



ECOFISIOLOGÍA DE PLANTAS CULTIVADAS

CASSIO PEREIRA HONDA FILHO




EDITORA
SCHREIBEN

CASSIO PEREIRA HONDA FILHO



ECOFISIOLOGÍA DE PLANTAS CULTIVADAS




EDITORA
SCHREIBEN

2025

© Cassio Pereira Honda Filho - 2025
Diagramación y portada: Schreiben
Imagen de la portada: Freepik.com
Revisión y traducción: el autor
Libro publicado en: 25/11/2025
Acta de publicación: TP1242025

Consejo Editorial (Editorial Schreiben):

Dr. Adelar Heinsfeld (UPF)
Dr. Airtón 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 - Uruguay)
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. Waniilton Dudek (UNESPAR)

Esta obra es una producción independiente. La exactitud de las informaciones, opiniones y conceptos emitidos, así como el origen y la presentación de las tablas, cuadros, mapas, fotografías y referencias, es de exclusiva responsabilidad del/los autor(es).

Editora Schreiben
Linha Cordilheira - SC-163
89896-000 Itapiranga/SC
Tel: (49) 3678 7254
editoraschreiben@gmail.com
www.editoraschreiben.com

Datos Internacionales de Catalogación en la Publicación (CIP)

H771 Honda Filho, Cassio Pereira.
Ecofisiología de plantas cultivadas / Cassio Pereira Honda Filho. –
Itapiranga, SC : Schreiben, 2025.
64 p. ; e-book.
Inclui bibliografía
E-book no formato PDF.
ISBN: 978-65-5440-579-9
DOI: 10.29327/5728395
1. Ecofisiología vegetal. 2. Plantas cultivadas – Fisiología. I. Título.
CDD 581.1

Bibliotecaria responsable: Juliane Steffen CRB14/1736

RESUMEN

CAPÍTULO 1	
Ecofisiología de la soja (<i>Glycine max</i>) en Brasil.....	4
CAPÍTULO 2	
Ecología fisiológica del maíz (<i>Zea mays</i>) en Brasil.....	11
CAPÍTULO 3	
Ecofisiología del cafeto (<i>Coffea arabica</i> y <i>C. canephora</i>).....	18
CAPÍTULO 4	
Ecología y fisiología de la caña de azúcar (<i>Saccharum</i> spp.) en Brasil.....	27
CAPÍTULO 5	
Ecofisiología del algodón (<i>Gossypium hirsutum</i>) en Brasil.....	36
CAPÍTULO 6	
Ecofisiología de los cultivos de invierno en Brasil (trigo, cebada, avena y canola).....	42
CAPÍTULO 7	
Ecología de los cultivos de tomate, cebolla, ajo y zanahoria.....	49
Referencias.....	59

– CAPÍTULO 1 –

Ecofisiología de la soja (*Glycine max*) en Brasil

La ecofisiología de la soja busca comprender cómo el metabolismo (fotosíntesis, respiración, fijación biológica de N₂, crecimiento y reproducción) responde al medio ambiente (radiación, temperatura, agua, CO₂) y al manejo (época de siembra, grupo de madurez, disposición de las plantas, fertilidad, biología del suelo). En Brasil, que abarca latitudes subtropicales (sur/sureste) hasta tropical (Cerrado y MATOPIBA), la clave es situar las etapas reproductivas críticas (R3-R6) en ventanas de menor riesgo térmico/hídrico, manteniendo plantas eficientes en cuanto a luz y agua, y un sistema suelo-raíz con buena calidad física y química. La Zonificación Agrícola de Riesgo Climático (ZARC), actualizada anualmente por el MAPA, es la guía para las fechas de siembra de menor riesgo por municipio/tipo de suelo/ciclo, y hoy en día forma parte de decretos específicos por estado para cada cosecha.

La adaptación de la soja al Brasil tropical fue catalizada por el uso del período juvenil largo, que retrasa la inducción floral en días cortos y permite un mayor crecimiento vegetativo antes de la floración, abriendo fronteras de cultivo en latitudes bajas y flexibilizando las ventanas de siembra.

Fenología, arquitectura y fotoperíodo: fundamentos del manejo temporal

El desarrollo sigue la escala de Fehr & Caviness: estadios vegetativos (V1...Vn) y reproductivos R1 (inicio de la floración) a R8 (maduración). Para la gestión del riesgo y el rendimiento, la ventana R3-R6 (desde el inicio de las vainas hasta el llenado de los granos) es la más sensible, ya que define el número y la masa de los granos.

La soja combina hojas trifoliadas, ramificación variable y hábito

de crecimiento determinado o indeterminado según el grupo de madurez (GM). Esta plasticidad permite compensar fallos moderados en el estado mediante la ramificación y el ajuste en la retención/aborto de flores y vainas, siempre que haya suficiente luz, agua y nutrientes en la ventana R3-R6.

Especie de días cortos, la soja florece cuando el día cae por debajo de un umbral crítico (dependiente del genotipo). El largo período juvenil reduce la sensibilidad inicial al fotoperíodo, lo que permite siembras más tempranas en latitudes bajas sin floración «demasiado temprana». La tasa de desarrollo es termofotoperiódica: la temperatura media modula la velocidad con la que la planta transita entre etapas, condicionando la adecuación del GM a la latitud y la fecha de siembra.

Implicación práctica: ajustar el GM $\times$ fecha para que R3-R6 ocurra cuando la probabilidad de calor seco y/o déficit hídrico sea menor, utilizando el ZARC local (y el calendario sanitario estatal).

Procesos ecofisiológicos que «fabrican» el rendimiento

La fotosíntesis (A) en C_3 responde a la PAR (radiación fotosintéticamente activa), la concentración de CO_2 , la temperatura foliar y la conductancia estomática (g_s). En condiciones de déficit hídrico y/o alto DPV (déficit de presión de vapor), los estomas se cierran para contener la transpiración (E), cayendo g_s y, en menor grado inicial, A; con ello crece la eficiencia intrínseca del uso del agua, $iWUE = A/g_s$. Sin embargo, bajo estrés severo, A entra en caída pronunciada y el equilibrio colapsa.

La eficiencia del uso de la radiación (RUE) cuantifica la conversión de la radiación absorbida en biomasa ($g\ MJ^{-1}$). En la soja, los valores de campo varían típicamente de $\sim 0,6$ a $1,6\ g\ MJ^{-1}$, con estudios que reportan rangos por genotipo/ambiente de $\sim 0,84$ – $1,15\ g\ MJ^{-1}$ y hasta $\sim 0,62$ – $1,59\ g\ MJ^{-1}$ en evaluaciones en R6. Este rango refleja el clima, la arquitectura del dosel (LAI, ángulo foliar), la salud y la nutrición.

Métricas rápidas y no destructivas

La fluorescencia de la clorofila (Fv/Fm) indica fotoinhibición/estrés del PSII. En hojas bien adaptadas y sin estrés, $Fv/Fm \approx 0,83$ es la referencia; las caídas persistentes sugieren estrés (lumínico, térmico, hídrico, nutricional).

El SPAD (índice de clorofila) se correlaciona con el contenido de clorofila y, con salvedades, con el N foliar. La relación varía según la especie/tejido/condición de luz; conviene calibrar por cultivar/ambiente e integrar con diagnóstico visual y análisis foliar.

Formación del rendimiento: número $\times$ tamaño de los granos

Rendimiento = plantas $\times$ vainas/planta $\times$ granos/vaina $\times$ masa de 100 granos. El dosel debe interceptar y utilizar la radiación con follaje funcional en R3-R6. El calor y la sequía en esta ventana reducen la adhesión floral/vainas, el número de granos y el tamaño de los granos; análisis recientes confirman que los eventos cálidos y secos combinados son los más dañinos en la reproducción.

Fijación biológica de nitrógeno (FBN), inoculación y coinoculación

La soja suministra la mayor parte del N a través de la simbiosis con *Bradyrhizobium*; la inoculación anual aumenta la posibilidad de una nodulación eficaz, especialmente en áreas nuevas, suelos cálidos y con bajo contenido de materia orgánica. La coinoculación con *Azospirillum* ha ganado terreno: publicaciones brasileñas e internacionales informan de ganancias medias y, en años de sequía, aumentos de productividad superiores al 10 %. Las directrices recientes de Embrapa estandarizan las dosis y las vías para la coinoculación (vía semilla/surco), advirtiendo que no se deben «sobredosificar» los bioinsumos. En cosechas con estrés hídrico, trabajos de 2024 observaron respuestas positivas consistentes a la coinoculación.

Factores edafoclimáticos determinantes

Clima: temperatura, agua y época

Temperatura. El cultivo rinde mejor entre 20 y 30 °C a lo largo del ciclo; los picos ≥ 35 °C durante la floración/llenado aumentan el riesgo de aborto y reducen la masa de los granos (con una sensibilidad adicional a las altas temperaturas nocturnas).

Agua (ETc) y distribución. La demanda hídrica se concentra en las etapas R1-R6, lo que representa más del 60 % del uso estacional. Los picos diarios de uso de agua pueden alcanzar $\sim 5\text{--}7,5$ mm día⁻¹ ($\approx 0,2\text{--}0,3$ pulgadas día⁻¹) en condiciones cálidas, secas y ventosas. Por lo tanto, los déficits moderados en la fase vegetativa son más tolerables que los déficits en la fase reproductiva.

Planificación por Kc (FAO-56). Para el riego suplementario (cuando proceda), utilice $ET_c = ET_o \times K_c$ (o $K_{cb} + K_e$ en el método dual). K_c varía según la fase y la gestión del agua; el método dual permite tratar por separado la transpiración del dosel (K_{cb}) y la evaporación del suelo (K_e), lo que resulta útil en hileras anchas y/o con mantillo expuesto.

Época de siembra y riesgo climático. En Brasil Central, priorice el inicio efectivo de las lluvias; en el sur, evite el frío en la emergencia y el calor/sequías en el llenado. Utilice el ZARC de la cosecha actual para elegir ventanas $\leq 20\text{--}30$ % de riesgo municipal/suelo/ciclo.

Suelo — química (pH, V%, K, P, S)

Acidez y saturación por bases. Trabajar con un pH (CaCl_2) $\approx 5,4\text{--}5,9$ y un V% compatible (frecuentemente $\sim 50\text{--}60\%$ en latosoles) reduce el Al^{3+} tóxico y optimiza la disponibilidad; un encalado bien hecho profundiza las raíces y mejora la eficiencia del agua y los nutrientes.

Potasio (K). La soja absorbe ~ 38 kg K_2O t⁻¹ de granos producidos y exporta ~ 20 kg K_2O t⁻¹ a través de la cosecha, lo que justifica el mantenimiento de alrededor de ~ 20 kg K_2O por tonelada de granos esperada (ajustar según el análisis del suelo, la textura, el historial y el balance del sistema).

Fósforo (P) y azufre (S). Seguir los manuales regionales (SBCS, Embrapa) y los balances; los suelos arenosos/oxisoles suelen requerir mantenimiento de S.

Yeso agrícola. Indicado cuando hay acidez subsuperficial/ Al^{3+} en el subsuelo y bajo Ca^{2+} en profundidad; mejora el perfil radicular y la resiliencia hídrica.

Suelo: física y agua en el perfil

La calidad física determina cuánta agua del suelo es realmente accesible para las raíces. El intervalo hídrico óptimo (IHO/LLWR) integra el agua disponible, la porosidad de aireación y la resistencia a la penetración en un rango de humedad en el que el crecimiento radicular no está limitado. Bajo compactación y/o humedad inadecuada, el LLWR se estrecha (hasta cero en casos graves), aumentando la frecuencia de estrés incluso con lluvia «normal». En latosoles sometidos a tráfico, los estudios con soja muestran una caída de la productividad incluso antes de que el LLWR llegue a cero, lo que refuerza las prácticas de SPD con paja, control del tráfico, enyesado (cuando esté indicado) y rotación con raíces exploradoras.

Ecología aplicada al manejo

Época de siembra (ZARC) y posicionamiento de R3-R6

Utilice las normas ZARC de la cosecha vigente en su estado y elija ventanas con una clase de riesgo $\leq 20\text{-}30\%$ (según la normativa local).

Objetivo: encajar R3-R6 fuera de las probables sequías y picos de calor, manteniendo un LAI y una arquitectura favorables a la interceptación/uso de la luz durante el llenado.

En el Cerrado/MATOPIBA, utilice el inicio de las lluvias efectivas; en el sur/sureste, evite el frío en la emergencia y el calor seco en R5-R6.

Población de plantas y espaciamiento

La soja es plástica; sin embargo, los ciclos cortos (menor área foliar por planta) responden mejor a densidades mayores y líneas más estrechas (cierre precoz del dosel, mayor fracción difusa interna, menor evaporación del suelo). Los ciclos largos valorizan la uniformidad de emergencia y el control de plantas dominadas/tardías. Evite densificaciones que aumenten el acame o la sombra excesiva en los estratos inferiores.

