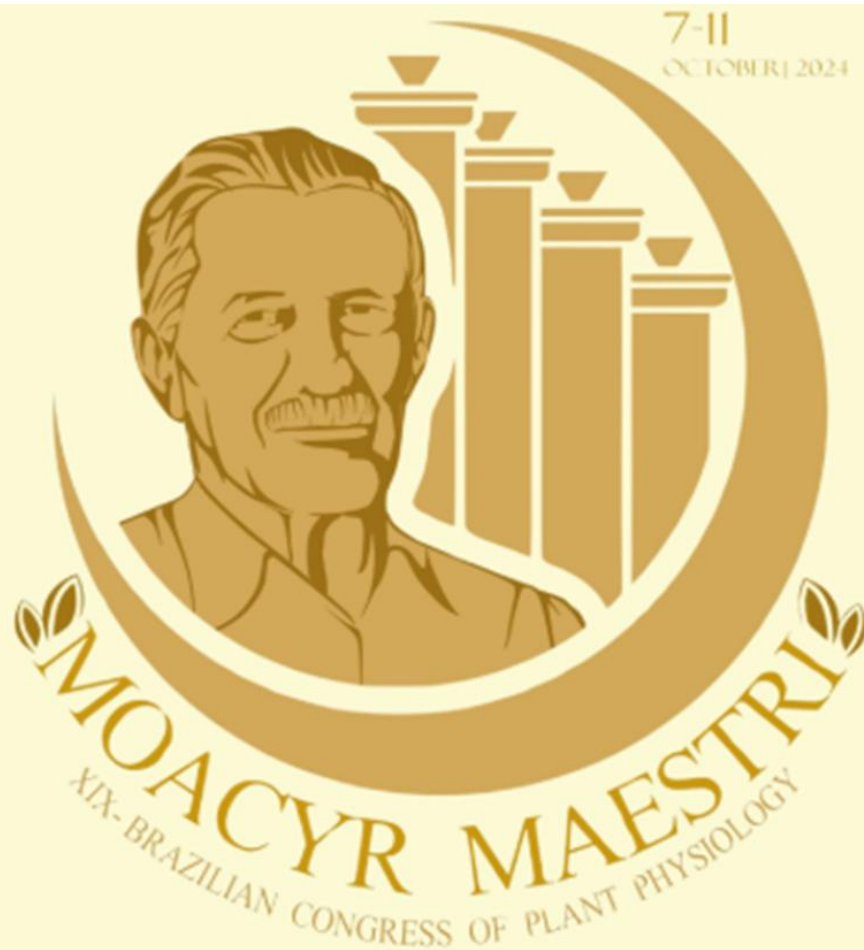




1er Simposio Colombo - Brasileño

Ecofisiología del Café

Avances científicos e innovaciones para enfrentar los desafíos actuales y futuros en los agrosistemas



Natural de Santa Teresa, Espírito Santo, Moacyr Maestri nasceu em 1925. Formou-se em Agronomia em 1948, pela Universidade Rural do Estado de Minas Gerais. Após trabalhar por três anos em seu estado natal, retorna à Instituição a convite do professor Paulo Alvim, falecido na última sexta-feira. Conclui o mestrado em 1957 e o Ph. D. em 1967, ambos na Universidade da Califórnia em Davis.

Após o treinamento não evita esforços na criação do primeiro curso de mestrado em Fisiologia Vegetal no Brasil, iniciado em 1969, no qual por muitos anos lecionou. A esse curso, a Capes tem sempre atribuído conceito A. Posteriormente, empenha-se na criação do primeiro doutorado em Fisiologia Vegetal no País, o que se concretiza em 1988.

Organizan



Apoyan





1er Simposio Colombo - Brasileño

Ecofisiología del Café

Avances científicos e innovaciones para enfrentar los desafíos actuales y futuros en los agrosistemas



Prof. Fábio DaMatta, referencia mundial na área da Fisiologia Vegetal. O professor Fábio, tem desenvolvido pesquisas fundamentais sobre os mecanismos de tolerância das plantas ao estresse ambiental, com foco no cafeeiro. Seus estudos têm contribuído para aumentar a produtividade, sustentabilidade e resiliência da cultura frente às mudanças climáticas.

Organizan



Apoyan





Variaciones diurnas de la irradiancia en el campo: ¿fútiles o benéficas para la eficiencia funcional de clones de *Coffea canephora*?

Nelson Rodríguez López

MSc. DSc. en Fisiología Vegetal
Profesor asociado, Escuela de Biología
Universidad Industrial de Santander
fisionel@uis.edu.co

1er Simposio Colombo - Brasileño

Ecofisiología del Café

Avances científicos e innovaciones para enfrentar los desafíos actuales y futuros en los agrosistemas

Organizan



Apoyan





1er Simposio Colombo - Brasileño

Ecofisiología del Café

Avances científicos e innovaciones para enfrentar los desafíos actuales y futuros en los agrosistemas



Physiologia Plantarum

Original Article

Physiological and biochemical abilities of robusta coffee leaves for acclimation to cope with temporal changes in light availability

[Nelson F. Rodríguez-López](#), [Paulo C. Cavatte](#), [Paulo E. M. Silva](#), [Samuel C. V. Martins](#), [Leandro E. Morais](#), [Eduardo F. Medina](#), [Fábio M. DaMatta](#) ✉



Organizan



Apoyan





Café Robusta:

Aclimatación, Sombra y Rendimiento Fisiológico



NotebookLM



Entre las 100 especies que conforman el género *Coffea*, solo *C. arabica* y *C. canephora* (café robusta) tienen importancia económica a escala mundial. Aunque estas especies se originaron en hábitats sombreados, han sido cultivadas en sistemas a pleno sol en numerosos países tropicales (DaMatta, 2004).

En la actualidad, existe un creciente interés por el cultivo de cafetos en SAFs asociados con árboles de sombra, debido principalmente a los múltiples beneficios que ofrecen tales como el incremento de la biodiversidad, una mayor estabilidad de la producción de café y beneficios económicos adicionales.

En el caso del **café robusta (*Coffea canephora*)**, prácticamente se desconoce cómo la disponibilidad de luz influye sobre su ecofisiología. Esto probablemente se debe a que esta especie ha sido cultivada predominantemente en sistemas a pleno sol desde su introducción relativamente reciente (décadas 60's y 70's) en países como Brasil.

¿Importa únicamente la cantidad de luz que reciben las plantas?

Tradicionalmente, los estudios han comparado plantas cultivadas a pleno sol con plantas desarrolladas bajo sombra fija o en sistemas agroforestales con distintos niveles de cobertura. Sin embargo, la radiación fotosintéticamente activa (PAR) que recibe una hoja varía espacialmente dentro del dosel y también cambia a lo largo del día

Aún cuando dos plantas reciben la misma cantidad total de PAR, la distribución temporal de esa radiación puede inducir respuestas fisiológicas muy diferentes.





El cultivo de café en condiciones tropicales enfrenta radiaciones excesivas y picos térmicos que pueden limitar la fotosíntesis y la productividad foliar.





¿Importa únicamente la cantidad de luz que reciben las plantas?

Hasta donde sabemos, se han realizado muy pocos —o incluso ningún— estudios en condiciones de campo que evalúen los efectos de la **distribución temporal de las fluctuaciones diurnas en la disponibilidad de luz** sobre especies de interés agrícola.

La mayoría de los estudios comparan sombra y pleno sol utilizando únicamente la cantidad de radiación

Sin embargo, este trabajo plantea una pregunta diferente:
¿Las plantas que reciben cantidades similares de luz, pero en momentos distintos del día, responden de la misma manera?



