha umidade estável para evitar BER; calibre N–K–Ca.
- Ventile/sombreie em protegido e adote poda/densidade compatíveis com a estação.

Cebola (*allium cepa*)

Fotoperíodo e classes de adaptação

A cebola é planta de dias longos para bulbificação, porém as cultivares se distribuem em três classes fotoperiódicas:

- Dias curtos (DC): iniciam bulbo com ~11–12 h de luz;
- Intermediários (DI): 12–14 h;
- Dias longos (DL): > 14 h.

No Brasil, utilizam-se principalmente DC e DI, ajustando datas de semeadura/transplante para coincidir o início da bulbificação com dias e temperaturas adequados. Exposição prolongada a baixas temperaturas (≈ 5–13 °C por semanas) pode induzir pendoamento (bolting), indesejável para produção de bulbos comerciais.

Sistema radicular e sensibilidade hídrico

o sistema radicular de cebola é rente e pouco profundo, com baixa densidade de raízes finas em comparação a outros cultivos; isso a torna muito sensível a compactação, encharcamento e déficits pontuais. A irrigação deve ser de baixa lâmina e alta frequência em solos leves; em bulking (engrossamento do bulbo), manter lâminas regulares sem excessos prolongados.

Água, Kc e estádios críticos

- Necessidade total de água: com variação aproximada de 350–650 mm por ciclo, conforme clima, ciclo e sistema de irrigação.

- Kc por estádios: valores de referência dependem do método e do sistema; em aspersão, Kc inicial é mais alto por conta de Ke (evaporação do solo). Em gotejo, Ke é reduzido e o Kc efetivo diminui na fase inicial; no bulbing (fase III), Kc volta a ser alto.

- Críticas: estabelecimento (muda/canteiro), transição vegetativa→bulbo e enchimento; déficits aqui reduzem calibre e matéria seca. Excesso de água na maturação prejudica cura e sanidade.

Nutrição e qualidade: enxofre e matéria seca

- Enxofre (S): chave para pungência (tioissulfatos) e matéria seca. Doses adequadas elevam sólidos e firmam bulbos; interações com N determinam pungência e conservação. Evitar excesso de N tardio que atrasa maturação e reduz sólidos.

- pH e calagem: cebola é sensível à acidez, com melhor desempenho em pH 6,0–6,5 e baixa saturação por Al^{3+} . Em solos ácidos, realizar calagem com antecedência.

- Micronutrientes: Zn e B participam da divisão celular e alongamento, afetando uniformidade de bulbos e emissão foliar.

Manejo ecofisiológico

- Escolha varietal x latitude/época: alinhar classe fotoperiódica com a janela local para que o fotoperíodo atinja o limiar quando a planta já tem massa foliar suficiente. Bulbificação precoce (fotoperíodo longo antes de área foliar plena) produz bulbos pequenos; tardia alonga o ciclo e expõe a riscos climáticos.

- Irrigação: turnos frequentes e uniformes; reduzir lâminas e suspender no final para facilitar cura. Em gotejo, linhas duplas por leira melhoram uniformidade.

- Solo: evitar camadas adensadas; garantir macro e microporosidade para oxigenação radicular.

Checklist prático

1. Posicione a classe DC/DI correta à latitude/época; evite bolting.
2. Mantenha turnos curtos e uniformes; atenuar lâminas na maturação.
3. Garanta S e pH 6,0–6,5; ajuste N para sólidos e conservação.

Alho (*allium sativum*)

Fases ecofisiológicas, vernalização e fotoperíodo

O desenvolvimento do alho pode ser esquematizado em duas grandes etapas:

1. Fase indutiva: requer fotoperíodo curto e temperaturas baixas (ex.: pré-plantio/frigorificação de bulbos) para diferenciação de bulbilhos e indução do crescimento do bulbo;
2. Fase morfogênica: demanda fotoperíodo mais longo e temperaturas moderadas para crescimento efetivo dos bulbilhos. Em regiões subtropicais/tropicais, a vernalização pré-plantio (0–10 °C por várias semanas) uniformiza e antecipa o ciclo, reduzindo pseudoperfilhamento e heterogeneidade.