Nutrición y FBN — integrando SPAD y análisis

K de mantenimiento: planifique según el balance (exportación × reposición) y el análisis del suelo.

FBN: inocular anualmente; coinocular cuando se recomiende, respetando la dosis/compatibilidad de los productos (semillas/surco). En áreas con antecedentes, refuerce la calidad de la operación (adherencia del inoculante, evite la mezcla con productos químicos incompatibles, logística para evitar el calor/UV).

Agua/riego suplementario (cuando corresponda)

Adopte $ET_c = ETo \times K_c$ (o $K_{cb} + K_e$ en el método dual); realice un seguimiento del ETo local y las lluvias efectivas.

En suelos con baja CAD, es preferible anticipar las láminas en la transición V→R y mantener un déficit mínimo en R1–R5 que intentar «recuperar» tardíamente.

Estrés abiótico: mecanismos, señales y manejo

Déficit hídrico (sequía)

Señales rápidas: caída de g_s , A y temperatura foliar más alta; SPAD y F_v/F_m pueden caer si el estrés persiste. En la fase reproductiva, la sequía reduce considerablemente las vainas/granos y el peso de los granos, sobre todo cuando coincide con el calor; la literatura muestra que los eventos compuestos (calor + sequía) generan las mayores pérdidas. Estrategias: ZARC, perfil radicular profundo (yeso cuando esté indicado; evitar capas densas), mantillo para reducir la evaporación y la amplitud térmica del suelo, y genotipos con mayor $iWUE$.

Calor y calor nocturno

Las temperaturas superiores a ~30-35 °C en R2-R5 reducen la adherencia, alteran el metabolismo de los carbohidratos y aceleran la senescencia foliar. Las temperaturas nocturnas elevadas perjudican el uso de asimilados y reducen el rendimiento. Ajuste $GM \times$ fecha, utilice

densidades/arquitecturas que favorezcan una ventilación moderada y la mitigación del calor en el dosel.

Encharcamiento/inundación

Provoca hipoxia, epinastia y senescencia; la planta reacciona con raíces adventicias y formación de aerénquima, mecanismos que aumentan la aireación interna y reducen la pérdida radial de O₂, procesos mediados por etileno/ABA/ROS. Evite sembrar en tierras bajas mal drenadas, corrija el drenaje y utilice cubiertas/rotación para mejorar la estructura.

Salinidad (escenarios localizados)

Reduce la eficiencia en el uso del agua, la conductancia y el crecimiento radicular. En suelos de textura fina y drenaje limitado, los efectos son más notables; priorice la lixiviación controlada, el yeso agrícola cuando sea indicado y los cultivos más tolerantes.

– CAPÍTULO 2 –

Ecología fisiológica del maíz (*Zea mays*) en Brasil

El maíz (*Zea mays* L.) es una especie C4, con un mecanismo de concentración de CO₂ que minimiza la fotorrespiración y mantiene altas tasas fotosintéticas en un amplio rango de radiación y temperatura. Esta disposición anatómica-bioquímica crea un «techo fisiológico» elevado para la conversión de luz en biomasa, sobre todo cuando el agua y el nitrógeno no son limitantes.

En Brasil, el maíz se cultiva en la cosecha de verano (principalmente de septiembre a diciembre, con variaciones regionales) y en la segunda cosecha («safrinha»), que suele sembrarse de enero a abril después de la soja temprana en las regiones Centro-Oeste, Sudeste, Sur y MATOPIBA. La definición precisa de la ventana de siembra se basa en la Zonificación Agrícola de Riesgo Climático (ZARC), establecida por las Ordenanzas del MAPA específicas para el maíz de primera y segunda cosecha por municipio y tipo de suelo.

Fenología térmica, morfología y definición del rendimiento

La fenología del maíz está fuertemente modulada por la suma térmica (grados-día, GDD), con una temperatura base operativa que suele tomarse como 10 °C ($\beta=10$ °C) a efectos de planificación (ajustable a híbridos y entornos). El período VT (espigado) – R1 (salida de espiga) inaugura la fase crítica de definición del número de granos; de R1 a R3 se consolida la «fijación» (seed set) y comienza el llenado. Este intervalo es, al mismo tiempo, el más sensible al estrés hídrico y térmico.

Los híbridos actuales presentan un porte más contenido, hojas más erguidas y una mejor tolerancia a las altas densidades, lo que favorece un índice de área foliar (LAI) eficaz y una mayor fracción de PAR absorbida

(fPAR). En materiales de arquitectura erecta, los valores de LAI eficaces para un alto rendimiento tienden a oscilar entre $\sim 3,5$ y $5,5$, aunque los entornos y los híbridos pueden desplazar el óptimo; los estudios reportan un LAI máximo cercano a $5-5,5$ y óptimos operativos entre $\sim 4,5$ y ~ 6 , dependiendo de la densidad y el N.

Al ser C4, el maíz tiene menor fotosaturación y menor fotorrespiración, lo que aumenta la eficiencia en el uso de la radiación (RUE) en condiciones favorables. En el campo, metaanálisis y series de ensayos reportan una RUE de $\sim 3,5-4,0$ g MS MJ⁻¹ de APAR (variando según el N, la densidad, el microclima y la sanidad).

LAI: objetivo frecuente entre $3,5$ y $5,5$ para un alto rendimiento; la optimización depende de la arquitectura (hoja erecta) y la uniformidad del stand.

NDVI/NDRE y SPAD: índices ópticos útiles para rastrear el vigor, el estado del N y la senescencia, lo que respalda las decisiones sobre la cobertura de nitrógeno y los diagnósticos de limitación del dosel. Los ensayos brasileños validan el SPAD para el N en el maíz y las aplicaciones tácticas con NDRE en la fase reproductiva para inferir el rendimiento.

El número de granos se define predominantemente entre VT-R2/R3 y responde al crecimiento del dosel en el período crítico; la masa de granos depende de la tasa y la duración del llenado, condicionadas al suministro de asimilados y nitrógeno. (Integración de estudios de rendimiento en maíz).

La demanda estacional de agua del maíz se sitúa típicamente en $\sim 500-800$ mm por ciclo, con un pico de ETc de VT a R3. La estimación operativa más difundida utiliza ETo (Penman-Monteith parametrizado FAO-56) y coeficientes de cultivo (Kc) en curva simple, con valores de referencia ampliamente utilizados: Kc_ini $\approx 0,40$; Kc_mid $\approx 1,15-1,20$; Kc_end $\approx 0,35-0,60$ (ajustables al clima, al cultivar y a la senescencia).

El «rango hídrico menos limitante» (LLWR) integra el agua, la aireación y la resistencia a la penetración (PR) en un único indicador. Los valores de PR $> \sim 2,0$ MPa se asocian clásicamente a la limitación del alargamiento radicular; el LLWR define el rango de humedad en el que el crecimiento radicular se ve mínimamente restringido por la falta de aire (en condiciones húmedas) y por la resistencia mecánica (en condiciones secas). En SPD, el acolchado y el tráfico controlado amplían

el LLWR; el enyesado y las raíces más profundas ayudan a explotar el agua subsuperficial.

Cuanto mayor es la fracción de transpiración (T) en la evapotranspiración (ET), mayor tiende a ser la eficiencia productiva del uso del agua (WUEg). En los cultivos de maíz, los estudios de partición reportan T/ET en torno a 0,60-0,65 en la estación de crecimiento, con correlación positiva con LAI y cierre del dosel, objetivos que también orientan la densificación y el manejo del rastrojo.

El crecimiento vegetativo y la fisiología del maíz se ven favorecidos en amplitudes de ~20-32/35 °C, con mayor riesgo de trastornos reproductivos por encima de esa temperatura. El calor en VT-R2 reduce la viabilidad/germinación del polen, la sincronización floral y el crecimiento de los tubos polínicos, lo que afecta directamente al número de granos; una humedad relativa más alta (VPD menor) puede atenuar las pérdidas de «seed set».

Las siembras en suelo frío (baja suma térmica) retrasan la emergencia y pueden reducir el rastrojo efectivo y el área foliar inicial, comprometiendo la interceptación de la luz en la fase crítica. En SPD, la cobertura del suelo y la elección de la fecha mitigan parte del problema (principios consolidados).

En Latossoles, se recomienda un objetivo de V% ~50-60 y un pH(CaCl₂) ~5,2–5,8 como rangos operativos para el maíz; el yesado no sustituye al encalado, pero es complementario para la acidez subsuperficial, el incremento de Ca²⁺ en el subsuelo y la reducción de Al³⁺, lo que favorece la profundización radicular cuando lo indica el diagnóstico (textura/CTC/ contenidos).

La demanda de N se acelera desde V6 hasta VT, período en el que la cobertura (o fertirrigación) contribuye más a la productividad, siempre que el dosel esté sano y el agua en el punto crítico sea adecuada. Las curvas de absorción y los estudios fisiológicos refuerzan este pico y las ventajas de sincronizar la oferta (fraccionamiento/fertirrigación) con esta ventana.

El fósforo suele ser limitante en los suelos del Cerrado; se recomienda aumentar su disponibilidad en el perfil (corrección y manejo de bandas/parcelas) y colocar estratégicamente el fertilizante en función de la textura y el historial (síntesis de Embrapa y literatura sobre manejo del Cerrado).

El grano exporta una pequeña fracción del K absorbido; una parte

significativa permanece en los tallos/paja. En los sistemas de ensilaje o de eliminación de residuos, la exportación de K aumenta considerablemente y el plan de fertilización debe tener en cuenta esta salida adicional. (Los ensayos de Embrapa detallan la baja exportación a través de los granos y la retención de K en la paja).

Los suelos arenosos y los entornos de alta eliminación/bajo MO requieren atención al S; el Zn y el Mn pueden convertirse en limitantes en pH elevado y el B en entornos secos (diagnóstico foliar/suelo y correcciones dirigidas).

Los estreses combinados (hídrico + térmico; hídrico + deficiencia de N) no son aditivos: el daño puede ser menor, igual o mayor que la suma de los estreses aislados, porque comparten vías de señalización y objetivos fisiológicos (por ejemplo, el cierre estomático reduce el C interno y aumenta la temperatura foliar, amplificando el daño térmico). Revisiones recientes enfatizan esta naturaleza interactiva y la importancia de los enfoques integrados de manejo y genética.

En el densificado, las ganancias en la captación de luz y el aumento de T/ET se acumulan hasta los límites impuestos por el agua/N y la arquitectura del híbrido. En condiciones de agua limitada, las densidades excesivas penalizan el crecimiento en el período crítico y reducen la WUE a nivel de grano; en entornos de alto potencial, las densidades elevadas con hojas erectas mantienen el LAI funcional y prolongan la duración del dosel verde después de la espigadura.

ZARC (MAPA): Las ordenanzas actualizadas publican las ventanas de siembra por municipio, tipo de suelo y ciclo (1.^a y 2.^a cosechas). Para el maíz de segunda cosecha, Embrapa define el cultivo como de secano, extemporáneo, de enero a abril, normalmente después de la soja temprana; cumplir con el ZARC reduce la exposición del VT-R3 a los veranillos y los picos de calor.

Calendario práctico: en el Centro-Oeste y el Sudeste, la 1.^a cosecha tiende a producirse de septiembre a diciembre; la 2.^a, de enero a marzo, inmediatamente después de la soja. En el Sur, las ventanas se desplazan un poco más tarde. Las fuentes sectoriales y de extensión indican ventanas similares, pero siempre subordinadas a la Orden vigente y a la previsión local.

El intervalo operativo es amplio (~45-90 mil plantas ha⁻¹). En secano

limitado (agua/N), son frecuentes los óptimos en ~50-65 mil; en alto potencial/regadío, son comunes 70-85 mil con líneas estrechas (0,45-0,50 m) e híbridos de arquitectura erecta, respetando siempre la recomendación del híbrido y la capacidad hídrica del sistema. Los documentos de Embrapa indican 55-65 mil plantas ha⁻¹ como densidad operativa típica y señalan un incremento con tecnologías modernas y materiales tolerantes al densificado.

Evitar el déficit entre VT-R3 es una prioridad. En el riego suplementario, anticipe las láminas basándose en ETo×Kc (FAO-56) y la capacidad de aplicación del sistema, teniendo en cuenta que Kc_mid alcanza ~1,15-1,20.

En el Cerrado, construir un perfil (encalado profundo cuando sea posible, yesado por diagnóstico), reducir el tráfico en suelo húmedo y mantener un acolchado abundante son pilares para ampliar el LLWR y estabilizar el suministro de agua durante VT-R3.

Intercambios gaseosos/porometría: medir A, gs, E en V8-V12 y R1-R3 ayuda a interpretar el microclima y las limitaciones (agua/compactación/calor).

