

Respuesta fotosintética del cacao (*Theobroma cacao* L.) frente al estrés térmico asociado con el niño en escenarios de variabilidad climática

Photosynthetic response of Cacao (Theobroma cacao L.) to El Niño Southern-Oscillation associated heat stress under climate variability scenarios

 Mario Fleitas-Díaz¹

 Dalton Guarnizo-Crespo²

 Mayra Cuenca-Zambrano³

 Talhita Benitez-Pardillo⁴

 José Valdivia Fernández-Dávila⁵

mfleitas@itecsur.edu.ec 

- 1.- Instituto Superior Universitario Compu Sur. Quito, Ecuador
- 2.- Universidad Estatal de Milagro. Milagro, Guayas, Ecuador
- 3.- Universidad Estatal Península de Santa Elena. Ecuador
- 4.- Instituto Tecnológico Universitario Libertad. Quito, Ecuador
- 5.- Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo. Huaraz, Perú

Recibido: 20/03/2026 Revisado: 29/04/2026 Aceptado: 10/06/2026 Publicado: 06/07/2026

RESUMEN

La creciente variabilidad climática asociada a fenómenos como El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) representa un riesgo creciente para cultivos tropicales perennes altamente sensibles a la temperatura, como el cacao (*Theobroma cacao* L.). El presente estudio tuvo como objetivo analizar la respuesta fotosintética del cacao frente a la variación térmica asociada con El Niño, relacionando la temperatura ambiental con la actividad fotosintética y el rendimiento del cultivo, para valorar su vulnerabilidad térmica desde un enfoque fisiológico. Metodológicamente, se desarrolló un estudio cuantitativo de carácter analítico basado en la integración de literatura científica y registros climáticos y productivos, organizando la información en tablas y figuras según los rangos térmicos y su correspondencia con la respuesta fotosintética, el fotosistema II y el rendimiento. Los resultados evidenciaron una respuesta no lineal y dependiente del proceso evaluado: la conductancia estomática se favorece entre 20-30 °C, la eficiencia del fotosistema II alcanza su máximo entre 24,1- 25,6 °C, y la asimilación de CO₂ se optimiza entre 30-33 °C, mientras que por encima de 30 °C la vulnerabilidad fisiológica aumenta según la radiación, el déficit de presión de vapor y el genotipo. Se concluye que el riesgo fotosintético asociado con el fenómeno El Niño depende de la coincidencia de múltiples variables ambientales y no de un único umbral térmico.

Palabras clave: Cacao (*Theobroma cacao* L.), fotosíntesis; estrés térmico; fotosistema II, El Niño-Oscilación del Sur (ENOS).



ABSTRACT

The increasing climate variability associated with phenomena such as El Niño-Southern Oscillation (ENSO) represents a growing risk for temperature-sensitive perennial tropical crops such as cacao (*Theobroma cacao* L.). This study aimed to analyze the photosynthetic response of cacao to thermal variation associated with El Niño, relating ambient temperature to photosynthetic activity and crop yield, in order to assess its thermal vulnerability from a physiological approach. Methodologically, a quantitative analytical study was conducted based on the integration of scientific literature and available climatic and productive records, organizing the information into tables and graphs according to reported temperature ranges and their correspondence with photosynthetic response, photosystem II functioning, and yield. Results showed a nonlinear response that varied depending on the physiological process evaluated: stomatal conductance was favored between 20-30 °C, photosystem II efficiency peaked between 24.1-25.6 °C, and CO₂ assimilation was optimized between 30-33 °C, while above 30 °C physiological vulnerability increased depending on radiation, vapor pressure deficit, and genotype. It is concluded that the photosynthetic risk associated with El Niño depends on the coincidence of multiple environmental variables rather than a single thermal threshold.

Keyword: Cacao (*Theobroma cacao* L.), photosynthesis, heat stress, photosystem II, El Niño-Southern Oscillation (ENSO).

INTRODUCCIÓN

La creciente variabilidad de las condiciones ambientales asociada al cambio climático está intensificando los factores negativos que pueden comprometer la productividad de los cultivos tropicales, especialmente frente a las modificaciones proyectadas en la temperatura, la precipitación y la frecuencia de eventos climáticos extremos (Fleitas *et al.*, 2026 y Obahoundje *et al.*, 2026).

Entre los principales fenómenos que explican la variabilidad climática interanual se encuentra El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), el cual es un sistema de interacción entre el océano Pacífico tropical y la atmósfera que consigue modificar los patrones de temperatura y precipitación a escala regional (Botero y Barnes, 2022 y Kamil *et al.*, 2024). Tales modificaciones, adquieren gran importancia en los sistemas agrícolas tropicales, debido a que pueden alterar tanto la disponibilidad de agua como

el régimen térmico de la zona, con lo que condiciona procesos fisiológicos esenciales para el correcto crecimiento, desarrollo y productividad de los cultivos (Tullu y Habtegebreal, 2025 y Gurazada *et al.*, 2026).

En cultivos perennes como el cacao (*Theobroma cacao* L.) este fenómeno presenta particular interés debido a su elevada sensibilidad a las condiciones ambientales y a la estrecha relación existente entre temperatura, disponibilidad de agua, radiación y funcionamiento fotosintético (González *et al.*, 2025). La productividad del cacao depende de la capacidad de las hojas para mantener una adecuada captación y transformación de la energía luminosa, fijación de CO₂ y la producción de fotoasimilados (Ibe *et al.*, 2024; Benjamín *et al.*, 2025 y Da Vitória *et al.*, 2026).

