

**UNIVERSIDAD DE CIENCIAS
Y ARTES DE CHIAPAS**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
SEDE VILLA CORZO**

T E S I S

**RASGOS FUNCIONALES Y
PLASTICIDAD FENOTÍPICA DE
PLANTAS DE CAFÉ (*Coffea arabica* L.)
EN UN GRADIENTE ALTITUDINAL DE
LA REGIÓN FRAILESCA, CHIAPAS.**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS

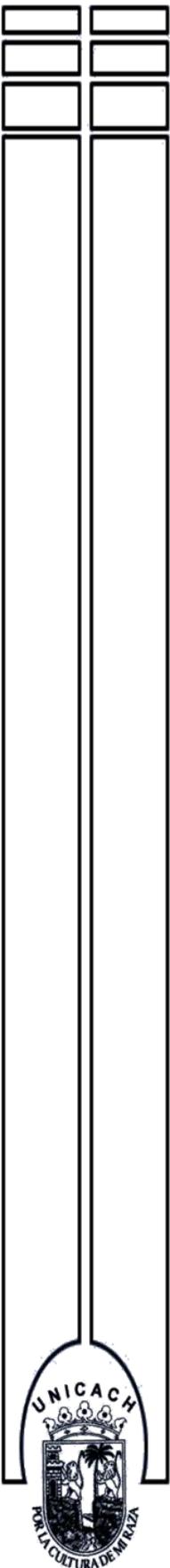
AGROFORESTALES

PRESENTA

EMANUEL ROMERO JOSÉ

DIRECTOR

DR. LUIS ALFREDO RODRÍGUEZ LARRAMENDI



**UNIVERSIDAD DE CIENCIAS
Y ARTES DE CHIAPAS**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
SEDE VILLA CORZO**

T E S I S

**RASGOS FUNCIONALES Y
PLASTICIDAD FENOTÍPICA DE
PLANTAS DE CAFÉ (*Coffea arabica* L.)
EN UN GRADIENTE ALTITUDINAL DE
LA REGIÓN FRAILESCA, CHIAPAS.**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS AGROFORESTALES**

PRESENTA

EMANUEL ROMERO JOSÉ

COMITÉ TUTORIAL

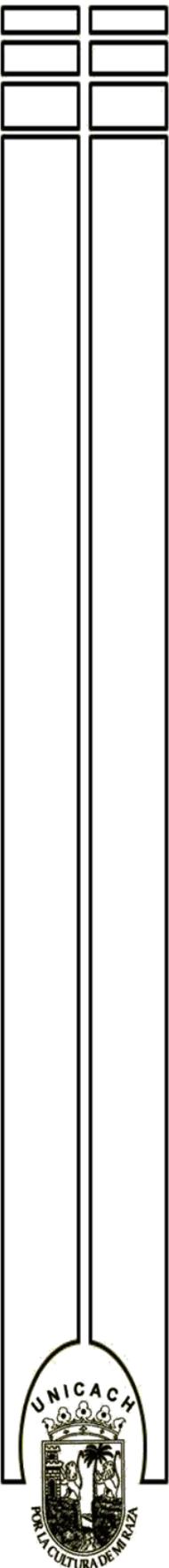
DR. LUIS ALFREDO RODRÍGUEZ LARRAMENDI (DIRECTOR)

MTRO. ALDER GORDILLO CURIEL (CODIRECTOR)

DR. MIGUEL ÁNGEL SALAS MARINA (ASESOR)

Villa Corzo, Chiapas

Mayo 2023.





UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS
SECRETARÍA ACADÉMICA
DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas a 27 de abril de 2023
Oficio No. SA/DIP/300/2023
Asunto: Autorización de Impresión de Tesis

C. Emanuel Romero José
CVU 1112777
Candidato al Grado de Maestro en Ciencias Agroforestales
Facultad de Ingeniería
UNICACH
P r e s e n t e

Con fundamento en la **opinión favorable** emitida por escrito por la Comisión Revisora que analizó el trabajo terminal presentado por usted, denominado **Rasgos funcionales y plasticidad fenotípica de plantas de café (*Coffea arabica L.*) en un gradiente altitudinal de la región Frailesca, Chiapas** cuyo Director de tesis es el Dr. Luis Alfredo Rodríguez Larramendi (CVU 669005) quien avala el cumplimiento de los criterios metodológicos y de contenido; esta Dirección a mi cargo **autoriza** la impresión del documento en cita, para la defensa oral del mismo, en el examen que habrá de sustentar para obtener el **Grado de Maestro en Ciencias Agroforestales**.

Es imprescindible observar las características normativas que debe guardar el documento impreso, así como realizar la entrega en esta Dirección de un ejemplar empastado.

Atentamente
"Por la Cultura de mi Raza"

Dra. Carolina Orantes García
Directora



**DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN
Y POSGRADO**

U
c.c.p.

Ing. Mónica Catalina Cisneros Ramos, Directora de la Facultad de Ingeniería, UNICACH. Para su conocimiento.
Dr. Miguel Ángel Salas Marina, Coordinador del Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNICACH. Para su conocimiento
Archivo/minutario.