Se planteó la siguiente hipótesis:

“las hojas sometidas a diferentes regímenes de disponibilidad de luz a lo largo del día ajustan tanto sus características morfológicas como fisiológicas con el fin de optimizar su desempeño fotosintético, de acuerdo con la escala temporal de las variaciones diurnas de la radiación incidente.

Para probar esa hipótesis, diseñamos un experimento utilizando clones de ***C. canephora***) establecidos en un sistema agroforestal con árboles de sombra, de tal manera que fue posible comparar cafetos que permanecían predominantemente sombreados durante la mañana con otros que permanecían mayormente sombreados durante la tarde, confrontando ambos tratamientos con plantas expuestas a plena radiación solar durante todo el día.

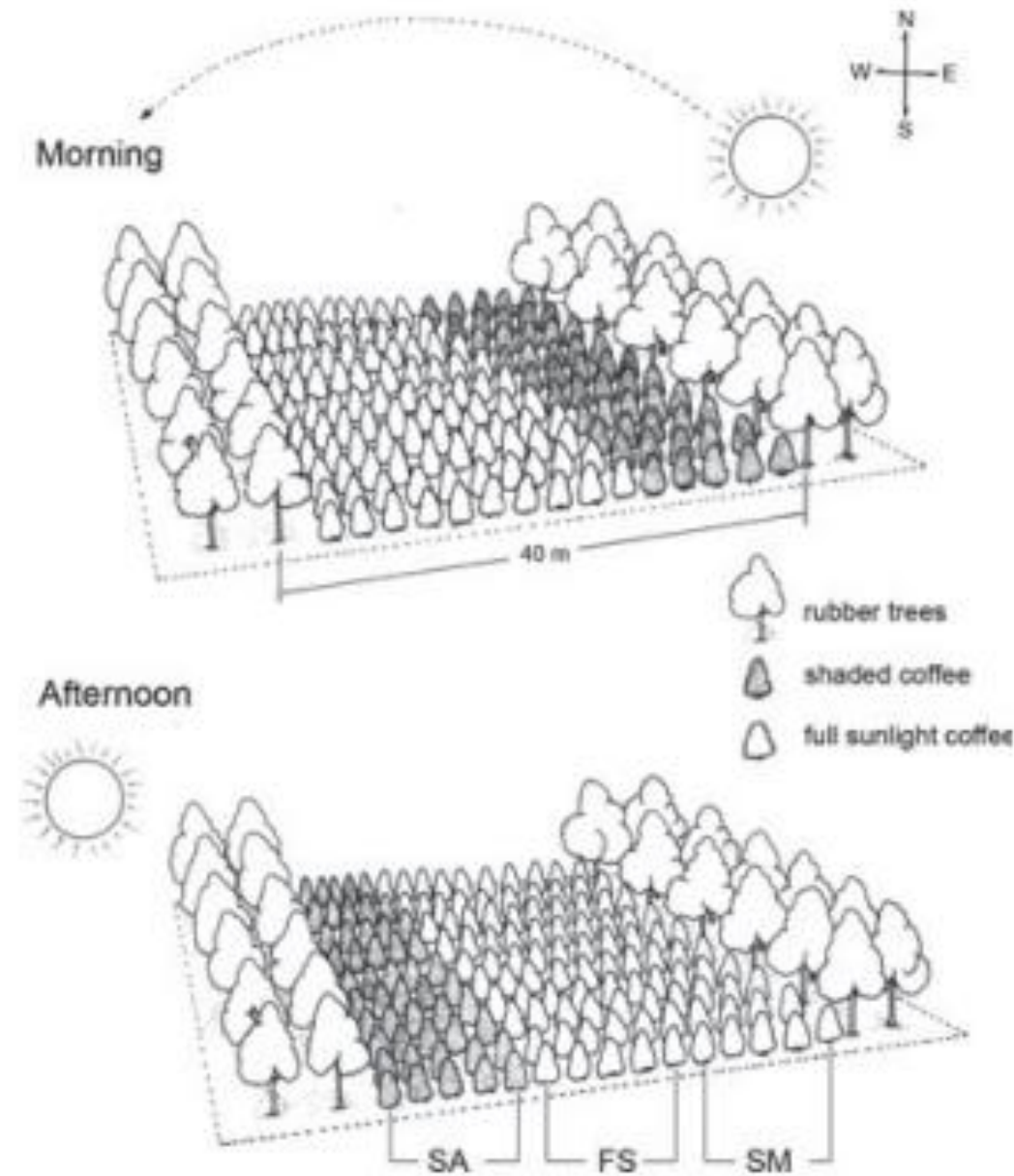
Objetivo:

Evaluar la capacidad fisiológica y bioquímica de los arbustos de los cafetos para responder a las variaciones temporales en la disponibilidad de luz.

Específicamente, se analizaron la ganancia de carbono, la expresión del sistema antioxidante, así como la composición química de las hojas y sus costos de construcción y mantenimiento, bajo condiciones reales de una plantación, empleando dos clones de café robusta con tasas fotosintéticas contrastantes.



Representación esquemática de un sistema de **cultivo en callejones (Alley cropping)**, compuesto por hileras de árboles de caucho orientadas en dirección Norte-Sur (dos líneas de árboles por hilera; las hileras de árboles estaban separadas entre sí por 40 m), con áreas abiertas (callejones de 40 m de ancho) destinadas al cultivo de arbustos de café establecidos en hileras orientadas de Este a Oeste.



Se establecieron tres tratamientos de luz, definidos de la siguiente manera:

SM: arbustos ubicados frente a las hileras orientadas de Este a Oeste, que permanecían sombreados durante la mañana y expuestos a pleno sol por la tarde.

FS: plantas localizadas en el centro del callejón, que recibían plena radiación solar durante la mayor parte del día.

SA: arbustos ubicados frente a las hileras orientadas de Norte a Sur, que permanecían expuestos a pleno sol durante la mañana y sombreados por la tarde.