Por tanto, la persistencia de condiciones ambientales desfavorables altera procesos fisiológicos esenciales y reper-

cuten posteriormente sobre la floración, el cuajado, el crecimiento de las mazorcas, la acumulación de biomasa, entre otros, lo que compromete potencialmente el rendimiento final (Benjamín *et al.*, 2025). En el caso de la temperatura, es reconocida como un factor determinante de la fisiología del cacao, debido a su influencia sobre la actividad fotosintética y el balance energético de las hojas (Mateus *et al.*, 2023).

Aunque la especie puede mantener su actividad fotosintética dentro de un intervalo relativamente amplio, su respuesta depende del genotipo, estado hídrico, radiación y capacidad de aclimatación, situándose las condiciones favorables se sitúan aproximadamente entre 20 y 30 °C (Dhamira y Anggrasari 2024). Desde esta óptica fisiológica, las plantas de cacao alcanzan una mayor eficiencia potencial del fotosistema II (aproximadamente entre 24,1 y 25,6 °C) estimada mediante la relación entre la fluorescencia variable (Fv) y la fluorescencia máxima (Fm), lo que representa una condición favorable para el funcionamiento del aparato fotosintético y no un límite de tolerancia del cultivo (Leiva *et al.*, 2024; Stéphane *et al.*, 2026 y Suárez *et al.*, 2026).

A pesar de la evidencia sobre la sensibilidad térmica del cacao, resulta necesario profundizar en la relación entre la variación de la temperatura y el comportamiento de la fotosíntesis, particularmente en condiciones que puedan superar aquellas favorables para el funcionamiento del aparato fotosintético. El escenario climático asociado con El Niño durante la presente etapa proporciona un marco pertinente para examinar esta relación y valorar sus posibles consecuencias sobre el desempeño productivo del cultivo para el próximo año 2027.

El estudio tiene como objetivo analizar la posible respuesta fotosintética del cacao (*Theobroma cacao* L.) frente a la variación térmica asociada con El Niño durante la actual temporada 2026 - 2027, relacionando la temperatura ambiental con la actividad fotosintética y el rendimiento del cultivo, determinando su correspondencia con variaciones productiva que valore la vulnerabilidad térmica del cacao desde el análisis fisiológico.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó un estudio cuantitativo de carácter analítico basado en la integración de información climática, fisiológica y productiva del cacao (*Theobroma cacao* L.). La temperatura se estableció como variable principal de análisis, mientras que la actividad fotosintética, el funcionamiento del fotosistema II y el rendimiento fueron considerados variables de respuesta. La información se obtuvo de literatura científica, registros climáticos y productivos disponibles, priorizando datos cuantitativos comparables entre condiciones térmicas.

Los datos fueron organizados en tablas y figuras según los rangos de temperatura reportados y su correspondiente respuesta fotosintética, comportamiento del fotosistema II y rendimiento. Se analizaron particularmente los intervalos térmicos asociados con cambios en la actividad fotosintética y en la relación entre fluorescencia variable y fluorescencia máxima, considerando el intervalo de 24,1–25,6 °C como referencia fisiológica de mayor eficiencia potencial del fotosistema II y no como límite de tolerancia térmica.

La relación entre las variables se examinó mediante análisis descriptivo y representaciones gráficas, incluyendo gráficos de dispersión, curvas de respuesta y

líneas de tendencia cuando la disponibilidad y comparabilidad de los datos lo permitieron. Los patrones identificados se contrastaron con las condiciones térmicas asociadas con El Niño durante la actual etapa, con énfasis en lo esperado para el año 2027, para interpretar la posible correspondencia entre la variación térmica, la respuesta fotosintética y el rendimiento del cultivo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Conforme a lo descrito en la metodología, el análisis permitió identificar

la relación entre la variación térmica y diferentes componentes de la respuesta fotosintética del cacao (*Theobroma cacao* L.), considerando además la radiación, el estado hídrico y la respuesta productiva como factores moduladores. Los resultados muestran que la respuesta fisiológica no se concentra en una única temperatura óptima, sino que presenta diferencias según el proceso evaluado (Tabla 1).

Los resultados evidencian que la relación entre la temperatura y la actividad fotosintética del cacao no es lineal, sino que

Tabla 1.
Rangos térmicos y respuesta fisiológica del cacao (*Theobroma cacao* L.).

Rango térmico (°C)	Proceso fisiológico evaluado	Respuesta observada
20 - 30	Conductancia estomática y flujo hídrico foliar	Rango favorable para la actividad fotosintética; mayor conductancia, intercambio gaseoso y el funcionamiento estomático y flujo de agua
24,1 - 25,6	Eficiencia potencial del fotosistema II (relación Fv/Fm)	Valores máximos de fluorescencia variable/máxima; condición fisiológica óptima, máxima eficiencia fotoquímica potencial dentro del rango analizado.
30 - 33	Asimilación neta de CO ₂	Mayores tasas de asimilación de CO ₂ reportadas en esta ventana térmica
> 30	Conductancia estomática y fotosistema II	Cierre estomático progresivo; afectación del centro de reacción P680 y del complejo OEC; disminución de la tasa fotosintética, incremento de la sensibilidad fisiológica, condicionado por radiación, déficit de presión de vapor, disponibilidad hídrica y genotipo.