Fluorescencia (Fv/Fm) y SPAD: Fv/Fm indica la integridad fotoquímica; SPAD informa sobre el estado del N y la senescencia; las caídas persistentes indican que hay que reevaluar el N/agua.

Las temperaturas cercanas o superiores a ~35 °C cerca de la antesis perjudican la viabilidad del polen y el crecimiento de los tubos polínicos. Las pérdidas agronómicas tienden a ser mayores cuando se dan conjuntamente un DPV alto y un déficit hídrico.

La compactación estrecha el LLWR: en condiciones húmedas, falta aire; en condiciones secas, PR > 2 MPa limita el alargamiento de las raíces. En SPD, el acolchado reduce la E del suelo y eleva la fracción T/ET; el tráfico controlado y las ventanas de operación evitan la generación de PR crítico en capas activas. (Síntesis de LLWR y PR en suelos agrícolas).

Nutrición: N, P, K y S desde la perspectiva ecofisiológica

N: sincronizar la cobertura V6-VT con agua adecuada eleva la RUE y evita la senescencia anticipada del dosel (stay-green funcional).

P: restricción muy común en latosoles; trabajar la construcción en el perfil y el posicionamiento.

K: los granos exportan poco K; retirar la paja (ensilado) cambia el equilibrio de K y requiere una reposición compatible.

S: imprescindible en arenas y entornos de alta eliminación.

Integración en sistemas y prácticas contemporáneas

La segunda cosecha como sistema

La segunda cosecha se ha consolidado como la principal temporada del maíz en muchas regiones; su éxito depende de la rapidez de la transición soja → maíz (rendimiento de la soja temprana y cosecha), respetando las ventanas ZARC para escapar de las sequías otoñales y los picos térmicos en la floración. Tecnologías como la siembra anticipada (sistema Antecipe) permiten adelantar hasta ~20 días la implantación del maíz de segunda cosecha antes de la cosecha completa de la soja, siempre que se cumplan los criterios agronómicos y legales, mitigando el riesgo climático del VT-R3.

Disposición de las plantas, arquitectura

En seco, cerrar el dosel temprano (densificación hasta el punto óptimo del ambiente y del híbrido) eleva la fracción de transpiración, reduce las pérdidas por evaporación (E) y mantiene el LAI productivo en la fase crítica; en alto potencial, las líneas estrechas y los híbridos erectos aumentan la eficiencia de la radiación en el perfil del dosel.

Sensores y manejo adaptativo

UAV/índices espectrales: priorizar VT, R1, R2-R3 para la previsión del rendimiento y la detección del estrés; NDRE/GNDVI después de la floración son fuertes predictores; integrar con SPAD en puntos clave.

Termometría infrarroja: aplicar CWSI para definir el riego en pivotes y ajustar las láminas en tiempo casi real.

Directrices prácticas por macroambiente

Cerrado/MATOPIBA

Siembra: inmediatamente después de la soja temprana, dentro del ZARC municipal; evitar retrasos que empujen VT-R3 a abril-mayo más secos/calientes.

Suelo: V% 50-60, pH(CaCl₂) 5,2-5,8; enyesado por diagnóstico para subsuelo ácido (Ca²⁺/reducción de Al³⁺); el acolchado robusto y el tráfico controlado amplían el LLWR y la resiliencia hídrica.

Densidad: 60-80 mil plantas ha⁻¹ para híbridos tolerantes y buen suministro; reducir a 50-65 mil con riesgo hídrico y Kc_mid alto sin riego.

N y PGPB: alinear N V6-VT;

Sur/Sudeste

1.^a cosecha: plantar de sept. a dic. (según la región), evitando el frío en el establecimiento y el calor/sequías en la fase reproductiva mediante ZARC.

2.^a cosecha: alinear la cosecha de soja y la siembra hasta feb.-mar. para proteger VT-R3; densidad definida por el potencial hídrico del año.

Suelo: corregir la acidez (encalado) y utilizar yeso cuando haya acidez subsuperficial/Al³⁺; mantener SPD y mantillo para la estabilidad hídrica y térmica.

– CAPÍTULO 3 –

Ecofisiología del cafeto **(*Coffea arabica* y *C. canephora*)**

El cafeto es una planta perenne C3 notoriamente sensible al medio ambiente: la disponibilidad de agua en el suelo y en el aire (a través del déficit de presión de vapor, DPV), la temperatura y la radiación gobiernan el acoplamiento entre las fuentes (hojas y, en menor medida, frutos verdes) y los drenajes (flores, frutos en expansión, crecimiento vegetativo), determinando la productividad, la estabilidad interanual y la calidad. En los sistemas brasileños, desde el sur/sureste hasta el Cerrado y el norte de Espírito Santo/Rondônia, el éxito a largo plazo proviene de la alineación de los procesos ecofisiológicos con las decisiones de manejo: disposición espacial/LAI, nutrición, sombreado cuando es necesario, riego y sincronización de la floración, además de la poda para modular la carga. Las revisiones de las referencias muestran que, aunque el cafeto es vulnerable a la sequía/alto DPV y al calor, presenta una gran capacidad de aclimatación cuando está bien nutrido y manejado, y puede beneficiarse del elevado CO₂ manteniendo el aparato fotoquímico funcional incluso bajo calor moderado.

La coyuntura climática reciente refuerza la necesidad de una lectura dinámica del riesgo: las olas de calor, los veranos secos y las heladas han ganado relevancia operativa, y la Zonificación Agrícola de Riesgo Climático (ZARC) ha sido actualizada para el café canephora en 2024, con decretos nacionales para el cultivo de regadío y de secano; para el arábica, las resoluciones de 2021 delimitaron períodos/áreas por estado y son la base normativa hasta nuevas revisiones.

Los cafetos tienen un eje ortotrópico (tronco) y ramas plagiotrópicas productivas, con un sistema radicular concentrado en los primeros 30-40 cm, aunque con plasticidad según la textura, la estructura y el manejo. Los estudios de campo y de sistemas sombreados muestran un predominio de

raíces finas en la parte superior del perfil (0-30 cm), con una distribución más uniforme hasta ~40 cm, y sensibilidad a la compactación, lo que afecta a la conductancia hidráulica y, en consecuencia, al control estomático.

En condiciones tropicales/estacionales, los pulsos vegetativos se alternan con los reproductivos. Un período seco corto ($\approx$ 2-4 meses) induce la diferenciación floral; el regreso de las lluvias (o el riego estratégico) «desbloquea» la antesis, y las floraciones múltiples bajo lluvias escasas generan una maduración desigual. La bienalidad surge cuando las cargas elevadas deprimen la renovación vegetativa y elevan la respiración de mantenimiento; el manejo mediante poda (esqueletización, cosecha cero en conilon) y el equilibrio nutricional modulan este ciclo. Las revisiones clásicas y los estudios fisiológicos relacionan la competencia fuente-drenaje con la muerte regresiva y la alternancia de cosechas.

Fisiología del proceso

Intercambios gaseosos, DPV, fotosíntesis (A), conductancia estomática (gs)

En el campo, A suele ser mayor por la mañana, cuando la conductancia estomática es alta y el DPV es moderado; con el calentamiento del aire, el aumento del DPV induce el cierre estomático y la depresión vespertina de A. En las hojas expuestas, este patrón es casi siempre estomático, con poca evidencia de fotoinhibición cuando la nutrición es adecuada. El acoplamiento A-gs tiende a ser más fuerte en *C. arabica* que en *C. canephora*; en condiciones cálidas y secas, el sombreado moderado reduce el DPV foliar y suaviza la limitación estomática. Los indicadores operativos como $iWUE$ (A/gs) y WUE (A/E) son útiles para comparar genotipos y entornos y para tomar decisiones hídricas durante la temporada.

Fotoprotección, radiación y temperatura foliar

Bajo luz intensa, el café activa rutas disipativas (ciclo de xantofilas, transporte alternativo de electrones y fotorrespiración) y antioxidantes (SOD, APX, catalasa, carotenoides, tocoferoles), protegiendo el PSII. Esto explica por qué Fv/Fm rara vez cae de manera persistente en plantas adecuadas, incluso a pleno sol, siempre que el agua y la nutrición no sean limitantes; ya que un DPV elevado + gs bajo elevan la temperatura foliar

y pueden precipitar quemaduras, caída de hojas y daños a los frutos. En lugares cálidos y secos, el sombreado moderado (20-40 %) es una herramienta fisiológica para mantener el equilibrio energético del dosel y reducir el estrés térmico. En análisis micrometeorológicos, las hojas del cafeto pueden calentarse varios grados por encima del aire en tardes secas y radiantes; el efecto se mitiga con un gs más alto y con sombreado.

Fuente-drenaje, carga y papel de los frutos

El rendimiento es el resultado de (i) las ramas productivas por planta, (ii) los frutos por nudo/rama y (iii) la masa de los granos. Las manipulaciones de la carga (aclareo, poda) alteran el estado hídrico y la gs por vías estomáticas (a través de la demanda de asimilados), lo que ayuda a contener la muerte regresiva y la bienalidad. En cuanto a los frutos, hay fotosíntesis en el pericarpio; las estimaciones sugieren una contribución relevante a la respiración diaria de los frutos y, en cargas elevadas, los frutos pueden representar hasta el 20-30 % del área fotosintética del conjunto planta + frutos. Sin embargo, la contribución neta al crecimiento del grano depende del contexto (luz, posición en el dosel, carga). El consenso actual es que esta fotosíntesis recicla el CO₂ respiratorio y contribuye puntualmente al equilibrio local, sin sustituir la necesidad de una fuente foliar robusta.

Requisitos edafoclimáticos y aptitud en Brasil

Temperatura y precipitación

Para el arábica, el rango óptimo medio anual se sitúa entre $\approx 18-23^{\circ}\text{C}$; por encima de esta temperatura se acelera la maduración (lo que puede afectar a la calidad), y por debajo de $17-18^{\circ}\text{C}$ el crecimiento se ve reducido. Para el canephora, el óptimo es $\approx 22-26^{\circ}\text{C}$, con una ventaja relativa en condiciones de calentamiento. Las proyecciones recientes para Brasil apuntan a un desplazamiento altitudinal de las áreas aptas y a un mayor riesgo en las zonas ya cálidas/semiáridas, lo que refuerza la importancia del sombreado, el riego y los materiales adaptados. La precipitación anual de $\approx 1200-1800$ mm, con una sequía corta (2-4 meses) para inducir la floración, es un objetivo clásico de aptitud; las lluvias durante todo el año dificultan la concentración de las floraciones y la cosecha.

Viento, radiación y riesgo de heladas

Los vientos intensifican el ETo y elevan el DPV en el dosel, agravando el estrés hidrotérmico; los cortavientos y el diseño de hileras reducen las pérdidas. En cuanto a las heladas, estudios recientes con sensores muestran una gran variabilidad espacial del daño; las referencias técnicas indican que temperaturas de alrededor de $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (tronco) a $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (hoja) ya son suficientes para la muerte de hojas/ramas jóvenes. En cultivos nuevos, el riesgo es aún mayor, y la disposición del relieve, los cortavientos y la elección de cultivares más tolerantes son decisivos.

Suelo, química y física: donde la ecofisiología se encuentra con el manejo

Química: pH, V% y yeso

En los sistemas brasileños, los objetivos habituales de pH (CaCl_2) $\sim 5,2\text{-}5,8$ y V% 60-70 % equilibran la disponibilidad de Ca/Mg, mitigan el Al^{3+} tóxico y favorecen la actividad radicular en la capa arable; el yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) complementa el encalado para la acidez subsuperficial, profundizando las raíces cuando es necesario (textura/CTC y contenidos en el perfil). Las recomendaciones recientes destacan que el V% objetivo depende del CTC: los suelos con CTC bajo requieren un V% más alto para un suministro adecuado de Ca/Mg, mientras que los suelos con CTC alto funcionan bien con un V% más modesto.

Física: LLWR, compactación y agua en el perfil

La franja hídrica menos limitante (LLWR) integra el agua disponible, la aireación y la resistencia a la penetración (PR). En los cafetos, una $PR > \approx 2\text{ MPa}$ ya restringe el crecimiento radicular; las capas densificadas aumentan el riesgo de «sequía fisiológica» incluso con lluvias normales, ya que la conductancia hidráulica del suelo-raíz-xilema disminuye y el control estomático se anticipa. Los ensayos controlados confirman que la compactación reduce g_s , A y el crecimiento, además de alterar la anatomía radicular. En el campo, el SPD con abundante mantillo y tráfico controlado son claves para estabilizar el LLWR.

Luz, sombreado y arquitectura del dosel

Cuándo y por qué sombrear

En entornos templados y bien abastecidos de agua, el pleno sol tiende a maximizar la producción anual. En entornos cálidos/secos o bajo un alto DPV, el sombreado moderado (20-40 %) reduce la temperatura foliar, estabiliza g_s y disminuye la depresión vespertina de A , con ganancias en la estabilidad de la cosecha y, en varios casos, mejoras en la calidad de la bebida (efectos en azúcares y precursores). El mecanismo principal es microclimático: caída de la DPV y de la carga radiativa en la hoja, con mantenimiento de la fotoprotección dentro de límites menos onerosos.