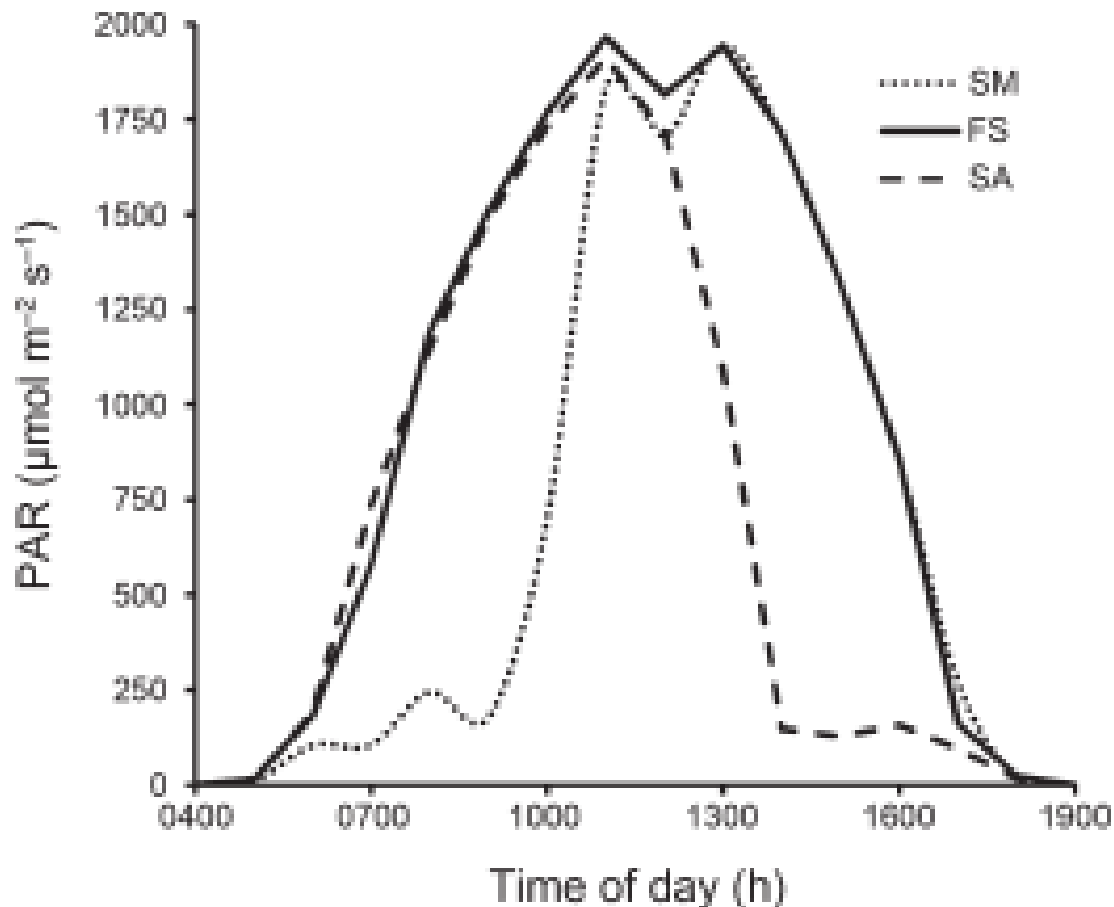
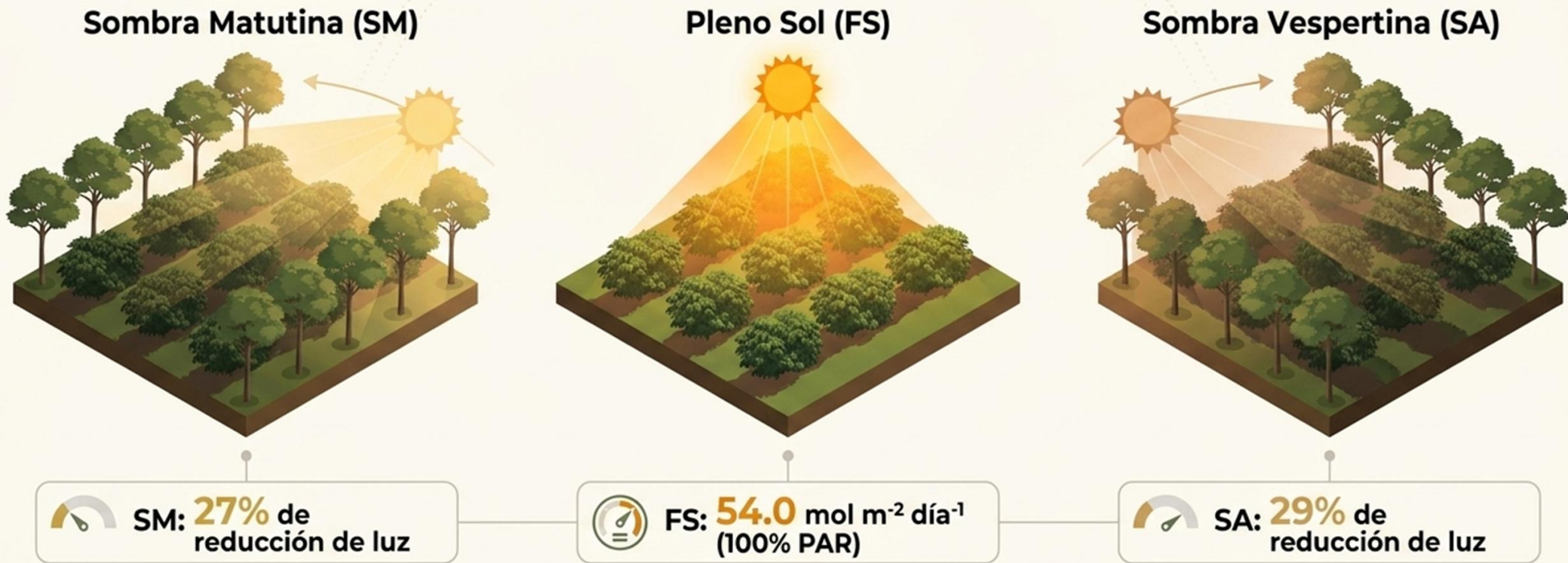


Figura 2. Variación temporal de la **radiación fotosintéticamente activa (RFA o PAR, por sus siglas en inglés)** incidente sobre el dosel de los cafetos. Se establecieron tres tratamientos de radiación fotosintéticamente activa (PAR), definidos de la siguiente manera:

- SM:** cafetos sombreados durante la mañana y expuestos a pleno sol por la tarde.
- FS:** cafetos expuestos a plena radiación solar durante la mayor parte del día.
- SA:** cafetos expuestos a pleno sol durante la mañana y sombreados por la tarde.

El Paradigma Temporal de la Sombra



NotebookLM



Comparativa de Parámetros Fotosintéticos

Parámetro Fisiológico	Sombra Mañana (SM)	Sombra Tarde (SA)	Sol Pleno (FS)
Limitación Principal de CO ₂	Baja / Balanceada	Estomática (por DPV alto)	Bioquímica (V _{cmax} / J _{max})
Conductancia Estomática (g _s)	Alta (~160 mmol m ⁻² s ⁻¹)	Moderada (~80 mmol m ⁻² s ⁻¹)	Baja (~96 mmol m ⁻² s ⁻¹)
Eficiencia Cuántica (F _v /F _m)	0.82 – 0.83 (Sin daño)	0.80 – 0.82 (Sin daño)	0.77 – 0.81 (Estrés transitorio)
Área Foliar Específica (SLA)	Alta (~12.5 m ² kg ⁻¹)	Alta (~12.8 m ² kg ⁻¹)	Baja (~11.6 m ² kg ⁻¹)



Microclima Foliar y Estrés Térmico



Atenuación del Estrés Térmico

La sombra proporcionada por árboles del caucho (*Hevea brasiliensis*) amortiguó significativamente las temperaturas extremas:

Reducción Térmica: La sombra redujo la temperatura foliar (T_L) en hasta **5.7 °C** respecto al sol pleno.

Menor DPV: El déficit de presión de vapor disminuyó hasta un **48%** en parcelas sombreadas.

Picos Críticos en FS: Las plantas bajo FS alcanzaron T_L de hasta 42.8 °C y DPV de 5.9 kPa al mediodía.



Table 1. The air (T_A ; °C) and leaf (T_L ; °C) temperatures, leaf-to-air vapor pressure deficit (VPD; kPa), net CO₂ assimilation rate (A ; $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), stomatal conductance (g_s ; $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), transpiration rate (E ; $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), internal-to-ambient CO₂ concentration ratio (C_i/C_a ; $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ air}$) and variable-to-maximum Chl fluorescence ratio (F_v/F_m), as measured in three time points at approximately 08:00–10:00 h, 11:00–13:00 h and 14:00–16:00 h in two clones of robusta coffee subjected to three light treatments, defined as follows: clones shaded in the morning and exposed to full sunlight in the afternoon (SM); clones receiving full sunlight during most of the day (FS); and clones exposed to full sunlight during the morning and shaded in the afternoon (SA). Within each clone, capital letters denote significant differences among light treatments; within each light treatment, small letters denote significant differences between clones ($P \leq 0.05$, Newman–Keuls’ and t -tests). $n = 6 \pm \text{SE}$.