Nota. Los rangos corresponden a la síntesis analítica de las respuestas fisiológicas consideradas y no constituyen umbrales universales de tolerancia térmica.

describe una curva de respuesta con un óptimo relativamente estrecho. Entre 20 y 30 °C se favorecen la conductancia estomática y el flujo hídrico foliar, lo que se traduce en tasas fotosintéticas más altas (Baque *et al.*, 2024).

Dentro de este intervalo, el rango de 24,1 a 25,6 °C constituye el punto de mayor eficiencia potencial del fotosistema II, estimado mediante la relación entre la fluorescencia variable y la fluorescencia

máxima (F_v/F_m); no obstante, este valor debe interpretarse como una condición fisiológica favorable y no como un límite de tolerancia térmica del cultivo, tal como se estableció en la metodología.

De manera complementaria, se han reportado tasas máximas de asimilación de CO_2 en plántulas dentro de un intervalo ligeramente superior (30-33 °C), lo que sugiere que distintos procesos del aparato fotosintético alcanzan su óptimo en puntos térmicos no necesariamente coincidentes.

Superado el umbral de 30 °C, el sistema fisiológico del cacao ingresa en una fase de vulnerabilidad creciente. Se observa cierre estomático progresivo y una afectación directa sobre el fotosistema II, particularmente sobre el centro de reacción P680 y el complejo de evolución de oxígeno (OEC), estructuras responsables de la fotólisis del agua y del inicio del flujo de electrones. El deterioro de estas estructuras reduce la capacidad de la hoja para utilizar la energía luminosa captada, lo que se traduce en una disminución progresiva de la tasa fotosintética neta.

Este resultado adquiere especial relevancia al considerar que Vizuite *et al.*

(2024) identificaron temperaturas anuales de 18– 26 °C entre las condiciones asociadas con áreas de diferente aptitud agroecológica para el cacao en la Amazonía ecuatoriana. Sin embargo, dicho intervalo describe condiciones de aptitud territorial y no debe confundirse con una temperatura óptima instantánea para la fotosíntesis.

Respuesta diferencial del aparato fotosintético

La figura 1 muestra que la respuesta fotosintética del cacao frente a la temperatura es no lineal y depende del proceso fisiológico evaluado. La curva A indica que el aparato fotosintético alcanza su máximo alrededor de 25,6 °C, asociado con mayores valores de fluorescencia variable/fluorescencia máxima y mayor eficiencia del fotosistema II. La curva B alcanza su máximo aproximadamente a 33 °C para la asimilación de dióxido de carbono. A partir de 30 °C se señala una zona de estrés térmico, caracterizada por una reducción progresiva de la fotosíntesis, cierre estomático y afectación del fotosistema II.

La comparación permite distinguir dos escalas de análisis: mientras las condiciones agroecológicas determinan la ap-

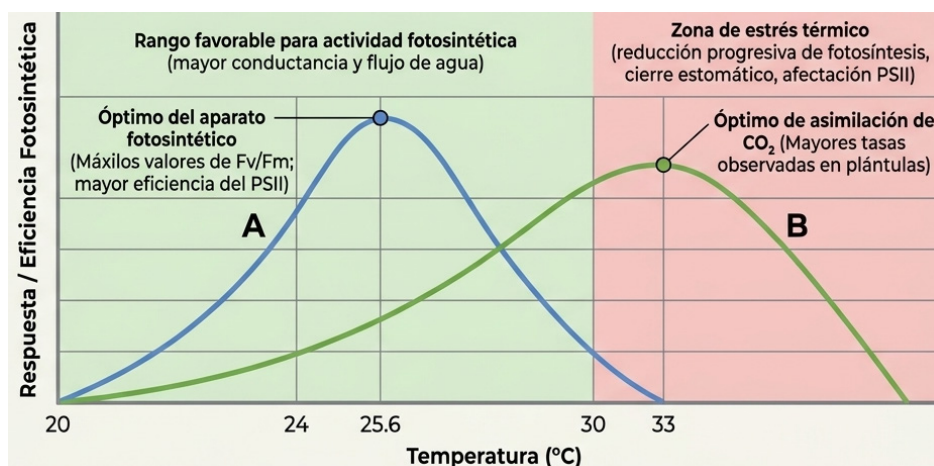


Figura 1: Respuesta diferencial de los procesos fotosintéticos del cacao frente al incremento de la temperatura.

titud general del territorio, los resultados fisiológicos obtenidos en el presente análisis permiten identificar ventanas térmicas asociadas con procesos específicos de la actividad fotosintética.

En este contexto, el resultado obtenido coincide parcialmente con Mateus *et al.* (2023), quienes encontraron que, bajo un déficit de presión de vapor constante de 0,9 kPa, el incremento de la temperatura desde 31/22 hasta 36/27 °C no produjo necesariamente una disminución inmediata de la asimilación neta de CO₂ en los genotipos SCA 6 y PA 107. Por el contrario, las tasas de asimilación, transpiración y conductancia estomática aumentaron con la temperatura. Sin embargo, el incremento térmico sí estuvo acompañado por reducciones en la masa seca y el área foliar.