Água, Kc e estádios críticos

- Necessidade hídrica: comumente 400–850 mm ao longo do ciclo, variando com clima e duração da cultivar. Déficit hídrico impacta fortemente calibre e uniformidade.

- Kc por estádios: inicial moderado, intermediário alto durante expansão foliar e enchimento do bulbo, e final baixo na maturação, quando se induz secagem de folhas/capas. O método dual ($K_{cb} + K_e$) é útil para separar transpiração e evaporação em canteiros irrigados por aspersão.

Nutrição e qualidade: enxofre e compostos bioativos

- S é determinante para alicina e tiossulfinais, interferindo também na produtividade; o balanço com N e a disponibilidade de micronutrientes (B, Zn) influencia vigor e sanidade.

- pH do solo: faixa ideal geral 5,5–6,5 (com preferência prática por

6,0–6,8 em muitos solos), com calagem recomendada em acidez elevada. Evitar salinização em fertirrigação.

- Qualidade pós-colheita: maturação fisiológica e cura adequadas reduzem perdas por patógenos e mantêm integridade de capas/bulbilhos

Manejo ecofisiológico

- Bulbilho-semente: utilizar material livre de vírus, calibre uniforme, ponto de maturação adequado e frigorificação conforme a cultivar e região.

- Irrigação: lâminas frequentes e moderadas em solos leves; reduzir e suspender próximas à colheita para facilitar cura e qualidade de armazenamento. Em fases quentes e secas, turnos curtos evitam estresse foliar e queda de área fotossintética.

- Solo: preparo fino, canteiros bem drenados e ausência de adensamento; alho é sensível a encharcamento.

Cenoura (*daucus carota* subsp. *Sativa*)

Temperatura, vernalização e pendoamento

A cenoura é espécie de clima ameno, com melhor qualidade de raiz quando o ciclo ocorre em temperaturas moderadas. Em cultivares adaptadas ao verão brasileiro (Grupo Brasília), há maior tolerância ao calor, mas temperaturas elevadas encurtam o ciclo e prejudicam coloração e formato. Exposição a baixas temperaturas seguidas de dias longos pode induzir pendoamento (indesejado para produção de raiz). Cultivares de inverno (grupo Nantes e afins) mantêm formato e coloração superiores em faixas mais frias, porém são mais suscetíveis ao pendoamento se semeadas fora de época.

Faixas térmicas de referência

- Germinação/emergência: 20–30 °C acelera e uniformiza; abaixo de 10–12 °C, a emergência se arrasta.

- Crescimento vegetativo: 15–22 °C favorecem área foliar e acúmulo de reservas.

- Engrossamento de raiz: 15–21 °C otimizam qualidade (cor/

carotenoides) e reduzem deformações; $> 30^{\circ}\text{C}$ encurtam o ciclo e pioram qualidade.

Relações hídricas, Kc e qualidade de raiz

irrigação: geralmente por aspersão (convencional ou pivô), mas o gotejo vem crescendo por permitir lâminas menores e reduzir doenças foliares. Turnos curtos em solos arenosos evitam estresse hídrico transitório que causa rachaduras e deformações.

Kc: em condições tropicais/subtropicais, valores de referência por fase indicam Kc inicial moderado ($\approx 0,45\text{--}0,50$), intermediário elevado ($\approx 1,3$) e final próximo de 1,0. Ajustes são necessários conforme densidade, cobertura do solo e frequência de irrigação.

Qualidade: manejo da lâmina no final do ciclo influencia sólidos solúveis; irrigação excessiva reduz açúcares e pode elevar descarte por defeitos (om ombro verde, rachaduras e desuniformidade)

Nutrição e distúrbios

boro e cálcio: carências favorecem rachaduras e desordens de parede celular. Evitar pH excessivamente alto por calagens exageradas; aplicar B em dose e momento recomendados, preferencialmente a lanço antes da semeadura ou via fertirrigação.