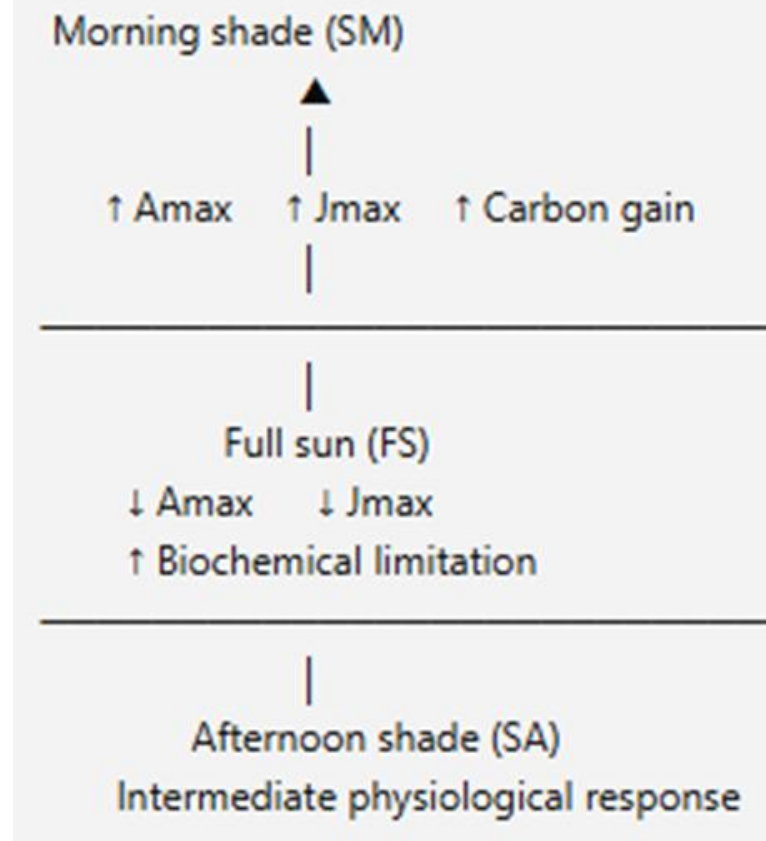
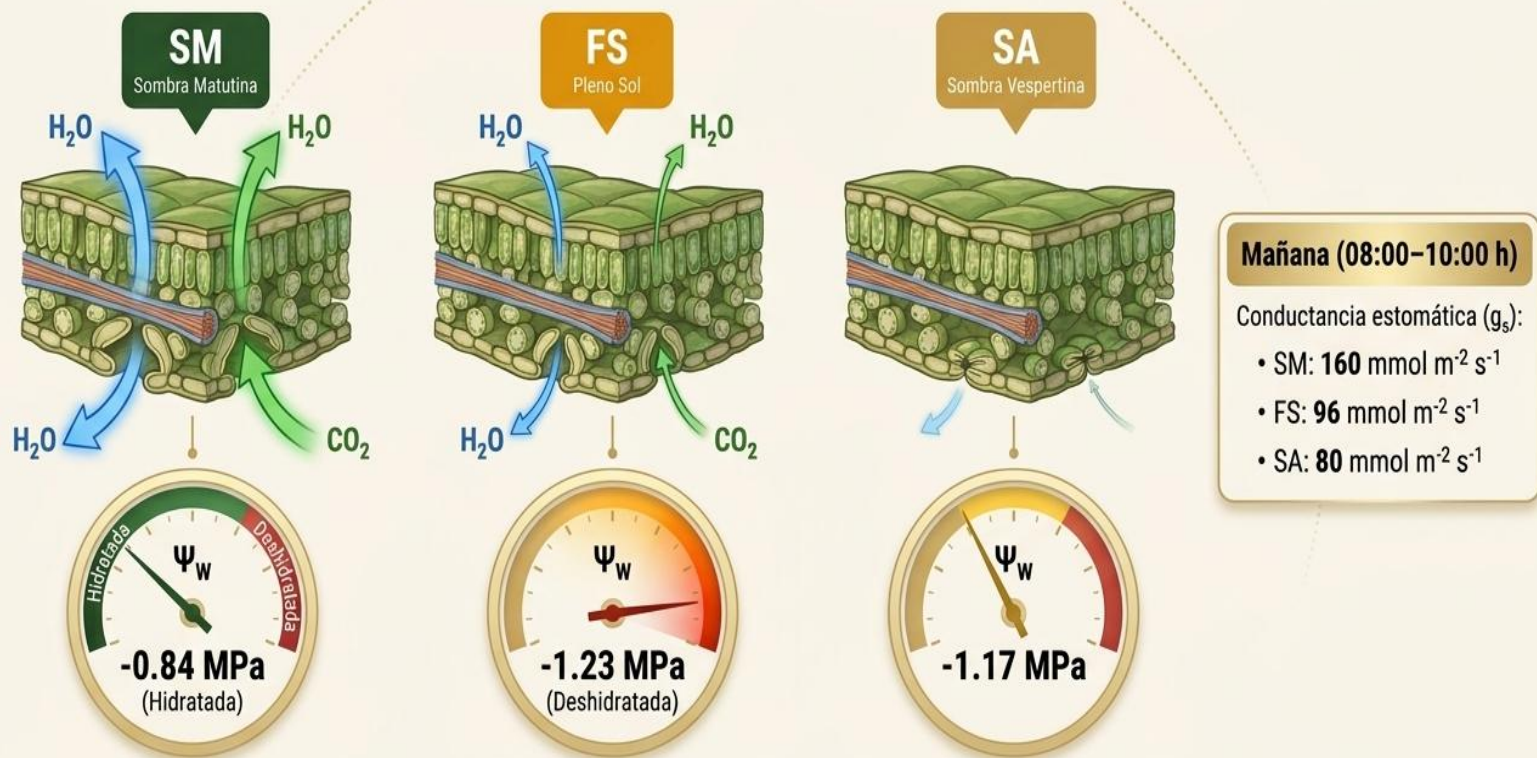
Parameters	Clone 03			Clone 120		
	SM	FS	SA	SM	FS	SA
08:00–10:00 h						
T_A	35.4 ± 0.6 ^{Ba}	37.4 ± 0.8 ^{Aa}	38.5 ± 0.1 ^{Aa}	35.4 ± 0.6 ^{Ba}	37.4 ± 0.8 ^{Aa}	38.5 ± 0.1 ^{Aa}
T_L	33.9 ± 0.5 ^{Cb}	37.8 ± 0.5 ^{Cb}	39.6 ± 0.1 ^{Aa}	35.5 ± 0.4 ^{Ba}	39.6 ± 0.3 ^{Aa}	39.9 ± 0.1 ^{Aa}
VPD	2.1 ± 0.2 ^{Cb}	3.4 ± 0.2 ^{Bb}	4.0 ± 0.0 ^{Aa}	2.9 ± 0.2 ^{Ba}	4.2 ± 0.1 ^{Aa}	4.2 ± 0.1 ^{Aa}
A	6.3 ± 0.1 ^{Aa}	6.1 ± 0.1 ^{Aa}	5.8 ± 0.2 ^{Aa}	5.2 ± 0.2 ^{Ab}	2.9 ± 0.1 ^{Cb}	3.7 ± 0.1 ^{Bb}
g_s	160 ± 8 ^{Aa}	96 ± 3 ^{Ba}	80 ± 4 ^{Ba}	122 ± 13 ^{Ab}	40 ± 2 ^{Bb}	52 ± 3 ^{Bb}
E	3.5 ± 0.2 ^{Aa}	3.3 ± 0.2 ^{Aa}	3.2 ± 0.1 ^{Aa}	2.9 ± 0.0 ^{Aa}	1.7 ± 0.0 ^{Cb}	2.3 ± 0.1 ^{Bb}
C_i/C_a	0.77 ± 0.01 ^{Aa}	0.66 ± 0.01 ^{Ba}	0.62 ± 0.01 ^{Ba}	0.74 ± 0.01 ^{Aa}	0.63 ± 0.01 ^{Ba}	0.63 ± 0.01 ^{Ba}
F_v/F_m	0.83 ± 0.00 ^{Aa}	0.81 ± 0.01 ^{Aa}	0.80 ± 0.01 ^{Ba}	0.81 ± 0.01 ^{Aa}	0.77 ± 0.02 ^{Aa}	0.80 ± 0.01 ^{Aa}
11:00–13:00 h						
T_A	37.9 ± 0.1 ^{Ca}	40.4 ± 0.1 ^{Aa}	39.6 ± 0.1 ^{Ba}	37.9 ± 0.1 ^{Ca}	40.4 ± 0.1 ^{Aa}	39.6 ± 0.1 ^{Ba}
T_L	39.9 ± 0.2 ^{Ba}	41.6 ± 0.1 ^{Ab}	38.8 ± 0.1 ^{Cb}	38.9 ± 0.2 ^{Cb}	42.8 ± 0.3 ^{Aa}	40.7 ± 0.2 ^{Ba}
VPD	4.5 ± 0.1 ^{Ba}	5.3 ± 0.0 ^{Ab}	4.5 ± 0.0 ^{Bb}	4.2 ± 0.2 ^{Ca}	5.9 ± 0.1 ^{Aa}	5.0 ± 0.1 ^{Ba}
A	5.2 ± 0.1 ^{Aa}	2.5 ± 0.2 ^{Ba}	1.7 ± 0.1 ^{Cb}	4.9 ± 0.9 ^{Aa}	1.9 ± 0.1 ^{Cb}	3.0 ± 0.2 ^{Ba}
g_s	65 ± 2 ^{Aa}	31 ± 2 ^{Ba}	19 ± 1 ^{Cb}	63 ± 5 ^{Aa}	24 ± 1 ^{Cb}	37 ± 2 ^{Ba}
E	2.9 ± 0.0 ^{Aa}	1.7 ± 0.5 ^{Ba}	0.9 ± 0.0 ^{Cb}	2.6 ± 0.1 ^{Ab}	1.6 ± 0.1 ^{Ba}	1.8 ± 0.1 ^{Ba}
C_i/C_a	0.59 ± 0.01 ^{Aa}	0.59 ± 0.00 ^{Aa}	0.56 ± 0.01 ^{Ab}	0.61 ± 0.00 ^{Aa}	0.61 ± 0.01 ^{Aa}	0.61 ± 0.01 ^{Aa}
F_v/F_m	0.82 ± 0.00 ^{Aa}	0.81 ± 0.00 ^{Aa}	0.82 ± 0.00 ^{Aa}	0.82 ± 0.00 ^{Aa}	0.79 ± 0.01 ^{Ba}	0.82 ± 0.00 ^{Aa}
14:00–16:00 h						
T_A	35.8 ± 0.5 ^{Cb}	34.3 ± 0.4 ^{Cb}	32.5 ± 0.4 ^{Aa}	35.8 ± 0.5 ^{Cb}	34.3 ± 0.4 ^{Cb}	32.5 ± 0.4 ^{Aa}
T_L	37.4 ± 0.6 ^{Aa}	36.1 ± 0.4 ^{Ab}	32.1 ± 0.0 ^{Bb}	37.4 ± 0.0 ^{Aa}	34.6 ± 0.8 ^{Bb}	33.3 ± 0.0 ^{Ca}
VPD	4.1 ± 0.2 ^{Aa}	3.6 ± 0.1 ^{Ba}	2.4 ± 0.0 ^{Ca}	4.0 ± 0.0 ^{Aa}	3.2 ± 0.3 ^{Ba}	2.7 ± 0.0 ^{Ca}
A	1.4 ± 0.2 ^{Aa}	1.0 ± 0.1 ^{Aa}	0.5 ± 0.1 ^{Ba}	1.5 ± 0.6 ^{Aa}	0.9 ± 0.1 ^{Ba}	0.8 ± 0.1 ^{Ba}
g_s	16 ± 1.9 ^{Aa}	16 ± 0.0 ^{Aa}	8 ± 0.7 ^{Bb}	22 ± 0.1 ^{Aa}	17 ± 0.2 ^{Ba}	12 ± 0.2 ^{Ca}
E	0.8 ± 0.1 ^{Aa}	0.6 ± 0.1 ^{Aa}	0.2 ± 0.0 ^{Ba}	0.9 ± 0.1 ^{Aa}	0.6 ± 0.1 ^{Ba}	0.3 ± 0.0 ^{Ca}
C_i/C_a	0.78 ± 0.10 ^{Aa}	0.69 ± 0.01 ^{Aa}	0.70 ± 0.01 ^{Aa}	0.81 ± 0.06 ^{Aa}	0.71 ± 0.01 ^{Aa}	0.68 ± 0.01 ^{Aa}
F_v/F_m	0.79 ± 0.03 ^{Aa}	0.76 ± 0.02 ^{Aa}	0.81 ± 0.01 ^{Aa}	0.79 ± 0.05 ^{Aa}	0.79 ± 0.01 ^{Aa}	0.81 ± 0.01 ^{Aa}