LAI e interceptación

El LAI operativo en arábicas de porte bajo tiende a oscilar entre ~ 3 y 6 en las etapas de mayor interceptación, pudiendo alcanzar niveles más altos en cultivos densos/regados; el objetivo es cerrar el dosel sin exagerar la autocubierta, que acelera la senescencia basal y aumenta la humedad del aire en la copa (plagas/enfermedades). Las relaciones empíricas K_c -LAI muestran que, a medida que el LAI crece, el K_c aumenta (mayor transpiración), pero con ganancias marginales decrecientes, información valiosa para diseñar la densidad y sincronizar el riego.

Agua, riego y sincronización de la floración

Demanda hídrica y coeficientes de cultivo

La demanda estacional típica oscila entre ≈ 900 y 1200 mm año^{-1} en cafetales productivos (lluvia + riego), variando con el LAI, el clima y la edad. Para el manejo práctico, se utiliza E_{To} con K_c específico del cultivo. En condiciones brasileñas, las medidas y los modelos relacionan K_c con el LAI y la etapa: los valores medios de K_c «a mitad de temporada» en cafetos adultos suelen acercarse a 1,0-1,2, variando con la cobertura del suelo, el manejo de las malas hierbas y la arquitectura del dosel. El enfoque dual ($K_{cb} + K_e$) permite separar la transpiración del dosel y la evaporación del suelo, aumentando la precisión bajo mantillo/entre líneas activas.

Riego estratégico y «sequía controlada»

En el café arábica de secano, un breve período seco sincroniza la diferenciación floral; en el café canephora de regadío, se utilizan prácticas de «estrés hídrico controlado» (reducción de las láminas hasta un objetivo de humedad del suelo) seguidas de rehidratación para concentrar la floración y la cosecha, reduciendo la falta de uniformidad. La literatura técnica nacional y la práctica de campo respaldan esta estrategia, siempre que no se prolongue el estrés durante el encorazonamiento-llenado, cuando la sensibilidad hídrica es máxima.

Diagnósticos dinámicos

Además de los balances hídricos, la termografía (temperatura foliar), la porometría (g_s) y la fluorescencia (Φ_{PSII}/NPQ) ayudan a ajustar las láminas en tiempo real, especialmente en las tardes con alta DPV y viento. La termografía se ha aplicado al cafeto para inferir la conductancia estomática y anticipar el estrés antes de que la caída de A sea visible a simple vista.

Calor, frío y estrés combinados

Calor $\times$ sequía $\times$ alta luminosidad

Bajo calor y DPV alto, las limitaciones estomáticas dominan la caída de A ; si los mecanismos de fotoprotección se sobrecargan, aparece el escaldado y se acelera la senescencia. Añadir sombreado moderado, mantillo e irrigación oportuna reduce el riesgo. El aumento de $[CO_2]$ tiende a ampliar la resiliencia térmica, manteniendo A y la integridad del aparato fotoquímico en regímenes de 37/30 °C (día/noche) cuando se controla el estrés hídrico. Los ensayos FACE en *C. arabica* muestran aumentos sostenidos de A sin «downregulation» bioquímica, lo que indica un potencial de mitigación parcial del calentamiento a través del CO_2 , siempre que no haya déficit hídrico.

Frío y heladas

La tolerancia al frío define los límites de aptitud en altitudes/latitudes más bajas; las heladas pueden causar pérdidas graves e incluso la muerte de las plantas, especialmente en parcelas jóvenes. Estudios recientes con VANT muestran que los índices espectrales pueden mapear los daños y orientar las intervenciones localizadas después del evento. En términos de umbral, valores del orden de -2°C (tronco) y -3°C (hoja) ya son críticos.

Nutrición y biología del suelo: N y K en el centro, con S, Ca y Mg «impulsando» la resiliencia

El N y el K dominan la demanda anual; los fraccionamientos/fertirrigación aumentan la eficiencia (especialmente en *canephora* irrigado), y el K es crucial en entornos de alto DPV por su papel osmótico/estomático. El S, el Ca y el Mg deben controlarse mediante análisis foliares/del suelo, y los micronutrientes (B, Zn, Mn) deben recibir atención en suelos con pH elevado o muy arenosos. La biología del suelo (MO, cobertura, diversidad microbiana) mejora la infiltración y amortigua las variaciones de humedad y temperatura, lo que se refleja en un gs más estable a lo largo del día. Las guías regionales y los manuales de fertilización de la investigación pública respaldan estos principios.

Directrices por entorno

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

Riesgos: frío otoño-invierno y calor/sequías en el llenado.

Disposición: densidades medias con el objetivo de alcanzar un LAI ~3–5 con buena aireación; podas regulares para contener la bienalidad.

Suelo: encalado para V% 60–70 % y pH(CaCl₂) 5,2–5,8, yesado si hay acidez subsuperficial; cobertura permanente.

Agua: en secano, utilizar ZARC para posicionar la plantación y gestionar el «secado corto» previo a la floración; riego suplementario (cuando esté disponible) con Kc×ETo y lectura de Tfolha/gs.

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

Riesgos: alto DPV primavera-verano y veranos secos; calor en el llenado.

Disposición: densidades ligeramente mayores para cerrar el dosel temprano, sin déficit de aireación; mantillo abundante.

Sombra moderada (20-30 %) como herramienta ecofisiológica donde la carga térmica es alta, sopesando las posibles pérdidas de rendimiento máximo frente a la estabilidad/calidad.

Agua: riego de apoyo en los picos de ETo; utilizar Kc-LAI para refinar las láminas, prefiriendo un enfoque dual cuando haya mantillo/interfilas activas.

Norte de ES/RO/BA sur — *C. canephora* (conilon/robusta)

Base del sistema moderno: riego + densificación + manejo de tallos (multiestípete) y sincronización de floración mediante control hídrico (sequía controlada + rehidratación).

Nutrición: altas respuestas al K; fertirrigación escalonada.

Suelo: atención a la acidez subsuperficial (yeso) y a la PR bajo mecanización; cobertura permanente.

ZARC: seguir las ordenanzas 6 y 7/2024 (secano/regadío) por estado/DF.

Monitorización ecofisiológica y diagnóstico

Intercambios gaseosos/porometría: A , g_s y E por la mañana frente a la tarde (hojas expuestas) revelan restricciones estomáticas por DPV/agua.

Fluorescencia: F_v/F_m , Φ_{PSII} y NPQ indican fotoinhibición/recuperación; las caídas persistentes requieren una investigación nutricional/hídrica.

Termografía infrarroja: Tfolha como proxy de g_s y estrés térmico, sensible a variaciones rápidas de DPV.

Teledetección (UAV): índices espectrales para la uniformidad intraparcela y el mapeo de heladas/estrés post-evento.

Estrés combinado y compensaciones de manejo

La sequía + el calor + la alta luminosidad rara vez suman efectos de manera lineal, pueden ser sinérgicos (es decir, g_s bajo + DPV alto $\rightarrow$ calentamiento foliar, lo que requiere más fotoprotección). El densificado mejora la fracción de radiación utilizada (mayor transpiración/evaporación sombreada del dosel), pero con agua limitante, las densidades muy altas penalizan el crecimiento en el crítico y el WUEg, además de aumentar el riesgo de enfermedades si disminuye la aireación. Las mitigaciones eficaces combinan: perfil de suelo funcional (química + física), mantillo/paja, sombreado o árboles cuando el sitio es cálido/seco, ritmo de N y K ajustado al crecimiento y, si es posible, riego de precisión. El aumento de $[CO_2]$ atenúa parte del daño del calor en *C. arabica* cuando el agua no es limitante, pero no compensa los déficits hídricos prolongados.

– CAPÍTULO 4 –

Ecología y fisiología de la caña de azúcar (*Saccharum* spp.) en Brasil

La caña de azúcar es una gramínea semiperenne de metabolismo C4, cultivada en una amplia franja climática de Brasil para la producción de azúcar, etanol y bioelectricidad. Su notoria eficiencia fotosintética y su capacidad para formar una gran superficie foliar y tallos ricos en sacarosa permiten productividades de biomasa superiores a las de la mayoría de los cultivos anuales. Sin embargo, este techo fisiológico solo se traduce en rendimiento cuando el sistema suelo-planta-atmósfera está bien acoplado: raíces activas en profundidad, dosel que intercepta y utiliza la radiación de manera eficiente, agua disponible sin restricciones críticas y manejo nutricional ajustado a la partición fuente-drenaje (hojas/tallos). El objetivo de este capítulo es integrar los fundamentos ecofisiológicos, la fotosíntesis C4, la interceptación y el uso de la radiación, las relaciones hídricas, el crecimiento radicular, la partición de asimilados y la maduración, a las decisiones agronómicas de siembra, fertilización, riego, manejo del rastrojo y cosecha, con énfasis en las condiciones brasileñas (secano e irrigado, caña-planta y rastrojos).

Morfofisiología y estadios

Arquitectura y órganos

El cultivo forma matas de tallos cilíndricos con nudos/entrenudos, hojas alternas (vainas + láminas) y un sistema radicular fasciculado, con raíces de origen del «set» (yemas del tallo-semilla) y, posteriormente, raíces adventicias («shoot roots») que sostienen la cosecha y los rebrotes. La literatura clásica describe sistemas con gran densidad radicular superficial, raíces orientadas hacia abajo y, en algunos materiales, haces profundos,

con actividad hídrica documentada más allá de los 2 m e informes históricos de profundidades superiores a los 6 m cuando el entorno lo permite. La distribución con la profundidad disminuye exponencialmente y está fuertemente modulada por la textura, la estructura, la compactación y el manejo.

Etapas operativas (caña-planta) — (i) Germinación/brotación (0-45 d): depende de la temperatura del suelo y la humedad en el surco; (ii) Enramado (hasta ~120 d): define la población de tallos efectivos; (iii) Crecimiento rápido (~120-300 d): expansión de la FIA y alargamiento de los tallos; (iv) Maduración: desaceleración del crecimiento vegetativo, aumento de °Brix/Pol y pureza del jugo. En los rebrotes, el ciclo es más corto, con una fuerte sensibilidad a los daños en la base/altura de corte, la compactación por el tráfico y las reservas de tallos después de la cosecha que alimentan el reequilibrio fuente-drenaje.

Duración del ciclo: en los entornos tropicales brasileños predominan la «caña de un año» (~12 meses) y la «caña de año y medio» (~15-18 meses). El tiempo térmico (grados-día) y la disponibilidad de agua determinan la velocidad de cierre del dosel y la tasa de elongación de los tallos. En casos de alto potencial (agua/nutrición no limitantes y temperaturas elevadas, pero no excesivas), el dosel puede cerrarse ~70-80 días después de la siembra, lo que explica las excepcionales productividades de biomasa observadas en estudios de alto insumo en el noreste brasileño.

Fotosíntesis C4, interceptación de la radiación y eficiencia

Vía C4 — La caña presenta anatomía Kranz y una vía C4, con actividad de pepcase detectada en diferentes intensidades, lo que le confiere una alta tasa fotosintética bajo radiación intensa y temperaturas elevadas, con baja fotorrespiración. Esta bioquímica sustenta altas tasas de asimilación (A) en doseles cerrados y luminosos, siempre que el agua y el nitrógeno no limiten la conductancia estomática y las reacciones bioquímicas asociadas.

Intercepción de la luz: la fracción de PAR absorbida ($fPAR$) crece a medida que aumenta el índice de área foliar (IAF); la caña de alto vigor alcanza un $IAF > 4-5$, con un coeficiente de extinción de la

luz (k) de alrededor de 0,45-0,50 en disposiciones comunes. En el campo, la eficiencia de uso de la radiación (RUE) para la materia seca tiende a variar, en cultivos bien manejados, aproximadamente entre 1,5 y 2,8 g MS MJ⁻¹ de PAR interceptada, con variaciones de densidad, arquitectura y microclima. Ensayos en el noreste de Brasil estimaron $k \approx 0,48-0,51$ y cuantificaron la conversión energética del dosel bajo dos espaciamientos, demostrando que la disposición de las hileras modula la distribución de la luz y la RUE efectiva.

Fuente-drenaje y acumulación de sacarosa — Durante el macollamiento, la partición favorece los tallos (crecimiento estructural). La maduración implica el ajuste de los drenajes y el metabolismo para acumular sacarosa en el parénquima del tallo; las noches más frescas y un ligero déficit hídrico benigno desplazan el equilibrio fuente-drenaje a favor de la acumulación de azúcar, siempre que no se pierda masa del tallo por estrés excesivo. El uso de maduradores químicos (por ejemplo, glifosato en dosis subletales, etefom, sulfometurón) se inserta como una herramienta puntual para anticipar y concentrar la maduración en escenarios específicos, siempre condicionada al medio ambiente y a la legislación.