Este contraste resulta fundamental para interpretar el presente análisis. Una temperatura que mantiene o incluso incrementa temporalmente la asimilación de CO₂ no necesariamente representa una condición óptima para el crecimiento integral de la planta. Mateus *et al.* (2023) también demostraron que la respuesta fotosintética y la respuesta del crecimiento pueden desacoplarse bajo temperaturas elevadas. Por ello, el intervalo de 30-33 °C identificado en este estudio debe interpretarse como una ventana asociada con elevada asimilación bajo determinadas condiciones, y no como una temperatura universalmente óptima para el desarrollo y productividad del cacao.

La evidencia de Baque *et al.* (2024) también respalda la existencia de una respuesta fisiológica dependiente de la temperatura y la radiación. Estos autores analizaron conjuntamente ambos factores y mostraron que la respuesta fisiológica del cacao cambia conforme se modifica la dis-

ponibilidad energética y térmica. Los resultados obtenidos permiten plantear que la temperatura actúa como un regulador de la actividad fotosintética, pero su efecto final depende de las condiciones ambientales bajo las cuales ocurre.

Temperatura, radiación y funcionamiento fotoquímico

Al aumentar la temperatura por encima del intervalo favorable identificado para determinados procesos, la respuesta fisiológica adquiere una mayor sensibilidad. Sin embargo, el análisis no respalda la utilización de 30 °C como un punto de ruptura absoluto. Por encima de este valor, la respuesta depende de la interacción con la radiación, el déficit de presión de vapor, el estado hídrico y la capacidad de aclimatación del genotipo (Tabla 2).

Esta interpretación es consistente con los resultados de Suárez *et al.* (2026), quienes encontraron diferencias importantes entre genotipos de cacao en eficiencia fotoquímica, transporte electrónico, disipación no fotoquímica y capacidad de mantener la funcionalidad fotosintética bajo las condiciones naturales de campo.

Algunos genotipos mostraron mayor estabilidad del fotosistema II frente a combinaciones de elevada temperatura y radiación, mientras que otros presentaron mecanismos diferenciales de fotoprotección. Por consiguiente, el incremento de temperatura no debe interpretarse de manera independiente de la capacidad fisiológica del material vegetal para disipar o utilizar la energía absorbida.

Los resultados muestran además la influencia de la radiación y cómo esta modifica la interpretación de la respuesta térmica, donde, una elevada disponibilidad de energía luminosa puede favorecer la foto-

Tabla 2.
Interacción entre radiación y temperatura sobre la respuesta fotosintética del cacao.

Condición de radiación y temperatura	Respuesta fisiológica asociada
Baja radiación (400–600 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), independiente de la temperatura	Conductancia estomática relativamente alta y estable; menor riesgo de estrés térmico agudo
Alta radiación (800–1000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) con temperatura óptima y sombreado/aclimatación	Mantenimiento de tasas fotosintéticas altas en campo
Alta radiación ($> 800 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) combinada con temperatura elevada	Intensificación abrupta del estrés; fotoinhibición y daño estructural del aparato fotosintético

síntesis cuando existe suficiente capacidad bioquímica para utilizarla; sin embargo, cuando coincide con temperaturas elevadas y una mayor demanda evaporativa, puede incrementarse la presión sobre el aparato fotosintético. Por tanto, el escenario de mayor riesgo no corresponde necesariamente a la temperatura máxima registrada de forma aislada, sino a la coincidencia de temperatura elevada, elevada radiación y aumento de la demanda atmosférica de agua.

Los resultados de Leiva *et al.* (2024) permiten reforzar esta interpretación, ya que la respuesta a la radiación mostró diferencias entre los clones CCN51, FSV41 y LK40. Asimismo, Da Vitória *et al.* (2026) encontraron respuestas diferenciales de la eficiencia fotoquímica y de los carbohidratos foliares entre genotipos sometidos a diferentes regímenes de luz y sistemas de cultivo. En consecuencia, la cantidad de radiación incidente no puede clasificarse de manera universal como favorable o perjudicial; su efecto depende de la capacidad del genotipo y del sistema de cultivo para aprovechar, disipar o regular la energía absorbida.

En condiciones de elevada radiación y temperatura, la alteración del balance entre energía absorbida y energía utilizada puede incrementar la necesidad de mecanismos fotoprotectores. Suárez *et al.* (2026) demostraron que los genotipos de cacao presentan estrategias diferentes de fotoprotección, incluyendo variaciones en la disipación no fotoquímica y en la capacidad de mantener la eficiencia fotoquímica. De manera complementaria, Da Vitória *et al.* (2026) observaron que la respuesta fotoquímica y el metabolismo de carbohidratos varían entre genotipos y sistemas de cultivo. Estos resultados respaldan la interpretación de que el riesgo fisiológico asociado con la temperatura elevada depende tanto de la magnitud del estrés como de la capacidad de respuesta del material vegetal.