Intercambio gaseoso y fluorescencia de la clorofila a lo largo del día



Dinámica de Intercambio Gaseoso y Potencial Hídrico

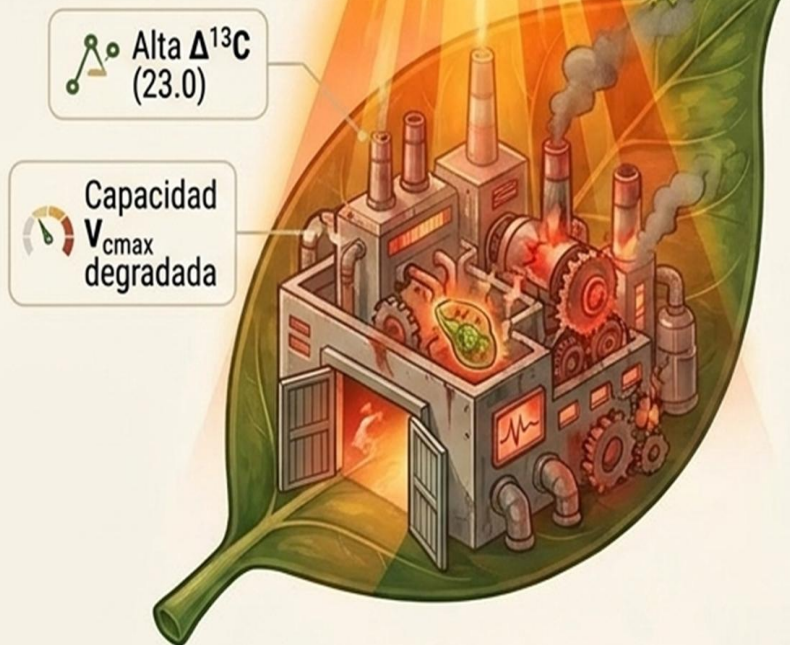


La sombra matutina mitiga el déficit de presión de vapor (VPD), permitiendo una apertura estomática prolongada y maximizando la ganancia de carbono.