Relaciones hídricas, demanda de agua y coeficientes de cultivo

Demanda estacional y fases sensibles: el consumo de agua a lo largo del ciclo varía ampliamente ($\approx 900-2500$ mm), según la duración del ciclo, el clima y el manejo (secano frente a regadío). Las fases más sensibles al déficit son: establecimiento/brotación, macollamiento inicial y elongación de los tallos. Cerca de la cosecha, los déficits moderados pueden favorecer la sacarosa, pero los déficits graves reducen la masa de los tallos y el azúcar total recuperable (ATR). En los trópicos húmedos/subhúmedos, el pico de ET_c se produce en el período de máxima IAF, con una evapotranspiración diaria que a menudo supera los 5-6 mm cuando el agua no es limitante. Síntesis brasileñas recientes consolidan los valores regionales de ET y los requisitos de riego en diferentes climas.

K_c — Los coeficientes de cultivo (K_c) de referencia (condición estándar FAO-56) para la caña de azúcar son típicamente $K_{c_ini} \approx 0,4$; $K_{c_mid} \approx 1,20-1,25$; $K_{c_end} \approx 0,7-0,8$, con variaciones según el clima y el

manejo. En entornos de alta demanda evaporativa (DPV elevado, vientos), el K_c efectivo puede ser $< 1,0$ incluso con un dosel cerrado, porque el cierre estomático ante un DPV elevado reduce la fracción transpirativa de la ET_c . El enfoque dual ($K_{cb} + K_e$), que separa la transpiración del dosel (K_{cb}) de la evaporación del suelo (K_e), es especialmente útil en goteo/fertirrigación y en áreas con mantillo.

ET_o y criterio operativo: estimar las láminas a partir de ET_o (Penman-Monteith FAO-56) y K_c/K_{cb} es una práctica consolidada para el riego suplementario. En las regiones brasileñas, las integraciones agrometeorológicas y las observaciones de campo ayudan a definir calendarios y potenciales de riego por microrregiones. Las herramientas de teledetección, como geeSEBAL (SEBAL en GEE), han sido validadas en caña de azúcar regada para estimar ET_a y calificar el manejo a escala de parcela.

Paja y fracciones de ET: en sistemas de cosecha mecanizada sin desbroce con fuego, la paja reduce K_e (evaporación del suelo), aumenta el almacenamiento de agua en el perfil y puede mantener ET_c durante más tiempo en épocas de sequía, ya que retrasa la pérdida de agua superficial y protege la interfaz suelo-atmósfera; estos efectos favorecen la estabilidad entre cosechas, con las compensaciones que se discuten más adelante.

Temperatura, fotoperíodo y límites térmicos

Rangos térmicos por proceso — La caña germina/brota mejor a 25-32 °C (base térmica variable ~12-16 °C). El alargamiento de los tallos y el crecimiento foliar se producen a $\approx 28-32/35$ °C; por debajo de 20 °C se ralentiza, y por encima de 35 °C se producen pérdidas por calor. En la maduración, los días soleados y las noches templadas ($\approx 18-22$ °C) favorecen la acumulación de sacarosa. Estudios fisiológicos detallados demuestran cambios en la asignación y el almacenamiento de azúcar cuando se cultiva por debajo o por encima del óptimo, lo que destaca la importancia de combinar el clima local y el calendario de cosecha. El fotoperíodo tiene un efecto secundario en comparación con el tiempo térmico.

Cierre del dosel como objetivo térmico — En condiciones tropicales con insumos no limitantes, cerrar el dosel hasta ~ 70 días después de la siembra (alto IAF/fPAR) explica parte de los casos de productividad muy

alta; este «objetivo» es el resultado de la combinación de temperaturas elevadas, pero no excesivas, y un régimen hídrico/nutricional que sostiene el crecimiento continuo.

Sistema radicular, física del suelo y calidad estructural

Raíz como cuello de botella/seguro— En la caña de azúcar, la captación de agua y nutrientes depende de un sistema radicular vigoroso y profundo. Las revisiones muestran una gran plasticidad, pero un patrón recurrente de alta densidad en las capas superficiales y actividad hídrica detectable por debajo de los 2 m cuando el suelo lo permite. Las capas densificadas y la alta resistencia a la penetración (> 2 MPa) limitan el alargamiento radicular, retrasan el cierre del dosel y reducen la resiliencia hídrica. Planificar el tráfico controlado, gestionar la humedad de la cosecha y realizar un subsolado dirigido por diagnóstico son estrategias clave para preservar la franja hídrica menos limitante (LLWR) y el volumen de suelo explotable.

Plantación y renovación — En la renovación de la zona (caña-planta), la preparación de la zona afecta en gran medida al entorno radicular y al rendimiento de la primera cosecha, con evidencias en el Cerrado de que los sistemas que alivian la compactación y optimizan la estructura aumentan el enraizamiento y la productividad. En cultivares brasileños bajo fertirrigación subsuperficial, estudios con minirrizotrones estimaron la profundidad efectiva del enraizamiento y el perfil de distribución, útil para calibrar K_{cb} por capa.

Nutrición mineral, encalado/gessado y reciclaje orgánico

Encalado y gessado: en muchos latosoles, trabajar con un pH (H_2O) cercano a 6,0 y $V\% \approx 60$ es un objetivo operativo frecuente. El yesado complementa el encalado cuando hay acidez subsuperficial/ Al^{3+} en exceso, elevando el Ca^{2+} en profundidad y favoreciendo la profundización radicular; su dosis depende de la textura/CTC y del diagnóstico. La relación entre el encalado y el potasio es delicada: el sobreencalado puede afectar a la disponibilidad de K y micronutrientes, lo que requiere un manejo cuidadoso.

Macronutrientes

Nitrógeno (N): la respuesta depende de la materia orgánica, el rastrojo y el historial; las dosis y los fraccionamientos se ajustan al sistema (planta vs. rastrojo) y al objetivo (azúcar vs. biomasa). **Fósforo (P):** enfoque en la siembra (en el surco), con mantenimiento estratégico en suelos de baja disponibilidad. **Potasio (K):** alta demanda y reciclaje intenso a través del rastrojo y el vinagre; abono posicionado (surco, a voleo, fertirrigación) y fuente/dosis compatibles con la textura y el régimen de lluvias. Las revisiones sobre la vinaza muestran ganancias en la fertilidad y la calidad del suelo cuando se maneja bien (incluso como fuente de K), al tiempo que señalan los riesgos y la necesidad de criterios ambientales (dosis, área, distancia de cursos de agua, monitoreo).

Fuentes orgánicas y economía circular: la vinaza y la torta de filtro forman parte de las estrategias de reciclaje de nutrientes y agua en el sistema cañavero; Las síntesis técnico-científicas informan de una mejora de los atributos químicos, físicos y biológicos del suelo y de una contribución significativa de K y agua a los cultivos cuando se utilizan con gobernanza ambiental (seguimiento de cargas, límites de aplicación, riesgo de salinización localizada). Hay innovaciones recientes en ultrafiltración/acondicionamiento de vinaza para aumentar la eficiencia y reducir los costes logísticos.

Directrices de fertilización: los manuales brasileños de fertilidad para la caña de azúcar detallan los objetivos de análisis de suelo/hoja, balances de exportación y recomendaciones por textura y entorno; la actualización frecuente de estas guías y la integración con datos de productividad/calidad son esenciales para la toma de decisiones por parcela.

Paja, cosecha y balance de carbono

La cosecha en bruto deposita $\approx 8\text{-}20 \text{ t MS ha}^{-1}$ de paja (varía según el cultivo/entorno), reduce la evaporación directa del suelo, disminuye la amplitud térmica superficial y contribuye al almacenamiento de carbono. Por otro lado, puede inmovilizar N (relación C:N elevada), albergar plagas/enfermedades y exigir ajustes precisos en las dosis/tiempos de N y K. Las

revisiones de la descomposición de la paja en Brasil cuantifican los ritmos de mineralización y los escenarios en los que las eliminaciones parciales (con fines energéticos) reducen el C del suelo y el agua almacenada, penalizando la resiliencia hídrica.

Estrés abiótico: sequía, calor, frío y combinaciones

Déficit hídrico y DPV — En DPV elevado, la caña regula la conductancia estomática (gs), anticipando la caída de la transpiración y el Kc efectivo, incluso sin limitación hídrica inmediata en el suelo; el efecto protege el aparato fotosintético, pero reduce la fracción transpirativa de la ET y puede limitar A y el alargamiento de los tallos cuando es persistente. Este comportamiento explica el $Kc_{mid} < 1$ observado en climas cálidos y secos a pesar del dosel cerrado.

Calor: las temperaturas por encima del óptimo ($\geq 35\text{ }^{\circ}\text{C}$) aumentan el riesgo de trastornos en el crecimiento y el equilibrio de la sacarosa, sobre todo cuando coinciden con un DPV alto y vientos secos. El manejo con mantillo, el riego estratégico y la selección varietal ayudan a amortiguar los picos térmicos del dosel.

Frío y heladas: las temperaturas $< 8\text{-}12\text{ }^{\circ}\text{C}$ ralentizan drásticamente los procesos fisiológicos; las heladas definen los límites de aptitud en altitudes/latitudes de riesgo, lo que impone ajustes en el calendario (siembra/cosecha), la elección de materiales adaptados y la planificación del paisaje (barreras contra el viento, topografía). Las directrices del ZARC consolidan el riesgo térmico por década y tipo de suelo/ciclo.

Estrés combinado: las sequías tardías + calor + alta radiación tienden a acelerar la senescencia y reducir la vida útil del cañaveral. Por el contrario, los déficits moderados y de corta duración al final del ciclo pueden intensificar la maduración (aumentar $^{\circ}\text{Brix/Pol}$) si el manejo prioriza el ATR por unidad de agua (productividad del agua para el azúcar), y no solo la masa de tallos.

Disposición espacial, arquitectura y cierre rápido del dosel

El tiempo hasta el cierre es uno de los grandes determinantes del rendimiento. En entornos de alto potencial, cerrar el dosel en ~10 semanas (≈ 73 días, en promedio) explica las ganancias de productividad porque aumenta tempranamente la fracción de radiación absorbida (fPAR), reduce el crecimiento de malezas y maximiza la RUE del ciclo. Los ajustes de densidad, espaciamento (líneas simples/dobles, 1,5-1,8 m o disposiciones combinadas) y arquitectura (hojas más erguidas) contribuyen a alcanzar la IAF objetivo sin comprometer la cosecha mecanizada.

Riego y manejo del agua (de secano y de regadío)

Planificación en secano: en el centro-sur de Brasil, una estrategia fundamental consiste en escalonar las siembras para que el macollamiento y el inicio del gran crecimiento coincidan con la estación lluviosa. El ZARC por estado/municipio/ciclo, alimentado por series históricas y modelos de balance hídrico y límites térmicos, indica ventanas de menor riesgo (20-30-40 %), orientando las decisiones sobre la época y, en consecuencia, la cosecha.

Riego suplementario: cuando sea posible, utilizar $ET_0 \times K_c / K_{cb}$ con desencadenantes por fase (humedad del suelo por θ /tensión) y dar prioridad al azúcar por agua en el período de maduración. En caso de alta demanda evaporativa, considerar K_c efectivo $<$ FAO-56 debido al cierre estomático por DPV; calibrar por parcela reduce los errores de la lámina. La adopción de la teledetección (geeSEBAL), junto con las observaciones en el suelo, ha demostrado ganancias de eficiencia en el manejo de la caña de azúcar irrigada en Brasil.

Maduración: clima, «sequía controlada» y maduradores

La maduración se ve favorecida por días soleados y noches templadas; el estrés hídrico leve y transitorio puede concentrar los azúcares sin una pérdida significativa de biomasa de los tallos, siempre que la «sequía controlada» no desencadene una senescencia prematura. En contextos específicos, los maduradores (por ejemplo, glifosato en dosis subletales, etefom, sulfometurón-metílico) anticipan y uniformizan la

cosecha, pero su rendimiento y la respuesta varietal están condicionados por el clima y la fisiología del dosel, lo que requiere validación local y cumplimiento normativo.

Calidad tecnológica y compensaciones

Los indicadores — °Brix, Pol, pureza y ATR guían la cosecha. En la planificación del riego y la nutrición, es prudente buscar la productividad del agua para el azúcar (y no solo para la masa del tallo). El acolchado mejora la estabilidad del ATR entre cosechas al amortiguar el estrés hídrico, pero puede requerir ajustes de N para mitigar la inmovilización.