De la respuesta fotosintética al riesgo productivo

La figura 2 resume la interacción entre la fotosíntesis y el riesgo productivo y permite establecer que la temperatura debe analizarse conjuntamente con la radiación; cuando ambas variables aumentan simultáneamente, la hoja puede enfren-

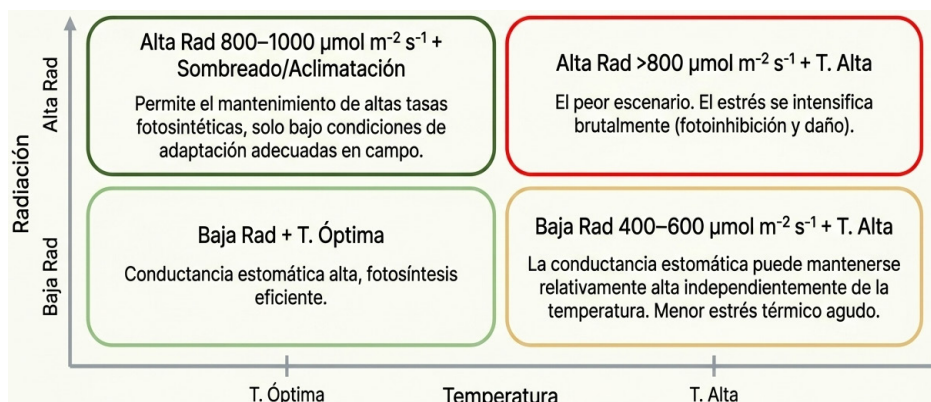


Figura 2: Interacción entre radiación y temperatura en la respuesta fotosintética del cacao.

tar una mayor carga energética y térmica, mientras que el incremento de la demanda evaporativa puede favorecer una reducción de la conductancia estomática. Esta combinación puede limitar la entrada de CO_2 y modificar la capacidad de utilización de la energía absorbida.

La relación entre las respuestas fisiológicas identificadas y el rendimiento debe interpretarse mediante una secuencia causal y no como una equivalencia directa. Una reducción de la conductancia estomática puede disminuir la disponibilidad interna de CO_2 y limitar la fijación de carbono; simultáneamente, una elevada temperatura y radiación pueden aumentar la demanda de mecanismos de protección fotoquímica. Si estas condiciones persisten y superan la capacidad de aclimatación de la planta, la reducción de la actividad fotosintética puede disminuir la disponibilidad de fotoasimilados destinados al crecimiento y desarrollo reproductivo.

Estos resultados sugieren que la ventana térmica favorable del cacao, relativamente estrecha, enfrenta un riesgo creciente de ser superada bajo el escenario actual de El Niño 2026–2027, particularmente durante los periodos de mayor in-

solación entre eventos de lluvia, cuando la combinación de temperatura elevada y alta radiación podría replicar las condiciones de estrés fotoquímico descrito (Figura 3). Lo que refuerza la pertinencia de estrategias de manejo agroforestal, como el sombreado parcial inferior al 30 %, en tanto amortiguador biofísico frente a la variabilidad térmica proyectada para el bienio 2026–2027.

En este punto, resulta necesario diferenciar entre una respuesta fisiológica puntual y una pérdida de rendimiento. Lander *et al.* (2025), mediante un análisis global de sistemas de producción de cacao en Brasil, Ghana e Indonesia, encontraron que una reducción de aproximadamente 7 °C durante la estación cálida podía incrementar sustancialmente el rendimiento, con aumentos de hasta 31 %. Además, identificaron relaciones negativas entre temperaturas elevadas y producción, evidenciando que las condiciones térmicas pueden trascender el nivel foliar y manifestarse en la productividad del cultivo.

Sin embargo, el rendimiento no depende exclusivamente de la fotosíntesis. Lander *et al.* (2025) también demostraron la importancia de la polinización y de los recursos disponibles para la planta, lo que

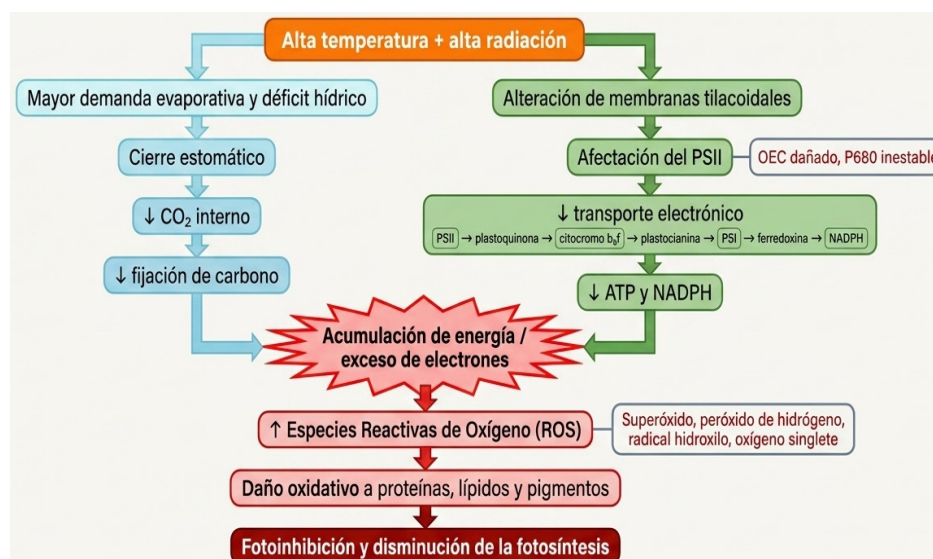


Figura 3: Mecanismos fisiológicos asociados al estrés térmico y sus posibles efectos sobre el rendimiento del cacao.

confirma que la producción final resulta de la interacción entre múltiples procesos. Por ello, los resultados del presente estudio deben interpretarse como evidencia de vulnerabilidad fisiológica potencial, no como una estimación directa de pérdidas productivas asociadas a una determinada temperatura.