RJAG/COG/ecoligp/gtr

2023 AÑO DE FRANCISCO VILLA
EL REVOLUCIONARIO DEL PUEBLO

Dirección de
Investigación
y Posgrado

Dirección de Investigación y Posgrado
Libramiento Norte Poniente No. 1150
Colonia Lajas Maciel C.P. 29039
Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México
Tel:(961)6170440 EXT.4360
investigacionyposgrado@unicach.mx

Agradecimientos

A CONACYT por el financiamiento de la beca, sin el apoyo económico este proyecto no se hubiese concretado.

A la UNICACH en donde me formé como Ingeniero y ahora como Maestro en Ciencias. Gracias a mi *alma mater* por las oportunidades brindadas durante mi proceso formativo.

Al Dr. Luis Alfredo Rodríguez Larramendi por su apoyo durante mi formación académica, por sus palabras, consejos, acompañamiento, sin su asesoramiento no sería el profesional que soy. Toda admiración, cariño y respeto.

Al Cuerpo Académico Agroforestería y Desarrollo rural y al Núcleo Académico de la maestría, gracias por sus aportaciones a mi formación.

A mis amigos y compañeros de la maestría.

Estas palabras son escritas el 18/06/2022; hoy se cumplen siete años de ser trasplantado. Cuando fui diagnosticado con IRC (Insuficiencia Renal Crónica) con apenas 18 años, sentí que mi vida terminaba, no había futuro. Pasaban días, semanas, meses dentro de un hospital. Un día me desperté pensando: “¿Qué sería de mí si sobrevivía a todas aquellas cosas que me estaban pasando?”. Soñaba con terminar una carrera, y en mis ganas de sobrevivir deseaba estudiar una maestría; era una utopía en aquel momento. Pasaron los meses, los años, culminé la ingeniería e ingresé a la Maestría en Ciencias Agroforestales. Hoy me encuentro escribiendo los agradecimientos.

Gracias a Dios por permitirme llegar hasta donde me encuentro hoy.

A mis padres porque siempre me apoyaron, estando conmigo en las peores circunstancias de la vida.

Todo es posible en la medida que te lo propongas. Jamás te rindas.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN GENERAL	6
GENERAL ABSTRACT	8
INTRODUCCIÓN GENERAL	10
1.1 OBJETIVOS	12
1.1.1 Objetivo general	12
1.1.2 Objetivos específicos	12
RESULTADOS	13
Artículo 1. Rasgos funcionales y plasticidad fenotípica del cafeto (<i>Coffea arabica</i> L. Var. Costa Rica 95) en un gradiente altitudinal de la región Frailesca, Chiapas	13
Artículo 2. Variaciones en la fluorescencia de la clorofila en cafetos (<i>Coffea arabica</i> L. Var. Costa Rica 95) crecidos en un gradiente altitudinal de la región Frailesca	32
Artículo 3. Contenido relativo de agua, transpiración y características estomáticas en cafetos (<i>Coffea arabica</i> L. Var. Costa Rica 95) crecidos en un gradiente altitudinal de la región Frailesca	57
DISCUSIÓN GENERAL	70
CONCLUSIONES GENERALES	73
BIBLIOGRAFÍA	75
RETRIBUCIÓN SOCIAL	80

RESUMEN GENERAL

El café es un cultivo de importancia económica a nivel mundial, el segundo producto más comercializado después del petróleo; sin embargo, el cambio climático se ha acentuado provocando cambios en los ecosistemas. Esto se traduce en condiciones micro-climáticas adversas para las plantaciones de *Coffea arabica* L. lo cual puede provocar ajustes en los rasgos funcionales de las plantas, cambios que pueden ser fisiológicos, morfológicos o bioquímicos. Dicha capacidad se describe como plasticidad fenotípica mediante la cual se generan diferentes fenotipos frente a diferentes ambientes. En la región Frailesca no hay registros de estudios en campo que permitan sentar bases sólidas para un mejor manejo agronómico de las plantaciones de cafetos. Por ello, el objetivo de la investigación fue estudiar las variaciones en los rasgos funcionales, fisiológicos y plasticidad fenotípica de cafetos en un gradiente altitudinal de la región Frailesca de Chiapas. El estudio se realizó en dos cafetales bajo sombra situados a 600 y 1000 metros sobre el nivel del mar se seleccionaron cinco parcelas de 40 m², en las cuales se evaluaron rasgos funcionales relacionados con el crecimiento del tallo (altura de la planta, diámetro de tallo y longitud de entrenudos ortotrópicos), ramas (cantidad y longitud de ramas plagiotrópicas y nudos totales por planta) y hojas (hojas por planta, masa foliar específica y área foliar específica). Se registraron las variaciones diurnas de la radiación fotosintéticamente activa (RFA), temperatura diurna del aire y humedad relativa, desde las 07:00 hasta las 17:00 horas cada 30 minutos. Se midieron parámetros de la fluorescencia de la clorofila: fluorescencia inicial (Fo), fluorescencia máxima (Fm), absorción de energía por centro de reacción (ABS/CR), disipación de energía por centro de reacción (DIO/CR), atrapamiento por centro de reacción (TRO/CR), transporte de electrones por centro de reacción (ETO/CR), y el rendimiento cuántico máximo de la fotoquímica primaria (Fv/Fm), producto cuántico máximo de disminución de excitación fotoquímica (Fo/Fm), fuerza impulsora de la fotosíntesis (PI), y el contenido de clorofilas totales (Cl a+b). Para el estado hídrico se midieron las variaciones diarias del contenido relativo de agua (CRA), transpiración, densidad y dimensiones de los estomas. Las mediciones de CRA y transpiración se realizaron desde las 7:00 hasta las 17:00 horas, a intervalos de dos horas durante los meses de febrero, mayo, agosto y noviembre. Se realizaron análisis estadísticos considerando un modelo matemático lineal de efectos fijos,