NotebookLM

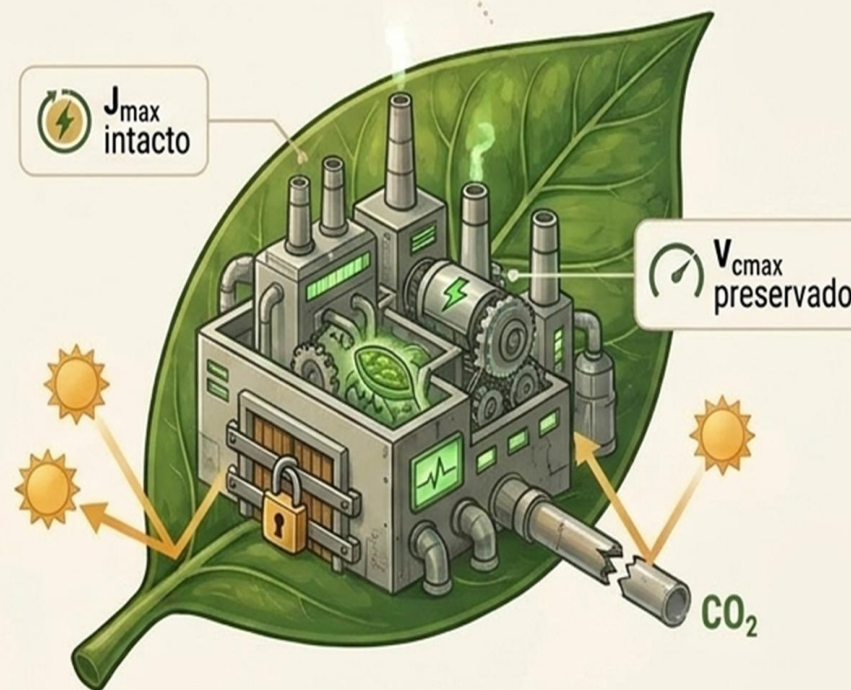
Cuellos de Botella en la Asimilación de Carbono

FS: Limitación Bioquímica



Exceso de luz degrada la capacidad del cloroplasto.

SA: Limitación Estomática



La exposición solar matutina fuerza un cierre estomático prematuro.

Mientras que FS falla por daño en la maquinaria interna, SA falla porque cierra sus puertas al CO_2 demasiado temprano.

NotebookLM

El Costo Metabólico del Pleno Sol: El Escudo Antioxidante

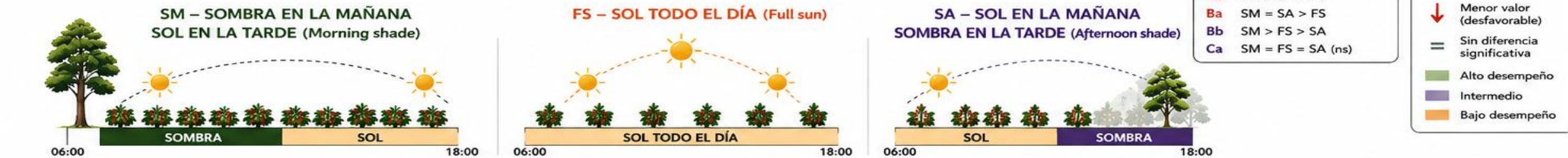


El escudo funciona, pero a un **precio extremo**. Las plantas a pleno sol (FS) invierten una cantidad **masiva de energía metabólica** regulando al alza las enzimas para sobrevivir al estrés fotooxidativo. SM y SA requieren activación mínima.

NotebookLM

La distribución temporal de la radiación solar optimiza el desempeño ecofisiológico del café robusta (*Coffea canephora*) en sistemas agroforestales

Comparación de tres patrones diarios de radiación solar



MEJOR DESEMPEÑO ECOFISIOLÓGICO				
PARÁMETRO (unidad)	CLON 03		CLON 120	
LCP (μmol fotones m ⁻² s ⁻¹)	10.7 ± 0.3	Cb	18.7 ± 1.8	Ab ↑
LSP (μmol fotones m ⁻² s ⁻¹)	599 ± 52	Aa	552 ± 47	Aa =
R _d (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	1.0 ± 0.1	Ba	1.3 ± 0.2	Aa ↑
A _{max} (área) (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	10.7 ± 0.3	Ab	9.2 ± 0.5	Ab =
A _{max} (masa) (μmol CO ₂ g ⁻¹ MS s ⁻¹)	138 ± 6	Aa	103 ± 4	Aa =
J _{max} (μmol e ⁻ m ⁻² s ⁻¹)	73.3 ± 7.4	Bb	100 ± 4	Aa ↑
V _{cmax} (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	81.3 ± 11.7	Ab	109 ± 6	Aa ↑
✓ Mayor A_{max} (área y masa) ✓ Mayor J_{max} y V_{cmax} ✓ Menor respiración en la oscuridad (Clon 03) ✓ Mayor ganancia diaria de carbono ✓ Mejor estado hídrico y apertura estomática Estrategia óptima: Mayor eficiencia en uso agua y carbono				

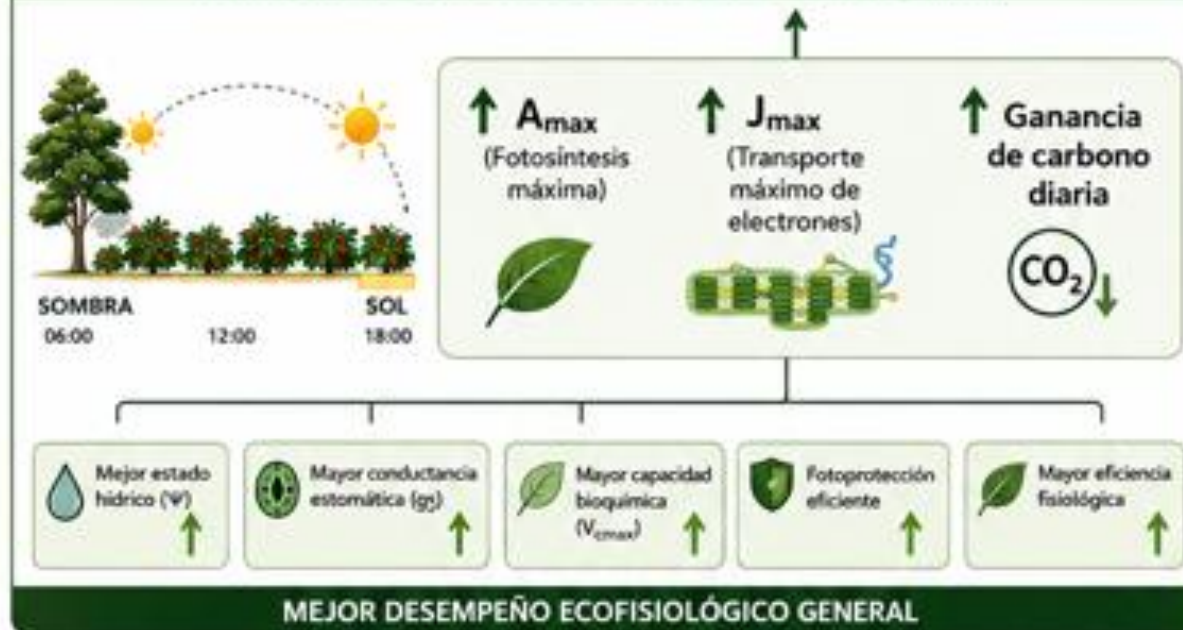
DESEMPEÑO FISIOLÓGICO MÁS BAJO				
PARÁMETRO (unidad)	CLON 03		CLON 120	
LCP (μmol fotones m ⁻² s ⁻¹)	27.6 ± 0.3	Aa	24.8 ± 1.5	Aa ↓
LSP (μmol fotones m ⁻² s ⁻¹)	567 ± 45	Aa	560 ± 15	Aa ↓
R _d (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	1.4 ± 0.2	Aa	1.6 ± 0.1	Aa ↓
A _{max} (área) (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	7.2 ± 0.2	Cb	7.0 ± 0.5	Bb ↓
A _{max} (masa) (μmol CO ₂ g ⁻¹ MS s ⁻¹)	85 ± 3	Ca	76 ± 6	Ba ↓
J _{max} (μmol e ⁻ m ⁻² s ⁻¹)	72.1 ± 8.5	Bb	76.3 ± 8.9	Ba ↓
V _{cmax} (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	89.6 ± 2.9	Aa	79.1 ± 4.4	Ba ↓
• Mayor carga lumínica y térmica • Mayor déficit de presión de vapor • Mayor respiración en la oscuridad (Clon 03) • Menores A_{max}, J_{max} y V_{cmax} • Limitación bioquímica predominante • Mayor necesidad de fotoprotección Estrategia de estrés: Menor eficiencia fisiológica y mayor costo energético				