Esta variabilidad constituye una oportunidad para la adaptación. Ceccarelli *et al.* (2024), mediante modelos de distribución climática para Ecuador, proyectaron modificaciones importantes en las áreas adecuadas para el cultivo de cacao bajo escenarios futuros y señalaron la necesidad de promover genotipos con mayor capacidad de adaptación.

Implicaciones para El Niño 2026–2027

La utilidad predictiva del análisis se establece al contrastar las ventanas fisiológicas identificadas con las condiciones climáticas asociadas al desarrollo de El Niño durante 2026–2027. En este contexto, se debe considerar como un forzante climático capaz de modificar el régimen térmico y otras variables ambientales, pero no como

una causa que determine de manera directa una temperatura foliar específica.

Esta distinción es particularmente importante para evitar una interpretación lineal del fenómeno. La intensidad de El Niño, expresada mediante anomalías de temperatura superficial del océano Pacífico, no equivale directamente a un incremento de igual magnitud en la temperatura del aire sobre las plantaciones. Por ello, la evaluación del riesgo fisiológico debe realizarse mediante variables que tengan una relación más directa con el funcionamiento foliar.

González *et al.* (2025) aportan evidencia particularmente relevante para esta interpretación, al encontrar señales de disminución de la productividad primaria bruta asociadas con eventos de ENSO en zonas cacaoteras de tierras bajas de América Latina. Este resultado respalda la pertinencia de considerar la actividad fotosintética como una variable sensible a la variabilidad climática asociada con ENSO, aunque no permite atribuir las modificaciones observadas exclusivamente a la temperatura.

Asimismo, Gurazada *et al.* (2026) demostraron que ENSO puede favorecer la ocurrencia de extremos térmicos asociados con diferentes condiciones de humedad en tierras agrícolas a escala global. Esta evidencia refuerza la necesidad de analizar el riesgo mediante la combinación de variables ambientales y no mediante un único indicador climático, para el cacao ecuatoriano resulta más apropiado vigilar simultáneamente la temperatura máxima, la temperatura foliar, el déficit de presión de vapor y la radiación fotosintéticamente activa.

A partir de los resultados obtenidos, se propone la siguiente clasificación operativa (Tabla 3) para el seguimiento del riesgo fisiológico durante El Niño 2026–2027:

Tabla 3.

Indicadores climáticos propuestos para la vigilancia de la respuesta fotosintética del cacao durante El Niño 2026–2027

Indicador (Unidad)	Condición favorable	Vigilancia	Alerta fisiológica
Temperatura máxima (°C)	≤ 30	30–33	> 33
Anomalía térmica (°C)	$\leq +1$	+1 a +2	$> +2$
Temperatura foliar (°C)	24–30	30–33	> 35
Déficit de presión de vapor (kPa)	0,5–1,5	1,5–2,0	$> 2,0$
Radiación fotosintéticamente activa ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	300–800	800–1200	> 1200

Para las zonas productoras de Ecuador, esta interacción adquiere especial importancia. Vizuite *et al.* (2024) demostraron que la aptitud agroecológica del cacao depende de la integración de variables térmicas, hídricas, edáficas y topográficas. Por tanto, una modificación del régimen climático durante El Niño puede alterar simultáneamente diferentes componentes del ambiente productivo. La temperatura debe interpretarse conjuntamente con la disponi-

La utilidad de esta clasificación radica en identificar combinaciones ambientales potencialmente críticas. Así, una temperatura máxima superior a 33 °C no debería interpretarse automáticamente como evidencia de daño fisiológico; su relevancia aumenta cuando coincide con temperaturas foliares elevadas, déficit de presión de vapor alto y radiación intensa. Esta aproximación es coherente con los resultados de Mateus *et al.* (2023), quienes demostraron que la respuesta térmica del cacao puede cambiar sustancialmente cuando el déficit de presión de vapor se mantiene bajo control, y con Suárez *et al.* (2026), quienes evidenciaron diferencias genotípicas en la respuesta a condiciones de elevada temperatura y radiación.

bilidad de agua y las condiciones del suelo, especialmente en sistemas donde pueden coexistir periodos de elevada humedad con episodios de elevada demanda atmosférica.

En este sentido, la respuesta esperada en la zona ecuatoriana no debería extrapolarse directamente desde regiones productoras donde El Niño se manifiesta principalmente mediante déficit hídrico. La combinación entre temperatura, precipitación, humedad del suelo, radiación y enfer-

medades puede generar trayectorias fisiológicas diferentes. El presente análisis, por tanto, no plantea que El Niño produzca necesariamente un único tipo de estrés, sino que establece las condiciones bajo las cuales el incremento térmico podría adquirir mayor importancia para el funcionamiento fotosintético.