– CAPÍTULO 5 –

Ecofisiología del algodón (*Gossypium hirsutum*) en Brasil

El algodón herbáceo (*G. hirsutum*) es una especie C3, perenne y cultivada como anual, de hábito indeterminado y alta plasticidad fenotípica. Su ecofisiología está fuertemente modulada por el microclima del dosel (radiación, temperatura foliar y DPV), por el agua del suelo (perfil, LLWR) y por la nutrición (especialmente N y K), con repercusiones directas en la retención de estructuras reproductivas, la masa de manzanas/capullos y la calidad de la fibra. Este capítulo integra procesos (intercambios gaseosos, fotoprotección, fuente-drenaje), etapas fenológicas y factores edafoclimáticos brasileños (Cerrado, MATOPIBA, MS/GO/MT/BA) en directrices prácticas de manejo.

Morfología funcional y fenología

Arquitectura: eje principal con ramas vegetativas y frutíferas; hojas cordiformes con tricomas (pubescencia) que influyen en la energía/umbral térmico; raíz pivotante con laterales profundos cuando el perfil no es denso/ácido.

Etapas prácticas — (i) emergencia; (ii) botón floral; (iii) floración; (iv) fructificación/llenado de manzanas; (v) apertura de capullos y maduración. El crecimiento es indeterminado: lo vegetativo y lo reproductivo coexisten, lo que requiere un equilibrio mediante densificación, N/K y regulador de crecimiento (cloruro de mepiquat) cuando sea necesario.

Tiempo térmico (DD60): el desarrollo se describe bien por grados-día basados en 15,6 °C (60 °F). Objetivos operativos: 1.º cuadrado ~425-475 DD60; 1.ª flor ~775-850 DD60; apertura de capullos ~>1600 DD60 después de la floración; cosecha ~2200-2600 DD60 (varía según el entorno/cultivar).

Fisiología del crecimiento y la producción

Fotosíntesis C3, estomas y DPV

A (asimilación) está fuertemente acoplada a g_s (conductancia estomática) y al DPV; hay una típica depresión vespertina de A en días secos/calientes. La pubescencia y el ángulo foliar modulan la temperatura de la hoja.

$iWUE$ (A/g_s) y WUE (A/E) son métricas útiles para comparar materiales/sitios; un equilibrio adecuado de N y K sustenta la fuente (hoja) y el drenaje (manzana/fibra) bajo un DPV alto.

Fuente-drenaje y definición del rendimiento

El número de manzanas/capullos y la retención en posiciones basales/primarias definen el potencial; el período clave → floración → 3 semanas después de la floración es crítico para la retención.

Exceso vegetativo (altos niveles de N/agua + espaciamiento amplio) desplaza los asimilados hacia las hojas/ramas → mayor aborto y retraso en la maduración; el mepiquat ayuda a restablecer la relación fuente-drenaje.

Temperatura y calor

Óptimos de crecimiento/cuajado cerca de 30 °C; picos > 35–36 °C en floración/llenado reducen la viabilidad del polen, el alargamiento del tubo polínico y la retención de manzanas; noches por encima de 24–26 °C aumentan la respiración y empeoran el equilibrio fuente-drenaje.

Agua, demanda evaporativa y Kc

Demanda

Necesidad hídrica del ciclo (secano/regadío): ~600-1000+ mm, variando según la duración del ciclo, el clima y el manejo. Picos de ET_c desde la floración hasta el llenado.

Fases más sensibles al déficit: establecimiento, botonización (squares), floración y fase inicial de llenado de manzanas.

Coeficientes de cultivo

Kc (simple, referencia): inicio $\approx 0,35$ - $0,40$; medio $\approx 1,15$; final $\approx 0,50$ - $0,60$ (antes de la caída de las hojas). En condiciones de alta demanda (VPD alto/viento), el Kc efectivo puede ser $< 1,0$ incluso con el dosel cerrado.

Se recomienda un enfoque dual ($K_{cb} + K_e$) en goteo/fertirrigación y en SPD con mantillo, separando la transpiración del dosel y la evaporación del suelo.

Estrategias

En seco, posicionar la siembra para que la botonación-floración coincida con la estación lluviosa (ZARC) y cerrar el dosel temprano (densidad/líneas). En riego, manejar por $E_{To} \times K_c / K_{cb}$, humedad/tensión en el perfil y límites por fase; buscar un WP (kg de fibra por mm) elevado.

Suelo, encalado y nutrición

Reacción: en el Cerrado, apuntar a un pH ($CaCl_2$) $\sim 5,5$ - $6,0$ y V% ~ 50 - 60 , corrigiendo la acidez subsuperficial (yeso) cuando sea necesario.

Nitrógeno (N): alta respuesta, pero los excesos aumentan el área foliar y reducen la retención/precocidad; parcelas en cobertura según la lluvia/riego.

Fósforo (P): centrarse en el surco (siembra) y mantenimiento mediante análisis del suelo/estado; el PP limita el crecimiento inicial/raíz.

Potasio (K): mayor demanda por parte del cultivo; calibrar la dosis según el K en el suelo y el objetivo de producción; prestar atención al mantenimiento en sistemas intensivos y a la calidad de la fibra (micronaire/madurez), sensible al suministro de K.

Azufre y micronutrientes: S en suelos arenosos/oxisoles; controlar B/Zn/Mn/Fe (fibra y pegamento).

Disposición espacial, densidad y reguladores

Población y espaciamiento: referencia operativa para el sistema convencional: $0,80$ - $0,90$ m entre hileras con ~ 80 - 120 mil plantas ha^{-1} (≈ 8 - 12 plantas m^{-1}); en densificación ($0,45$ - $0,50$ m), reducir las plantas por metro para mantener el LAI sin exceso vegetativo.

Arquitectura del dosel: las hileras más estrechas y las densidades moderadas reducen el período crítico de competencia con las malas hierbas, cierran el dosel antes y aumentan la fracción de T/ET. Ajustar al cultivo/ambiente.

Reguladores del crecimiento (mepiquat): herramienta para contener la altura y el alargamiento de las ramas, mejorar la retención en las primeras posiciones y uniformizar la maduración, especialmente en entornos con alto contenido de N/agua.

Cavitación, embolia y seguridad hidráulica

Conceptos clave: la cavitación es la formación de burbujas en la savia xilemática bajo fuerte tensión; cuando los vasos se llenan de aire se produce embolia, lo que reduce la conductancia hidráulica y el suministro de agua al dosel.

Estrategia del algodonero — En *Gossypium hirsutum*, el cultivo evita el fallo hidráulico mediante el cierre estomático precoz y, en sequías prolongadas, la abscisión foliar, preservando la integridad del xilema del tallo y la raíz. Las hojas son más vulnerables a la embolia que los tallos y las raíces, y el cierre estomático (g_s) precede al inicio de la embolia, lo que configura un margen de seguridad hidráulica positivo. Las señales acústicas de cavitación acompañan a la caída de la asimilación (A) y la conductancia estomática (g_s) en sequía controlada.

Segmentación hidráulica y órganos reproductivos: el sistema está segmentado: los órganos periféricos (hojas y estructuras reproductivas jóvenes) ceden primero, protegiendo el tallo. Estudios recientes describen las propiedades hidráulicas del pedicelo/manzana y la transpiración del fruto, útiles para reducir el aborto de manzanas bajo estrés.

Implicaciones prácticas

Planificación hídrica: sitúe la prefloración y la floración en las ventanas ZARC y evite los veranillos en esta fase.

Desencadenantes del riego: utilice el potencial hídrico de la hoja (Ψ_{hoja} , cámara de presión) o del tallo (Ψ_{tallo} , microtensiómetro o método de ensacado) para intervenir antes de alcanzar el g_s típico del material.

Dosel y DPV: cierre el dosel temprano (densidad/espaciamiento) para reducir la temperatura foliar y el DPV; supervise con termometría infrarroja.

Suelo y nutrición: mantenga el perfil descompactado, K y Ca adecuados (pared/xilema), cobertura/mantillo y yeso cuando sea necesario.

Ciclos de sequía-riego: evite los regímenes de «encendido-apagado» que provocan ciclos repetidos de cavitación-relleno (posible fatiga por cavitación); prefiera láminas estables en la reproducción.

Procedimiento de campo (resumen): medir Ψ hoja al mediodía (hoja de sol) y al amanecer; registrar A, gs y temperatura foliar en días representativos; seguir NDVI/NDRE y LAI para anticipar la caída de la conductancia hidráulica. En riego, integrar $ETo \times Kc / Kcb$ con Ψ .

Estrés abiótico y respuestas

Calor + sequía (estrés combinado): reducen g_s y A; los picos térmicos en la fase reproductiva provocan la caída de manzanas/capullos y acortan las fibras. Medidas: ventanas ZARC, densidad/arquitectura para cerrar el dosel, manejo de K y uso de mepiquat; en cultivos de regadío, enfriar el dosel mediante láminas oportunas.

Encharcamiento/baja aireación: limita las raíces y aumenta los abortos; evitar la compactación y los surcos mal drenados.

Directrices regionales (Brasil)

Mato Grosso/GO/MS (Cerrado): priorizar la siembra de la primera cosecha en ventanas ZARC; en la segunda cosecha (después de la soja), prestar atención a los veranillos y al menor potencial de agua/temperatura. Densidades moderadas y mepiquat según el vigor/cultivar.

Bahía (Oeste)/MATOPIBA — DPV alto y vientos: cerrar el dosel temprano; considerar disposiciones más estrechas; riego suplementario donde esté disponible.

Sur/Sudeste — riesgo de frío en la implantación; ajustar la siembra, los cultivares y los reguladores para garantizar la precocidad y evitar las lluvias durante la cosecha.

Monitorización ecofisiológica (campo)

Intercambios gaseosos/porometría (A , g_s , E) e $iWUE$ en botonización y floración.

Clorofila/SPAD y $F_v/F_m/\Phi PSII$ para el estado de N y la fotoinhibición en olas de calor.

Clima del dosel — DPV , T_{folha} (termometría IR), PAR y $NDVI/NDRE$ para uniformidad; Kc/Kcb estacional ajustado a LAI .

– CAPÍTULO 6 –

Ecofisiología de los cultivos de invierno en Brasil (trigo, cebada, avena y canola)

Los cultivos de invierno desempeñan un papel fundamental en la sostenibilidad de los sistemas brasileños de secano y de regadío, especialmente en el sur, el sudeste y el centro-oeste de altitud. Como especies C3, comparten principios ecofisiológicos: (i) fotosíntesis sensible a la temperatura y al déficit de presión de vapor (DPV); (ii) fuente-drenaje que modula el número de estructuras reproductivas y el llenado de granos/silículas; (iii) fuerte influencia de la vernalización (exposición al frío) y fotoperíodo en la transición vegetativa→reproductiva; (iv) respuestas marcadas al frío/heladas, calor y déficit hídrico en ventanas críticas. Integrar la época de siembra (ZARC), la disposición de las plantas, el agua (ETc) y la nutrición sitúa las etapas sensibles (antesis/floración y llenado inicial) en condiciones menos estresantes, lo que aumenta el rendimiento y la calidad.

Bases ecofisiológicas comunes

Fotosíntesis C3, estomas y DPV

La asimilación de CO₂ (A) en C3 aumenta con la PAR hasta la saturación y está modulada por la temperatura y la conductancia estomática (g_s). En tardes secas/ventosas, el DPV elevado induce el cierre estomático (caída de g_s) y la depresión vespertina de A. El acoplamiento A-g_s explica parte de la variabilidad intraparcela y entre ambientes; iWUE = A/g_s y WUE = A/E (o rendimiento/ET) son útiles para comparar materiales y manejos, especialmente cuando hay limitación de agua.

Fuente-drenaje y definición de rendimiento

En los cereales de invierno, el número de granos m^{-2} (NGM) es el resultado del número de espigas/espiguillas y de la fertilidad de las flores en la antesis; la masa del grano depende de la duración y la tasa de llenado. En la colza, el rendimiento viene dado por las panículas $\text{m}^{-2} \times$ granos por panícula $\times$ masa de mil granos; una floración bien sincronizada y un dosel estable mejoran la distribución vertical de las panículas. Las limitaciones estomáticas (agua/calor/viento) y térmicas (frío, heladas, calor) en la ventana crítica (engrosamiento→antesis→inicio del llenado) son las que tienen mayor impacto.

Vernalización y fotoperíodo

El trigo, la cebada y la avena presentan distintos niveles de requerimiento de vernalización y sensibilidad al fotoperíodo (días largos) que regulan la transición a la fase reproductiva y la duración de las fases (macollamiento, elongación, espigado). En la colza de primavera, la vernalización es baja; una temperatura templada durante la implantación y la floración es decisiva para el espigado y el llenado inicial.

Temperatura, grados-día y ventanas

El tiempo térmico (GDD) organiza el avance fenológico. Los rangos óptimos típicos para el crecimiento vegetativo de los C3 de invierno se sitúan entre 15 y 22 °C; por debajo de ~5 °C, el crecimiento se ralentiza notablemente; por encima de ~28-30 °C, se acortan las fases y disminuye el área foliar funcional. En antesis, las heladas ligeras a moderadas pueden esterilizar las flores; los picos de calor reducen la viabilidad del polen, la fecundación y acortan el llenado.