Micronutrientes: Zn e Mn sustentam metabolismo enzimático e coloração; carências leves reduzem vigor e uniformidade.

pH e solo: ideal 6,0–6,5; desuniformidade de estrutura (torrões, compactação) e camadas adensadas geram raízes bifurcadas e tortuosas. Texturas francas a leves, profundas e bem drenadas são preferíveis.

Manejo ecofisiológico

época: posicionar semeaduras para que a fase de engrossamento de raiz ocorra em temperaturas moderadas; em verões muito quentes, adotar cultivares de verão e sombreamento leve quando necessário.

Densidade: espaçamentos finos e desbaste precoce estabelecem

população uniforme, evitando competição e raízes finas.

Sanidade: aeração do dossel e turnos de irrigação que evitem molhamento foliar noturno reduzem queima-das-folhas.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Roma: FAO, 1998. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56).
- AMAYREH, J.; AL-ABED, N. Developing crop coefficients for field-grown tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) under drip irrigation with black plastic mulch. **Agricultural Water Management**, v. 73, n. 3, p. 247–254, 2005.
- ANAPALLI, S. S.; REDDY, K. N.; GOWDA, P. H.; *et al.* Quantifying evapotranspiration and crop coefficients for irrigated cotton using eddy covariance. **Agricultural Water Management**, v. 233, art. 106091, 2020.
- BANGE, M.; QUINN, M.; MILROY, S.; *et al.* Improving temperature-based predictions of the timing of flowering in cotton. **Agronomy Journal**, v. 114, n. 5, p. 2728-2742, 2022.
- BATTIE-LACLAU, P.; LACLAU, J.-P. Growth of the whole root system for a plant crop of sugarcane under rainfed and irrigated environments in Brazil. **Field Crops Research**, v. 114, n. 3, p. 351–360, 2009.
- CAIRES, E. F. Surface application of gypsum in low acidic Oxisol under no-till cropping system. **Scientia Agricola**, v. 68, n. 2, p. 209–216, 2011.
- CARR, M. K. V.; KNOX, J. W. The water relations and irrigation requirements of sugarcane (*Saccharum officinarum*): a review. **Experimental Agriculture**, v. 47, n. 1, p. 1–25, 2011.
- CARVALHO, D. F.; OLIVEIRA NETO, D. H.; FELIX, L. F.; GUERRA, J. G. M.; SALVADOR, C. A. Yield, water use efficiency, and yield response factor in carrot crop under different irrigation depths. **Ciência Rural**, v. 46, n. 7, p. 1145–1150, 2016.
- CIAMPITTI, I. A.; VYN, T. J (2012) **Physiological perspectives of changes over time in maize yield dependency on nitrogen uptake and associated nitrogen efficiencies: A review**, Field Crops Research, Volume 133, Pages 48-67.
- CRAPARO, A. C. W.; STEPPE, K.; VAN ASTEN, P. J. A.; *et al.* Application of thermography for monitoring stomatal conductance of *Coffea arabica* under different shading systems. **Science of the Total Environment**, v. 609, p. 755–763, 2017.

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, n. 1, p. 55–81, 2006.

DESTRO, D. *et al.* Photoperiodism and genetic control of the long juvenile period in soybean: a review. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 1, n. 1, p. 72–92, 2001.

DEVI, M. J.; SINGH, V.; BANGE, M. P.; *et al.* Transpiration response of cotton to vapor pressure deficit and its relationship with stomatal traits. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, art. 1571, 2018.

DONG, L. *et al.* Genetic basis and adaptation trajectory of soybean from its temperate origin to tropics. **Nature Communications**, v. 12, n. 1, p. 5445, 2021.

FERRIS, R.; ELLIS, R. H.; WHEELER, T. R.; HADLEY, P. Effect of high temperature stress at anthesis on grain yield and biomass of field-grown crops of wheat. **Annals of Botany**, v. 82, n. 5, p. 631–639, 1998.