SA – SOL EN LA MAÑANA SOMBRA EN LA TARDE (Afternoon shade)				
PARÁMETRO (unidad)	RESPUESTA FISIOLÓGICA INTERMEDIA			
LCP (μmol fotones m ⁻² s ⁻¹)	20.7 ± 0.3	Ba	20.7 ± 1.2	Aa ↑
LSP (μmol fotones m ⁻² s ⁻¹)	660 ± 29	Aa	582 ± 44	Aa =
R _d (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	1.4 ± 0.2	Aa	1.4 ± 0.1	Aa =
A _{max} (área) (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	8.8 ± 0.1	Ba	7.8 ± 0.1	Bb ↑
A _{max} (masa) (μmol CO ₂ g ⁻¹ MS s ⁻¹)	110 ± 5	Ba	100 ± 4	Aa ↓ ↑
J _{max} (μmol e ⁻ m ⁻² s ⁻¹)	102 ± 6	Aa	100 ± 8	Aa ↓ ↑
V _{cmax} (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	91.0 ± 4.8	Aa	98.0 ± 3.7	Aa ↓ ↑
• Valores intermedios en la mayoría de parámetros • Beneficios en algunos rasgos (ej. J_{max} en Clon 03) • Mitigación parcial del estrés de la tarde • Estrategia de compromiso fisiológico Respuesta intermedia: Compromiso entre producción y protección				



Valores expresados como media ± EE (n = 5–6). Diferentes letras en una misma fila indican diferencias significativas entre tratamientos para cada clon según la prueba de Tukey ($P < 0.05$). ns: no significativo.

SOMBRA EN LA MAÑANA – SOL EN LA TARDE (SM)



SOL EN LA MAÑANA – SOMBRA EN LA TARDE (SA)



MENSAJE CLAVE



El momento del día en que la planta recibe la luz modifica el microclima foliar y determina ajustes fisiológicos que impactan la fotosíntesis y la ganancia de carbono.

LEYENDA

- ↑ Mayor valor (favorable)
- ↓ Menor valor (desfavorable)
- = Sin diferencia significativa
- Mejor desempeño
- Desempeño bajo
- Desempeño intermedio

SOL TODO EL DÍA (FS)



PARÁMETROS EVALUADOS

- A_{max} Fotosíntesis máxima ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
- J_{max} Transporte máximo de electrones ($\mu\text{mol e}^- \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
- R_d Respiración en la oscuridad ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
- V_{cmax} Tasa máxima de carboxilación ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
- LCP Punto de compensación lumínica
- LSP Punto de saturación lumínica



Eficiencia en Uso de Recursos





Costos Energéticos de Hojas

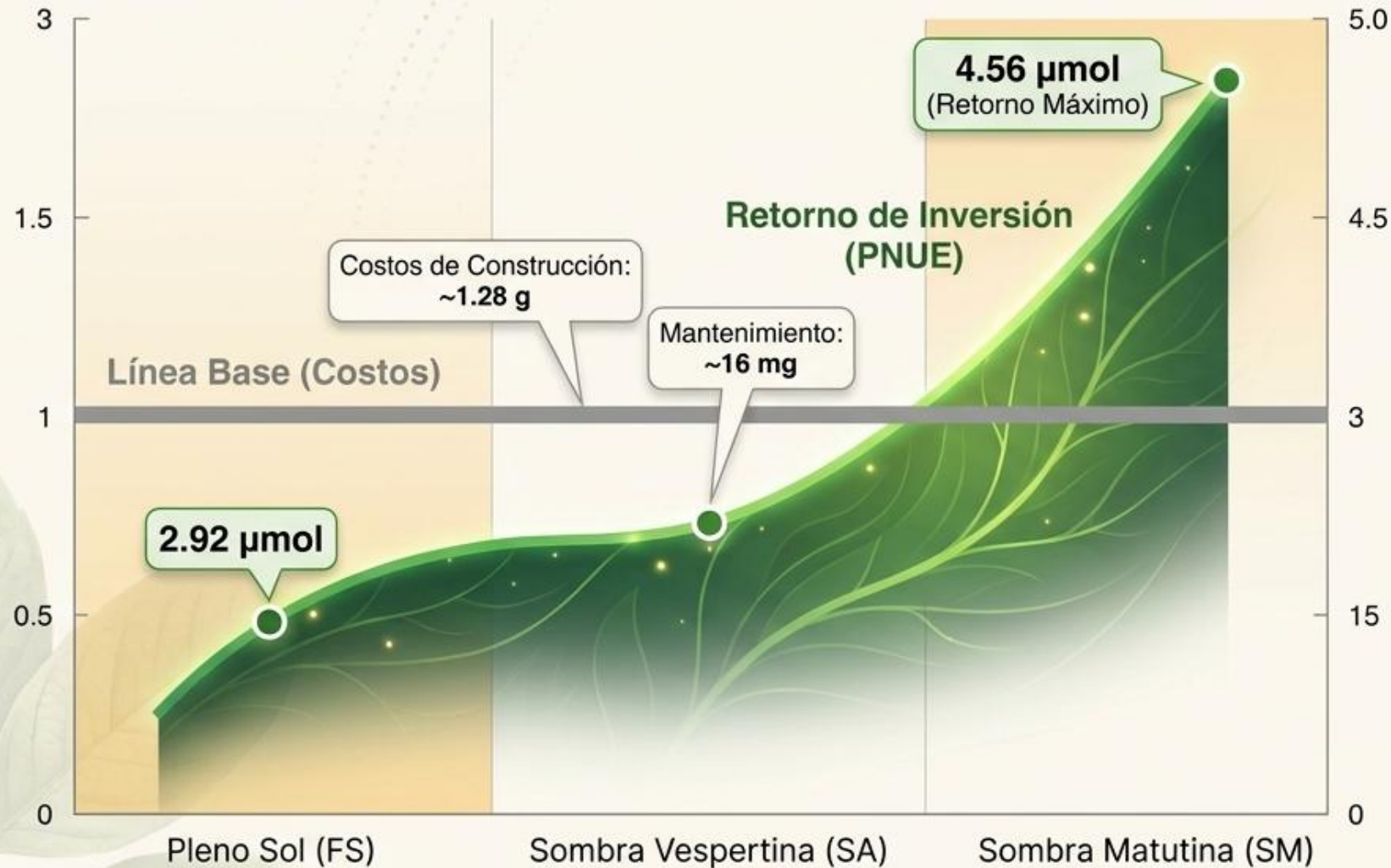
Costos de Construcción (CC): La cantidad de glucosa requerida para construir 1 g de biomasa foliar no varió significativamente entre tratamientos de luz ($\sim 1.35\text{-}1.40$ g glucosa g^{-1} MS).