Fenología y morfología por cultivo

Trigo (*Triticum aestivum*)

Arquitectura: tallo con nudos/entrenudos, hojas alternas, sistema radicular fasciculado; los brotes determinan parte del NGM. Escalas BBCH/Feekes: brotación (Feekes 2-4), elongación (5-7), engrosamiento

(10), espigado (10.1-10.5), antesis (10.5.1), grano lechoso (11.1), pastoso (11.2), duro (11.3) y maduración fisiológica.

Vernalización/fotoperíodo: predominan los cultivares de primavera. En regiones más cálidas, los materiales menos sensibles al día y con baja vernalización anticipan la espigación/antesis.

Ventana crítica: desde el engrosamiento hasta la antesis y 10-15 días después; las heladas ($\approx -2\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$) pueden esterilizar las espiguillas; el calor en la antesis/llenado inicial reduce el NGM y la masa.

Cebada (*Hordeum vulgare*)

Arquitectura: similar al trigo, con espiguillas bien definidas; la calidad de la malta requiere una proteína moderada y una maduración uniforme. La antesis es sensible a las heladas y al calor; la ramificación/macollamiento debe ajustarse para evitar un exceso vegetativo que aumente el encamado.

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

Arquitectura: panícula, alta plasticidad (granos, forraje y cobertura). En los granos, la estabilidad depende de que la antesis se produzca fuera de las heladas y las olas de calor. *A. strigosa* se utiliza como cobertura/pastoreo, generando paja de alta calidad (beneficios para el SPD y el ciclo de nutrientes).

Canola (*Brassica napus* ssp. *oleifera*)

Arquitectura: tallo principal y ramas laterales; LAI con pico en la floración; flores amarillas (autógamas, alógamas ocasionales); siliquas a lo largo del dosel. En ambientes templados, el sol pleno maximiza la productividad; en olas de viento seco/alta DPV y calor, hay un mayor riesgo de aborto floral y caída de espiguillas. El boro (B) es crítico en la floración (crecimiento del tubo polínico) y el azufre (S) en la síntesis de aceite/proteína.

Agua, ETc y coeficientes de cultivo (Kc)

Demanda hídrica y sensibilidad por fase

Trigo/cebada/avena (secano): necesidad estacional ~300-550 mm, con pico de ETc desde el alargamiento hasta el inicio del llenado. En riego, el total aumenta según la duración y el clima.

Canola: demanda continua desde la fase vegetativa hasta la floración y el inicio del llenado; los déficits en este período reducen las espiguillas × granos, la principal palanca de rendimiento.

Kc de referencia

Cereales de invierno: $Kc_{ini} \approx 0,30-0,40$; $Kc_{medio} \approx 1,10-1,15$; $Kc_{final} \approx 0,25-0,40$ (antes de la senescencia total).

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

Nota: en climas secos/ventosos (alto DPV/viento), el Kc_{medio} efectivo puede ser $< 1,0$, debido a la reducción estomática de la transpiración y a una menor evaporación del suelo bajo mantillo.

Kc dual (Kcb+Ke) y dinámica por etapa

El enfoque dual separa la transpiración del dosel (Kcb) y la evaporación del suelo (Ke), útil en goteo/fertirrigación y bajo mantillo. En trigo/cebada/avena, el Kcb aumentadesde el macollamiento hasta la floración y disminuye en la senescencia; en la colza, alcanza su pico en la floración (LAI máximo) y disminuye con la caída de las hojas. Las series por días después de la emergencia muestran picos cercanos a la antesis/inicio del llenado, útiles para programar los riegos.

Estrategias prácticas de agua

En secano, utilizar ZARC para posicionar el engrosamiento → antesis con mayor probabilidad de lluvia; evitar siembras tardías que expongan la antesis al calor.

En regadío, gestionar por $ET_o \times Kc/Kcb$ y humedad/tensión del suelo; reducir las reposiciones al final para preservar la calidad (trigo/cebada/avena) y evitar la dehiscencia en la colza.

Temperatura, frío, heladas y calor

Establecimiento y vegetativo

La germinación/emergencia se ve favorecida por 10-20 °C y buena humedad. Las heladas tempranas pueden reducir la población (necrosis de las plántulas). Crecimiento vegetativo óptimo a 15-22 °C; por encima de > 28-30 °C, la fenología se acelera y el área foliar funcional tiende a reducirse.

Antesis, floración y llenado inicial (ventana crítica)

Trigo/cebada/avena: las heladas durante la espigadura/antesis causan esterilidad; el calor cerca de la antesis y al inicio del llenado reduce la viabilidad del polen, acorta la duración del llenado y disminuye la masa de los granos. En evaluaciones controladas y de campo, el estrés térmico en este período explica gran parte de la variación de rendimiento entre cosechas.

Canola: el frío intenso durante la floración y el calor > ~30 °C con viento seco aumentan el aborto floral/caída de silicuas; el llenado inicial requiere agua continua y S/B disponibles.

Suelo, encalado y nutrición

Reacción del suelo y perfil

El rendimiento se maximiza con un perfil descompactado, una buena estructura y una reacción ajustada (pH en CaCl₂ o en H₂O, según las recomendaciones locales). En suelos arcillosos y bajo SPD, hay que cuidar las capas densificadas (tráfico controlado, rotación con raíces agresivas), ya que el encharcamiento reduce la difusión de O₂, limita la absorción y aumenta las pérdidas de N.

Macronutrientes

Nitrógeno (N): en los cereales, define el macollamiento, la fertilidad de las espiguillas y la proteína del grano (calidad tecnológica); fraccionar en coberturas en el alargamiento y la preantesis reduce el riesgo de pérdidas y mejora la eficiencia. En la colza, el N sostiene el LAI y el número de siliquas; un exceso muy tardío retrasa la maduración y puede aumentar el encamado.

Fósforo (P): crítico en el establecimiento y el perfilado (raíces/meristemos).

Potasio (K): regula el equilibrio hídrico/estomático, el transporte de azúcares y la calidad (peso hectolítico/proteína en los cereales; aceite en la colza).

Azufre (S): esencial para la síntesis de proteínas/aceite; en la colza, las necesidades son más elevadas que en los cereales de invierno.

Micronutrientes

Boro (B): crítico en la colza (floración/polinización; crecimiento del tubo polínico); su deficiencia implica aborto floral y menos granos/siliquas.

Zinc (Zn), manganeso (Mn), cobre (Cu): influyen en el macollamiento, la resistencia al estrés y la salud de los cereales de invierno; ajustes según análisis foliar/del suelo.

Estrés abiótico y manejo

Frío y heladas

Trigo/cebada/avena: las heladas en la espigadura/antesis pueden causar esterilidad parcial/total; en el llenado, reducen la tasa de deposición de almidón y dan lugar a granos vacíos.

Canola: las heladas reproductivas provocan abortos y caídas significativas de siliquas; la aclimatación previa atenúa los daños, pero no elimina los riesgos.

Directrices regionales

Sur (RS/SC/PR)

Riesgos: heladas tardías, lluvia en la cosecha (calidad) y períodos de viento/alto DPV en primavera. Trigo/cebada: alinear la antesis fuera de las olas de frío; en la cebada para malta, controlar la proteína con N calibrado y evitar el encamado (densidad/disposición/cultivar). Canola: la floración con viento seco requiere manejo del agua y S/B. Avena: excelente opción de rotación/paja; en granos, evitar el calor tardío.

Sudeste (SP/MG de altitud)

Ventanas más cortas; trigo y avena en altitudes medias; canola en lugares más fríos/altos. En riego, prestar atención a la calidad (peso hectolítico, contenido de proteína/aceite) y a la sanidad.

Centro-oeste (MS/GO/DF)

Trigo/cebada regados: riesgo de calor en la reproducción y veranillos; gestionar por Kc/Kcb y humedad/tensión del suelo, posicionando la antesis para evitar picos térmicos. La colza en altitudes más elevadas/regadas requiere agua continua hasta el inicio del llenado y S/B adecuados.

ZARC — Zonificación Agrícola de Riesgo Climático

Consultar las ordenanzas vigentes por estado/municipio/cultivo/sistema (de secano/de regadío; incluido el doble propósito en el trigo). Utilizar las ventanas $\leq 20\text{--}30\%$ de riesgo, ajustadas por tipo de suelo y ciclo, para posicionar la antesis/floración fuera de las heladas/olas de calor y maximizar la posibilidad de lluvias efectivas en las fases de mayor ETc.

– CAPÍTULO 7 –

Ecología de los cultivos de tomate, cebolla, ajo y zanahoria

Las hortalizas de mayor relevancia económica en Brasil, como el tomate (*Solanum lycopersicum*), la cebolla (*Allium cepa*), el ajo (*Allium sativum*) y la zanahoria (*Daucus carota* subsp. *sativus*), comparten principios ecofisiológicos comunes, pero presentan particularidades notables en cuanto al fotoperíodo, la temperatura, las necesidades hídricas y las estrategias de manejo. Este capítulo integra bases ecofisiológicas con recomendaciones prácticas para los entornos brasileños (sur, sureste, centro-oeste/cerrado, noreste y MATOPIBA), contemplando el cultivo al aire libre y los sistemas protegidos (túneles, invernaderos), con enfoque en: (i) estructura del dosel y captura de luz; (ii) relaciones hídricas y uso de coeficientes de cultivo (K_c); (iii) desarrollo fenológico y etapas críticas; (iv) nutrición mineral y trastornos fisiológicos; (v) adaptaciones edafoclimáticas.

Ejes ecofisiológicos transversales

Fotosíntesis e intercambios gaseosos (C_3): todas las especies tratadas aquí son C_3 , con sensibilidad de A (asimilación) a DPV , temperatura de la hoja y cierre estomático. La eficiencia instantánea del uso del agua ($iWUE = A/gs$) es un buen indicador comparativo entre cultivares y manejos.

Evapotranspiración y K_c : el manejo del riego mediante $ET_c = K_c \times ETo$ (métodos FAO-56, coeficiente simple o dual) es el puente entre el microclima y la fisiología del campo. El K_c varía según la fase fenológica, la arquitectura del dosel, la cobertura del suelo y la frecuencia de humectación superficial.

Partición de asimilados: la relación fuente-drenaje cambia rápidamente en los períodos reproductivos (fructificación o formación de

bulbos/raíces), que son las etapas más sensibles al estrés hídrico, térmico y nutricional.

Calidad del producto: atributos como el contenido de sólidos solubles (tomate), el picante y la materia seca (cebolla/ajo) y la acumulación de carotenoides (zanahoria) responden al microclima, la nutrición y la disponibilidad de agua.

Parámetros generales útiles

DPV operativo: 0,8-1,8 kPa en mañanas frescas y 2,0-3,5 kPa en tardes calurosas de verano; por encima de ~2,5-3,0 kPa, gs tiende a caer acentuadamente, reduciendo A.

LAI funcional: LAI 2,5-3,5 suele maximizar la fracción de radiación fotosintéticamente activa interceptada (fPAR) sin penalizar la ventilación en el dosel en el campo; en condiciones protegidas, el LAI objetivo puede ser ligeramente menor en verano para evitar el calentamiento del fruto/hoja.

Rehabilitación postraumática: después de episodios de sequía breve, dar prioridad a riegos pequeños y frecuentes, evitando «choques hídricos» que agravan las grietas de las raíces (zanahoria) y la BER (tomate).

Tomate (*Solanum lycopersicum*)

Fenología, arquitectura y ambiente

El tomate tiene un ciclo variable (90-140 días después del trasplante, dependiendo del cultivar y el ambiente) y una gran plasticidad arquitectónica bajo conducción tutorada (1-2 tallos) o rastrera (industrial). En ambiente tropical/subtropical, las temperaturas nocturnas moderadas y los días no excesivamente calurosos favorecen la cuajada y el desarrollo de los frutos. En cultivo protegido, la gestión de la ventilación y el sombreado reduce la temperatura foliar y la DPV al atardecer.

Temperatura, fructificación y calidad

Rangos térmicos de referencia

Germinación/establecimiento: 15-25 °C (óptimo), con emergencia acelerada en 7-10 días y stand más uniforme.

Crecimiento vegetativo: 18-25 °C favorecen la expansión foliar y la formación de inflorescencias con entrenudos moderados.

Fructificación/llenado: las noches entre 16-20 °C y los días 22-29 °C son favorables; las noches ≥ 21 °C durante varios días reducen la viabilidad del polen y el pegado.

Pegamento floral y polinización

Las temperaturas diurnas muy elevadas ($> 32-35$ °C) desorganizan la microsporogénesis, engrosan la pared polínica y acortan la fase receptiva; en condiciones protegidas, la ventilación y el sombreado ligero (20-30 %) reducen la temperatura del fruto/hoja y mejoran el pegamento.