FRANCK, N.; VAAST, P. Limitation of coffee leaf photosynthesis by stomatal conductance and light availability under different shade levels. **Trees**, v. 23, p. 761–769, 2009.

GIBSON, L. R.; PAULSEN, G. M. Yield components of wheat grown under high temperature stress during reproductive growth. **Crop Science**, v. 39, n. 6, p. 1841–1846, 1999.

GÓMEZ, L. F.; LÓPEZ, J. C.; RIAÑO, N. M.; *et al.* Diurnal changes in leaf gas exchange and validation of a mathematical model for coffee (*Coffea arabica* L.) canopy photosynthesis. **Photosynthetica**, v. 43, n. 4, p. 575–582, 2005.

GONÇALVES, I. Z. *et al.* Remote sensing-based evapotranspiration modeling using geeSEBAL for sugarcane irrigation management in Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 274, art. 107965, 2022.

GONZÁLEZ, F. G.; SLAFER, G. A.; MIRALLES, D. J. Vernalization and photoperiod responses in wheat pre-flowering reproductive phases. **Field Crops Research**, v. 74, n. 2–3, p. 183–195, 2002.

JACOTT, C. N.; BODEN, S. A. **Feeling the heat:** developmental and molecular responses of wheat and barley to high ambient temperatures. *Journal of Experimental Botany*, v. 71, n. 19, p. 5740–5751, 2020.

KAKANI, V. G.; REDDY, K. R.; ZHAO, D.; SAILAJA, K. Differences in in vitro pollen germination and pollen tube growth of cotton cultivars in response to high temperature. **Annals of Botany**, v. 96, 2005.

KAMENETSKY, R.; LONDON SHAFIR, I.; ZEMAH, H.; BARZILAY, A.; RABINOWITCH, H. D. Environmental control of garlic growth and florigenesis. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v. 129, n. 2, p. 144–151, 2004.

LANCASTER, J. E.; TRIGGS, C. M.; DE RUITER, J. M.; GANDAR, P. W. Bulbing in onions: photoperiod and temperature requirements and prediction of bulb size and maturity. **Annals of Botany**, v. 78, n. 4, p. 423–430, 1996.

LIZASO, J. I. *et al.* Impact of high temperatures in maize: phenology and yield components. **Field Crops Research**, v. 216, p. 129–140, 2018.

LÓPEZ-URREA, R.; MONTORO, A.; MAÑAS, F.; LÓPEZ-FUSTER, P.; FERERES, E. Evapotranspiration and crop coefficients from lysimeter measurements of onion. **Agricultural Water Management**, v. 96, n. 10, p. 1688–1694, 2009.

LÓPEZ-URREA, R.; SÁNCHEZ, J. M.; DE LA CRUZ, F.; GONZÁLEZ-PIQUERAS, J.; CHÁVEZ, J. L. Evapotranspiration and crop coefficients from lysimeter measurements for sprinkler-irrigated canola. **Agricultural Water Management**, v. 239, art. 106260, 2020.

MARTINS, M. Q.; RODRIGUES, W. P.; FORTUNATO, A. S.; *et al.* **Protective response mechanisms to heat stress in Coffea spp.:** physiological, biochemical and molecular approaches. *Frontiers in Plant Science*, v. 7, p. 947, 2016.

MEIER, U. *et al.* The BBCH system to coding the phenological growth stages of plants: history and publications. **Journal für Kulturpflanzen**, v. 61, n. 2, p. 41–52, 2009.

PETTIGREW, W. T. Potassium influences on yield and quality production for maize, wheat, soybean and cotton. **Physiologia Plantarum**, v. 133, n. 4, p. 670–681, 2008.

RADIN, J. W.; ACKERSON, R. C. Water relations of cotton plants under nitrogen deficiency. III. Stomatal conductance, photosynthesis, and abscisic acid accumulation during drought. **Plant Physiology**, v. 67, n. 1, p. 115–119, 1981.

RICHARDS, R. A. *et al.* Selection for erect canopy architecture can increase yield and biomass of spring wheat. **Field Crops Research**, v. 244, art. 107649, 2019.