Costos de Mantenimiento (MC): La energía requerida para mantener los procesos foliares no aumentó en plantas sombreadas.

Inversión Eficiente: La aclimatación a la sombra no genera costos estructurales adicionales, maximizando la ganancia neta de carbono.

Composición Química: contenidos de almidón, lípidos y proteínas se mantuvieron en niveles óptimos ajustando solo el espesor foliar.

Economía de la Hoja: Inversión vs. Retorno



Aclimatación a Costo Cero

La adaptación a la sombra no presenta costos adicionales de construcción foliar. Las plantas SM ofrecen un tiempo de **recuperación de carbono** dramáticamente más rápido gracias a su eficiencia superior.

Plasticidad Genética: La Ventaja del Clon 03



Rendimiento Clon 03 bajo SM:

- **+63%** Clorofila
- **+58%** Relación Chl/N
- LCP ultra-bajo (10.7)

No todos los cultivares se adaptan igual. El Clon 03 reconfigura agresivamente su arquitectura de captura de luz, maximizando el rendimiento bajo sombra matutina.

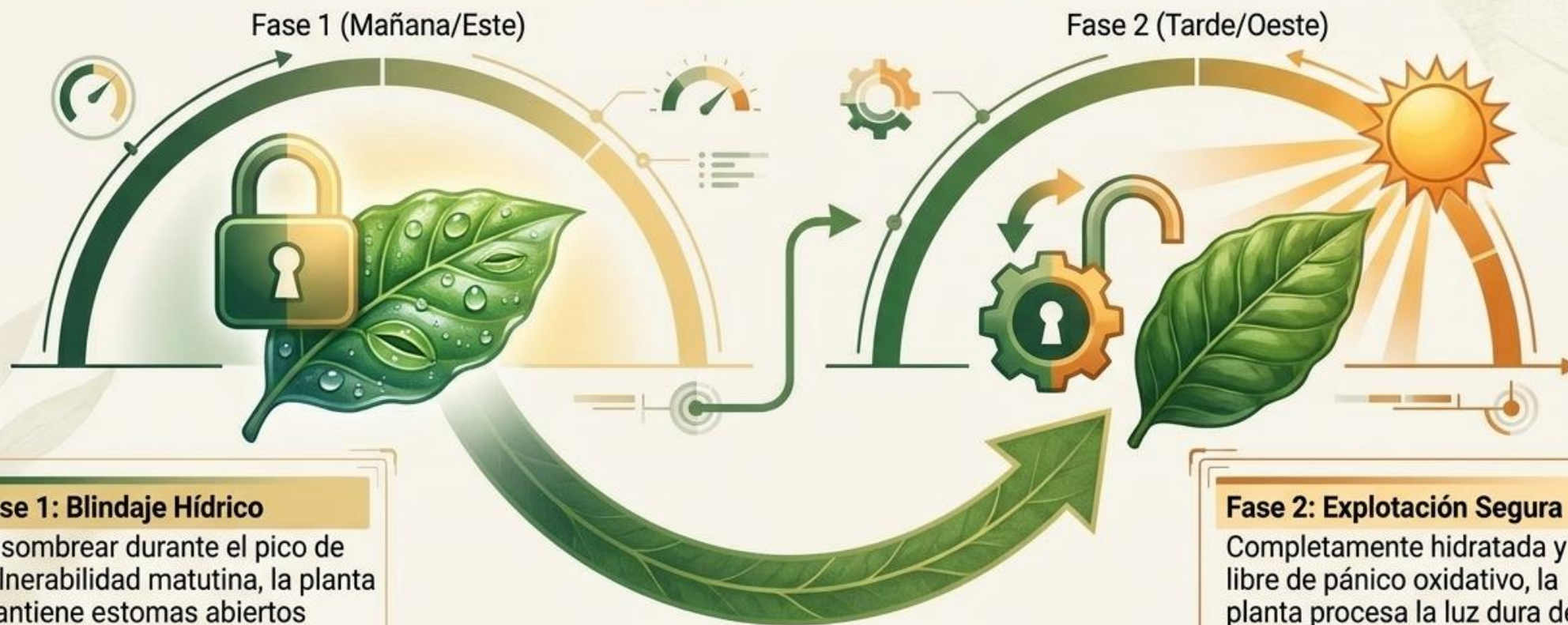
NotebookLM

Matriz Diagnóstica del Rendimiento Fisiológico

	Sombra Matutina (SM)	Sombra Vespertina (SA)	Pleno Sol (FS)
Intercambio Gaseoso (A , g_s)	 Óptimo	 Moderado	 Deficiente
Protección Antioxidante (Costo)	 Bajo Costo	 Bajo Costo	 Estrés Severo
Eficiencia Hídrica (Ψ_w , $\Delta^{13}C$)	 Alta Hidratación	 Variable	 Deshidratación
Eficiencia de Recursos (PNUE)	 Máximo Retorno	 Intermedio	 Baja Eficiencia

La Sombra Matutina domina transversalmente todos los indicadores fisiológicos.

La Sincronización Estratégica: Por Qué Gana la Sombra Matutina



El resultado: Ganancia de carbono superior durante todo el día.



Respuestas a Nivel de Clon

Clon 03 (Vigoroso)

Presentó las mayores tasas fotosintéticas (A) y conductancia estomática (gs). Respondió mejor a las variaciones temporales de radiación.

Clon 120 (Sensible)

Mostró menor desempeño general. Más propenso al cierre estomático prematuro bajo condiciones de alto DPV al mediodía.

Efecto Genotipo × Luz

La plasticidad foliar y la captura de luz dependen del clon, destacando la importancia de la selección genética en agroforestería.



La idea principal que debemos tener en cuenta es:
si el momento (horario del día) en que la planta recibe la luz puede ser tan determinante como la cantidad total de radiación que recibe (durante el día).

La distribución temporal de la radiación solar reorganiza la jerarquía de las limitaciones fotosintéticas en arbustos de *C. canephora*

El sombreado moderado u orquestado temporalmente optimiza la fisiología del café Robusta en ambientes tropicales exigentes



Manejo Agroforestal Estratégico

Paso 2: Selección Clonal

Uso de clones con alta capacidad fotosintética (ej. Clon 03) para mayor rendimiento.

Paso 4: Sostenibilidad

Mayor eficiencia foliar de agua y nitrógeno sin costos energéticos extra.

Paso 1: Orientación

Diseño de hileras agroforestales para optimizar la sombra en horas de alto estrés.

Paso 3: Mitigación

Atenuación de picos de TL y DPV en las horas centrales del día.

Conclusiones para el Diseño Agroforestal



1. Priorice la Sombra Matutina

La sincronización es clave. Reducir la luz por la mañana mejora el rendimiento fisiológico diurno mucho más que la sombra vespertina, mitigando el estrés térmico temprano.



2. Aclimatación a Costo Cero

La adaptación foliar a estos regímenes no requiere energía metabólica extra, permitiendo a la planta destinar sus recursos exclusivamente al crecimiento y producción.



3. Selección Genética Activa

Empareje el diseño del cultivo con genotipos de alta plasticidad (como el Clon 03) para capitalizar económicamente las ventajas del microclima.

El éxito no solo depende de cuánta sombra se proyecta, sino de cuándo ocurre y quién la recibe.



Cenicafé®
Centro Nacional de Investigaciones de Café



cenicafe.org



Cenicafé FNC



@cenicafe



cenicafé



CenicaféFNC



@cenicafefnc