Implicaciones para el manejo y la adaptación

Los resultados obtenidos también permiten interpretar el sombreado como una herramienta de regulación microclimática, más que como una estrategia destinada simplemente a reducir la radiación. Heming *et al.* (2022) demostraron que los sistemas agroforestales se puede reducir la temperatura máxima diaria hasta aproximadamente 6 °C respecto de plantaciones sin sombra, disminuyendo la exposición térmica del cultivo.

De manera complementaria, Stéphane *et al.* (2026) encontraron que el sombreado agroforestal puede mejorar la eficiencia potencial del fotosistema II, evaluada mediante Fv/Fm, bajo condiciones de estrés lumínico. Con ello se respalda la interpretación de que el manejo de la radiación puede contribuir a reducir la presión sobre el aparato fotosintético cuando las condiciones térmicas y lumínicas se vuelven desfavorables.

No obstante, el sombreado no debe plantearse como una solución universal. Una reducción excesiva de la radiación puede limitar la disponibilidad energética necesaria para la fotosíntesis, mientras que una cobertura insuficiente puede dejar al cultivo expuesto a temperaturas foliares y cargas radiactivas elevadas. Leiva *et al.* (2024) y Da Vitória *et al.* (2026) muestran que la respuesta a la luz depende del clon

o genotipo y del sistema de cultivo. Por lo cual, la regulación del sombreado debe orientarse a mantener un balance entre protección térmica y disponibilidad lumínica.

En conjunto, los resultados muestran que la respuesta térmica del cacao presenta una naturaleza no lineal y dependiente del proceso fisiológico. La máxima eficiencia potencial del fotosistema II se sitúa alrededor de 25,6 °C, mientras que la mayor asimilación neta de CO₂ se ubica aproximadamente entre 30 y 33 °C bajo las condiciones analizadas. Esta diferencia demuestra que no existe una única temperatura que pueda representar por sí misma el óptimo fisiológico del cacao.

La evidencia contrastada con Mateus *et al.* (2023), Leiva *et al.* (2024), Baque *et al.* (2024), Lander *et al.* (2025), Suárez *et al.* (2026) y Da Vitória *et al.* (2026) indica además que la respuesta térmica se encuentra modulada por la radiación, el déficit de presión de vapor, el estado hídrico, el genotipo y la capacidad de aclimatación. El riesgo asociado con El Niño para la temporada 2026–2027 debe evaluarse a partir de la coincidencia de condiciones ambientales, y no mediante un único umbral térmico.

Al contrastar estos umbrales fisiológicos con el escenario climático asociado con El Niño durante 2026–2027, se plantea un panorama de particular atención para el cacao cultivado en la costa ecuatoriana. Los pronósticos climáticos más recientes coinciden en que el evento alcanzaría una intensidad muy fuerte, con anomalías de temperatura superficial del mar en la región que podrían aproximarse a 3–3,5 °C durante su punto álgido, previsto entre octubre de 2026 y los primeros meses de 2027. De confirmarse, este evento superaría en magnitud al registrado en 2015–2016, hasta ahora el más intenso de la serie histórica del Índice Oceánico Niño.

De hecho, eventos de El Niño de fuerte intensidad se han asociado con reducciones de hasta el 40 % en la producción nacional de cacao, lo que resulta consistente con la vulnerabilidad fisiológica descrita en los resultados de este estudio, aun cuando la vía dominante de afectación combine el estrés térmico con el exceso hídrico y no únicamente con la sequía.

CONCLUSIONES

Los resultados evidencian que la respuesta térmica del cacao no responde a un único óptimo fisiológico, sino a una serie de ventanas térmicas específicas según el proceso evaluado: la conductancia estomática se favorece entre 20 y 30 °C, la eficiencia potencial del fotosistema II alcanza su máximo entre 24,1 y 25,6 °C, y la asimilación neta de CO₂ se optimiza entre 30 y 33 °C, no constituyendo un punto de

ruptura absoluto, sino que la vulnerabilidad fisiológica del cultivo depende de la interacción simultánea entre radiación, déficit de presión de vapor, disponibilidad hídrica y capacidad de aclimatación del genotipo.

Frente al escenario de El Niño 2026-2027, pronosticado como un evento de intensidad muy fuerte, estos hallazgos indican que el riesgo para el cacao ecuatoriano no puede evaluarse mediante un único umbral térmico, sino mediante la vigilancia conjunta de indicadores como la temperatura foliar, el déficit de presión de vapor y la radiación fotosintéticamente activa.