ROBERTSON, M. J.; WOOD, A. W.; MUCHOW, R. C. Growth of sugarcane under high input conditions in tropical Australia. I. Radiation use, biomass accumulation and partitioning. **Field Crops Research**, v. 48, p. 11–25, 1996.

RODRIGUES, W. P.; MARTINS, M. Q.; FORTUNATO, A. S.; *et al.* Long-term elevated air [CO₂] strengthens photosynthetic functioning and mitigates the impact of supra-optimal temperatures in tropical *Coffea arabica* and *C. canephora* species. **Global Change Biology**, v. 22, p. 415–431, 2016.

SAGE, R. F. The evolution of C₄ photosynthesis. **New Phytologist**, v. 161, p. 341–370, 2004.

SAGE, R. F.; SAGE, T. L.; KOCACINAR, F. Photorespiration and the evolution of C₄ photosynthesis. **Annual Review of Plant Biology**, v. 63, p. 19–47, 2012.

SATO, S.; KAMIYAMA, M.; IWATA, T.; MAKITA, N.; FURUKAWA, H.; IKEDA, H. Moderate increase of mean daily temperature adversely affects fruit set of *Lycopersicon esculentum* by disrupting specific physiological processes in male reproductive development. **Annals of Botany**, v. 97, n. 5, p. 731–738, 2006.

SATO, S.; PEET, M. M.; THOMAS, J. F. Physiological factors limit fruit set of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) under chronic, mild heat stress. **Plant, Cell and Environment**, v. 23, n. 7, p. 719–726, 2000.

SAURE, M. C. Why calcium deficiency is not the cause of blossom-end rot in tomato and pepper fruit—A reappraisal. **Scientia Horticulturae**, v. 174, p. 151–154, 2014.

SIEBERT, J. D.; STEWART, A. M. Influence of plant density on cotton response to mepiquat chloride application. **Agronomy Journal**, v. 98, p. 1634–1639, 2006.

SILVA, T. J. A.; BONFIM-SILVA, E. M.; FENNER, W.; DUARTE, T.; JOSÉ, J. V.; CASTAÑON, T. H. F. M. Evapotranspiration and crop coefficients in two irrigated wheat cultivars. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, n. 4, p. 252–257, 2020.

SILVA, V. P. R. *et al.* Crop coefficient, water requirements, yield and water use efficiency of sugarcane growth in Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 128, p. 102–109, 2013.

SLAFER, G. A.; RAWSON, H. M. Photoperiod $\times$ temperature interactions in contrasting wheat genotypes: time to heading and final leaf number. **Field Crops Research**, v. 44, n. 2–3, p. 73–83, 1995.

SMITH, D. M.; INMAN-BAMBER, N. G.; THORBURN, P. J. Growth and function of the sugarcane root system. **Field Crops Research**, v. 92, n. 2–3, p. 169–183, 2005.

VAAST, P.; ANGRAND, J.; FRANCK, N.; DAUZAT, J.; GÉNARD, M. Fruit load and branch ring-barking affect carbon allocation and photosynthesis of leaves and fruits of *Coffea arabica* in the field. **Tree Physiology**, v. 25, n. 6, p. 753–760, 2005.

VAN HEERDEN, P. D. R.; DONALDSON, R. A.; WATT, D. A.; SINGELS, A. Biomass accumulation in sugarcane: unravelling the factors underpinning reduced growth phenomena. **Journal of Experimental Botany**, v. 61, n. 11, p. 2877–2887, 2010.

VIANNA, M. D. S.; NASSIF, D. S. P.; CARVALHO, K. S.; MARIN, F. R. Modelling the trash blanket effect on sugarcane growth and water use. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 172, art. 105361, 2020.

WANG, D. R.; VENTURAS, M. D.; MACKAY, D. S.; *et al.* Use of hydraulic traits for modeling genotype-specific acclimation in cotton under drought. **New Phytologist**, v. 228, p. 898–909, 2020.