Calidad industrial y de mesa

Licopeno: se maximiza en rangos de temperatura templados del fruto; el calor extremo suprime la biosíntesis y eleva los carotenoides alternativos, alterando la coloración.

Sólidos solubles (°Brix) y acidez: el manejo del K y el agua durante el llenado de los frutos moldea el equilibrio azúcar/ácido. El déficit hídrico controlado al final del ciclo puede elevar el Brix, pero el riesgo de agrietamiento exige precaución.

Relaciones hídricas y Kc

Enfoque práctico: utilizar FAO-56 (Kc simple) o método dual (Kcb + Ke) ajustado al microclima y al sistema de riego (el goteo reduce Ke). En el campo, valores típicos de Kc: inicial $\approx 0,6$; intermedio $\approx 1,10-1,15$; final $\approx 0,70-0,90$. En cultivos protegidos, el Kc es sensible a la ventilación, la densidad y las cubiertas plásticas.

Protocolos de riego:

- Estime el ETo diario (Penman-Monteith/estación local).
- Aplique el Kc de la etapa (o Kcb y Ke en el dual, reduciendo Ke bajo goteo).
- Corrija por la eficiencia del sistema (por ejemplo: 0,92 en goteo; 0,70-0,85 en aspersión, según el viento/uniformidad).
- Convierta a mm/parcela y programe turnos cortos a primera hora de la mañana.

Etapas críticas: botón floral→floración→pegamento e inicio del llenado. Interrumpir las fuertes oscilaciones de humedad del suelo (evitan grietas y BER). Indicadores en tiempo real: tensiómetro (-10 a -25 kPa en suelos francos), SPAD (N), Tleaf-Tair (termómetro IR) y Fv/Fm (fotoinhibición).

Nutrición y trastornos fisiológicos

- Calcio: la pudrición apical está relacionada con la baja disponibilidad de Ca en el fruto, combinada con flujos transpiratorios irregulares. Estrategias: mantener una humedad estable del suelo (sin picos de estrés), garantizar el Ca en el sistema radicular (encalado bien hecho; fuentes de calcio en la fertirrigación cuando sea pertinente), conducir el dosel para evitar la supertranspiración de las hojas en detrimento de los frutos y evitar el exceso de N y K en las fases iniciales de la fructificación; evitar la poda foliar excesiva que exponga los frutos al sol directo y aumente la temperatura del fruto.

- Potasio: ajusta el Brix y la coloración, pero dosis muy altas al inicio de la fructificación pueden competir con el Ca en el xilema. El equilibrio N-K-Ca es clave para la productividad y la calidad.

- Magnesio y micronutrientes: el Mg sostiene la clorofila y la respuesta a la alta irradiancia; el Zn/B influyen en la fructificación y la salud de las flores.

Manejo ecofisiológico

Densidad y poda: conducciones más abiertas en épocas cálidas para reducir la temperatura y mejorar la aireación; densidad más alta en épocas templadas para capturar la luz sin sombrear excesivamente la capa de frutos.

Riego: priorizar el goteo con turnos cortos; en picos de calor, iniciar los riegos a primera hora de la mañana para bajar la temperatura foliar, complementando por la tarde solo si es necesario (evitando el riego nocturno en sistemas de aspersión). El monitoreo por tensiometría (-10 a -25 kPa en suelos francos) y el balance hídrico diario por ETc proporcionan previsibilidad.

Cultivo protegido: ventilación cruzada, mallas de sombreo del 20-30 % en verano y control de DPV para contener el aborto floral y el granizo de frutos

Lista de verificación práctica (tomate)

- Planifique la ventana de siembra para que la fructificación se produzca fuera de los picos de calor.
- Utilice Kc por etapa y ajuste por sistema (Ke bajo en goteo).
- Mantenga la humedad estable para evitar la BER; calibre N-K-Ca.
- Ventile/sombreé en protegido y adopte una poda/densidad compatibles con la estación.

Cebolla (*Allium cepa*)

Fotoperíodo y clases de adaptación

La cebolla es una planta de días largos para la bulbificación, pero los cultivares se distribuyen en tres clases fotoperiódicas:

- Días cortos (DC): comienzan a formar bulbos con ~ 11 -12 h de luz;
- Intermedios (DI): 12-14 h;
- Días largos (DL): > 14 h.

En Brasil se utilizan principalmente DC y DI, ajustando las fechas de siembra/trasplante para que el inicio de la bulbificación coincida con los días y las temperaturas adecuadas. La exposición prolongada a bajas

temperaturas ($\approx 5-13$ °C durante semanas) puede inducir el espigado (bolting), indeseable para la producción de bulbos comerciales.

Sistema radicular y sensibilidad hídrica

El sistema radicular de la cebolla es raso y poco profundo, con una baja densidad de raíces finas en comparación con otros cultivos, lo que la hace muy sensible a la compactación, el encharcamiento y los déficits puntuales. El riego debe ser de baja lámina y alta frecuencia en suelos ligeros; en el bulking (engrosamiento del bulbo), mantener láminas regulares sin excesos prolongados.

Agua, Kc y etapas críticas

- Necesidad total de agua: con una variación aproximada de 350-650 mm por ciclo, según el clima, el ciclo y el sistema de riego.

- Kc por etapas: los valores de referencia dependen del método y del sistema; en aspersión, el Kc inicial es más alto debido al Ke (evaporación del suelo). En el goteo, Ke se reduce y el Kc efectivo disminuye en la fase inicial; en el bulbing (fase III), Kc vuelve a ser alto.

- Críticas: establecimiento (plántula/semillero), transición vegetativa→bulbo y llenado; los déficits aquí reducen el calibre y la materia seca. El exceso de agua en la maduración perjudica el curado y la sanidad.

Nutrición y calidad: azufre y materia seca

- Azufre (S): clave para el picante (tioosulfatos) y la materia seca. Las dosis adecuadas aumentan los sólidos y afirman los bulbos; las interacciones con el N determinan el picante y la conservación. Evitar el exceso de N tardío, que retrasa la maduración y reduce los sólidos.

- pH y encalado: la cebolla es sensible a la acidez, con un mejor rendimiento en pH 6,0-6,5 y baja saturación por Al^{3+} . En suelos ácidos, realizar el encalado con antelación.

- Micronutrientes: el Zn y el B participan en la división celular y el alargamiento, lo que afecta a la uniformidad de los bulbos y la emisión foliar.

Manejo ecofisiológico

- Elección varietal x latitud/época: alinear la clase fotoperiódica con la ventana local para que el fotoperíodo alcance el umbral cuando la planta ya tenga suficiente masa foliar. La bulbificación precoz (fotoperíodo largo antes de la plena área foliar) produce bulbos pequeños; la tardía alarga el ciclo y expone a riesgos climáticos.

- Riego: turnos frecuentes y uniformes; reducir las láminas y suspender al final para facilitar la curación. En goteo, las líneas dobles por surco mejoran la uniformidad.

- Suelo: evitar capas densas; garantizar la macro y microporosidad para la oxigenación radicular.

Lista de verificación práctica

1. Coloque la clase DC/DI correcta en la latitud/época; evite el espigado.

2. Mantenga turnos cortos y uniformes; atenúe las hojas en la maduración.

3. Garantice S y pH 6,0-6,5; ajuste N para sólidos y conservación.

Ajo (*Allium sativum*)

Fases ecofisiológicas, vernalización y fotoperíodo

El desarrollo del ajo se puede esquematizar en dos grandes etapas:

1. Fase inductiva: requiere un fotoperíodo corto y temperaturas bajas (por ejemplo, preplantación/refrigeración de bulbos) para la diferenciación de bulbillos y la inducción del crecimiento del bulbo;

2. Fase morfogénica: requiere un fotoperíodo más largo y temperaturas moderadas para el crecimiento efectivo de los bulbillos. En regiones subtropicales/tropicales, la vernalización previa a la siembra (0-10 °C durante varias semanas) uniformiza y anticipa el ciclo, reduciendo el pseudobrote y la heterogeneidad.

Agua, Kc y etapas críticas

- Necesidad hídrica: comúnmente 400-850 mm a lo largo del ciclo, variando según el clima y la duración del cultivo. El déficit hídrico tiene un fuerte impacto en el calibre y la uniformidad.

- Kc por etapas: inicial moderado, intermedio alto durante la expansión foliar y el llenado del bulbo, y final bajo en la maduración, cuando se induce el secado de las hojas/capas. El método dual ($K_{cb} + K_e$) es útil para separar la transpiración y la evaporación en los bancales regados por aspersión.

Nutrición y calidad: azufre y compuestos bioactivos

- El S es determinante para la alicina y los tiosulfatos, e influye también en la productividad; el equilibrio con el N y la disponibilidad de micronutrientes (B, Zn) influyen en el vigor y la salud.

- pH del suelo: rango ideal general 5,5-6,5 (con preferencia práctica por 6,0-6,8 en muchos suelos), con encalado recomendado en caso de acidez elevada. Evitar la salinización en la fertirrigación.

- Calidad poscosecha: la maduración fisiológica y el curado adecuados reducen las pérdidas por patógenos y mantienen la integridad de las capas/bulbos.

Manejo ecofisiológico

- Bulbo-semilla: utilizar material libre de virus, de calibre uniforme, con un punto de maduración adecuado y refrigerado según el cultivar y la región.

- Riego: riegos frecuentes y moderados en suelos ligeros; reducir y suspender cerca de la cosecha para facilitar el curado y la calidad del almacenamiento. En fases cálidas y secas, los turnos cortos evitan el estrés foliar y la caída del área fotosintética.

- Suelo: preparación fina, bancales bien drenados y ausencia de compactación; el ajo es sensible al encharcamiento.

Zanahoria (*Daucus carota* subsp. *Sativa*)

Temperatura, vernalización y espigado

La zanahoria es una especie de clima templado, con mejor calidad de raíz cuando el ciclo se produce a temperaturas moderadas. En los cultivares adaptados al verano brasileño (Grupo Brasília), hay una mayor tolerancia al calor, pero las temperaturas elevadas acortan el ciclo y perjudican la coloración y la forma. La exposición a bajas temperaturas seguidas de días largos puede inducir el espigado (indeseable para la producción de raíces). Los cultivares de invierno (grupo Nantes y similares) mantienen una forma y coloración superiores en franjas más frías, pero son más susceptibles al espigado si se siembran fuera de temporada.

Rangos térmicos de referencia

- Germinación/emergencia: 20-30 °C acelera y uniformiza; por debajo de 10-12 °C, la emergencia se retrasa.
- Crecimiento vegetativo: 15-22 °C favorece el área foliar y la acumulación de reservas.
- Engrosamiento de la raíz: 15-21 °C optimizan la calidad (color/carotenoides) y reducen las deformaciones; > 30 °C acortan el ciclo y empeoran la calidad.

Relaciones hídricas, Kc y calidad de la raíz

Riego: generalmente por aspersión (convencional o pivote), pero el goteo está creciendo porque permite láminas más pequeñas y reduce las enfermedades foliares. Los turnos cortos en suelos arenosos evitan el estrés hídrico transitorio que causa grietas y deformaciones.

Kc: en condiciones tropicales/subtropicales, los valores de referencia por fase indican un Kc inicial moderado ($\approx 0,45-0,50$), intermedio elevado ($\approx 1,3$) y final cercano a 1,0. Es necesario realizar ajustes en función de la densidad, la cobertura del suelo y la frecuencia de riego.

Calidad: el manejo de la lámina al final del ciclo influye en los sólidos solubles; el riego excesivo reduce los azúcares y puede aumentar el descarte por defectos (hombro verde, grietas y falta de uniformidad).

Nutrición y trastornos

Boro y calcio: las carencias favorecen las grietas y los trastornos de la pared celular. Evitar un pH excesivamente alto por un encalado excesivo; aplicar B en la dosis y el momento recomendados, preferiblemente antes de la siembra o mediante fertirrigación.

Micronutrientes: el Zn y el Mn sostienen el metabolismo enzimático y la coloración; las carencias leves reducen el vigor y la uniformidad.

pH y suelo: ideal 6,0-6,5; la falta de uniformidad de la estructura (terrones, compactación) y las capas densas generan raíces bifurcadas y tortuosas. Son preferibles las texturas francas a ligeras, profundas y bien drenadas.

Manejo ecofisiológico

Época: posicionar las siembras para que la fase de engrosamiento de la raíz se produzca a temperaturas moderadas; en veranos muy calurosos, adoptar variedades de verano y sombreado ligero cuando sea necesario.

Densidad: los espaciamientos finos y el aclareo temprano establecen una población uniforme, evitando la competencia y las raíces finas.

Salud: la aireación del dosel y los turnos de riego que evitan el mojado nocturno de las hojas reducen la quemadura de las hojas.

REFERENCIAS

- 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.