El manejo agroforestal mediante sombreado parcial se plantea como una estrategia de adaptación pertinente, aunque su efectividad requerirá validación específica por genotipo y sistema de cultivo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Baque, E., Ceme, G., y Jaimez, R. (2024). Efecto de la temperatura y la radiación sobre la respuesta fisiológica del cacao (*Theobroma cacao* L.): Estrategias de mejoramiento. *Ciencia y Tecnología*, 17(1), 24–32. <https://doi.org/10.18779/cyt.v17i1.713>
- Benjamín, C., Dias, L., Martins, S., Aucique-Perez, C., y Rosmaninho, L. (2025). Unlocking the potential of cacao yield with full sun cultivation. *Scientific Reports*, 15, 4368. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-87793-z>
- Ceccarelli, V., Fremout, T., Chavez, E., Argüello, D., Llor Solórzano, R., Sotomayor, I. A., y Thomas, E. (2024). Vulnerability to climate change of cultivated and wild cacao in Ecuador. *Climatic Change*, 177, 103. <https://doi.org/10.1007/s10584-024-03756-9>
- Da Vitória, J., de Souza, V., Tercio, A., Cezario, M., da Silva, C., Nascimento de Santana, E., Tesch, K., de Oliveira, L., Machado, J., Batista, R., Spaggiari, C., Romais, E., y Dousseau-Arantes, S. (2026). Photochemical efficiency and leaf carbohydrates of *Theobroma cacao* L. genotypes under different light regimes and cultivation systems. *Plants*, 15(2), 297. <https://doi.org/10.3390/plants15020297>
- Dhamira, A., y Anggrasari, H. (2024). Indonesian climatic factors and its effect on cocoa productivity. *West Science Interdisciplinary Studies*, 2(5), 963–974. <https://doi.org/10.58812/wsis.v2i05.873>

- Fleitas, M., Guarnizo, D., Balarezo-Saltos, L., y Benitez, T. (2026). Retos actuales del manejo integrado de plagas en la era del cambio climático. *Revista de Investigación Hatun Yachay Wasi*, 5(1), 84–96. <https://doi.org/10.57107/hyw.v5i1.107>
- González-González, A., Quesada, B., Clerici, N., y Fernández-Manjarrés, J. (2025). Gross primary productivity analyses suggest higher ENSO-mediated impacts in lowland cacao areas compared to mountain coffee regions in Latin America. *Scientific Reports*, 15, 39136. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-27292-3>
- Gurazada, M., Abatzoglou, J., y Singh, D. (2026). ENSO's influence on co-occurring hot-dry and hot-wet extremes across global croplands. *Environmental Research Letters*, 21, 054018. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ae4a3d>
- Heming, N., Schroth, G., Talora, D., y Faria, D. (2022). Cabruca agroforestry systems reduce vulnerability of cacao plantations to climate change in southern Bahia. *Agronomy for Sustainable Development*, 42, 48. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00780-w>
- Ibe, O., Nduka, B., Adejobi, K., y Ayegboyin, K. (2024). Surface temperature changes and effects on cocoa yield in the top four cocoa producing countries of Africa: A comparative analysis. *Asian Journal of Agricultural and Horticultural Research*, 11(4), 1–13. <https://doi.org/10.9734/ajahr/2024/v11i4335>
- Kamil, N., Xiao, S., Syed, S., Xu, H., y Zhuang, C. (2024). Nonlinear impacts of climate anomalies on oil palm productivity. *Heliyon*, 10(15), e35798. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35798>
- Lander, T. A., Atta-Boateng, A., Toledo-Hernández, M., Wood, A., Malhi, Y., Solé, M., Tschardtke, T., y Wanger, T. (2025). Global chocolate supply is limited by low pollination and high temperatures. *Communications Earth & Environment*, 6, 97. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02072-z>
- Leiva, E., Hernández, C., y Ramírez, R. (2024). Application of photosynthesis models to determine light requirements in three cacao clones. *Ingeniería e Investigación*, 44(3), e107078. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.107078>
- Mateus-Rodríguez, J., Lahive, F., Hadley, P., y Daymond, A. (2023). Effects of simulated climate change conditions of increased temperature and [CO₂] on the early growth and physiology of the tropical tree crop, *Theobroma cacao* L. *Tree Physiology*, 43(12), 2050–2063. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpad116>
- Obahoundje, S., Tilahun, S., y Schmitter, P. (2026). Climate–yield interactions in West Africa: Machine learning insights for cocoa production in Ghana and Côte d'Ivoire. *PLOS Climate*, 5(7), e0000970. <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000970>
- Suárez, J., Vanegas, J., y Leite, F. (2026). Understanding mechanistic responses underlying diurnal photoprotection and photosynthetic plasticity among cacao genotypes under natural Amazonian field conditions. *PLOS ONE*, 21(6), e0351655. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0351655>

- Tullu, G., y Habtegebreal, A. (2025). The effects of ENSO phenomenon on rainfall and crop yield in the Arsi zone, Ethiopia. *International Journal of Agricultural and Applied Sciences*, 6(1), 7–16. <https://doi.org/10.52804/ijaas2025.612>
- Vizuite-Montero, M., Figueroa-Saavedra, H., Barbaru-Grajales, A., Zapata-Mayorga, H., Herrera-Ocaña, H., y Moya, W. (2024). Physio-edaphoclimatic factors show optimal soil suitability for three tropical crops in the Ecuadorian Amazon. *Scientia Agricola*, 81, e20220214. <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2022-0214>

Declaración de roles de autores:

- Mario Fleitas Díaz: Conceptualización; metodología, revisión, edición final y administración del proyecto.
- Dalton Michel Guarnizo Crespo: análisis formal; metodología; redacción, estadística y edición.
- Mayra Magali Cuenca Zambrano: Obtención de financiación, investigación, análisis de datos y borrador original.
- Talhita Benitez Pardillo: Borrador original, redacción, análisis de datos, supervisión y edición final.
- José Valdivia Fernández Dávila: Investigación, redacción, análisis de datos y borrador original.