además de análisis de varianza considerando dos factores, las dos altitudes (Factor A), y los meses de muestreo (Factor B) para comprobar el efecto de la altitud, así como posibles variaciones estacionales en los parámetros medidos. Los resultados demuestran el efecto atenuador que ejercen los árboles de sombra al cultivo asociado. Las plantas de café cultivadas a 1000 msnm presentaron cambios en los rasgos funcionales anatómicos, así como mayor área foliar como consecuencia de una exposición solar superior en dicha altitud. El diámetro de tallo, la masa foliar específica son los rasgos que mayor plasticidad presentaron. A 600 msnm la radiación solar afectó la transferencia de energía en las relaciones absorción por centro de reacción (ABS/CR), disipación por centro de reacción (DIO/CR), atrapamiento por centro de reacción (TRO/CR), transporte de electrones por centro de reacción (ETO/CR), rendimiento cuántico de la fotoquímica primaria (F_v/F_m) y producto cuántico máximo de excitación fotoquímica (F_o/F_m), a 1000 msnm los parámetros se mantienen en rangos óptimos. La altitud no modificó el estado hídrico de las plantas, pero sí la densidad estomática siendo mayor en las plantas cultivadas a 1000 msnm, mientras que las dimensiones de los estomas no se modificaron por la altitud.

Palabras clave: *Coffea arabica* L., Plasticidad fenotípica, rasgos funcionales, radiación fotosintéticamente activa, gradiente altitudinal

GENERAL ABSTRACT

Coffee is an economically important crop worldwide, the second most traded product after petroleum; however, climate change has been accentuated causing changes in ecosystems. This translates into adverse micro-climatic conditions for *Coffea arabica* L. plantations which can cause adjustments in plant functional traits, changes that can be physiological, morphological or biochemical. This capacity is described as phenotypic plasticity through which different phenotypes are generated in different environments. In the Frailesca region there are no records of field studies that would allow the establishment of solid bases for a better agronomic management of coffee plantations. Therefore, the objective of this research was to study the variations in functional and physiological traits and phenotypic plasticity of coffee plants in an altitudinal gradient in the Frailesca region of Chiapas. The study was carried out in two shaded coffee plantations located at 600 and 1000 meters above sea level. Five plots of 40 m² were selected, in which functional traits related to stem growth (plant height, stem diameter and length of orthotropic internodes), branches (number and length of plagiotropic branches and total nodes per plant) and leaves (leaves per plant, specific leaf mass and specific leaf area) were evaluated. Diurnal variations in photosynthetic active radiation (PAR), daytime air temperature and relative humidity were recorded from 07:00 to 17:00 hours every 30 minutes. Chlorophyll fluorescence parameters were measured: initial fluorescence (F_o), maximum fluorescence (F_m), energy absorption per reaction center (ABS/CR), energy dissipation per reaction center (DIO/CR), trapping per reaction center (TRO/CR), electron transport per reaction center (ETO/CR), and the maximum quantum yield of primary photochemistry (F_v/F_m), maximum quantum product of photochemical excitation decay (F_o/F_m), photosynthetic driving force (PI), and total chlorophyll content (Cl a+b). For water status, daily variations in relative water content (RWC), transpiration, density, and stomata dimensions were measured. Measurements of RWC and transpiration were made from 7:00 am to 5:00 pm, at two-hour intervals during February, May, August and November. Statistical analyses were performed considering a fixed effects linear mathematical model, in addition to analysis of variance considering two factors, the two altitudes (Factor A), and the sampling months (Factor B) to test the effect of altitude, as well as possible seasonal variations in the measured parameters. The results demonstrate the

attenuating effect of shade trees on the associated crop. Coffee plants grown at 1000 masl showed changes in anatomical functional traits, as well as greater leaf area as a consequence of higher solar exposure at this altitude. Stem diameter and specific leaf mass were the traits that showed the greatest plasticity. At 600 masl, solar radiation affected energy transfer in the following relationships: absorption by reaction center (ABS/CR), dissipation by reaction center (DIO/CR), trapping by reaction center (TRO/CR), electron transport by reaction center (ETO/CR), quantum yield of primary photochemistry (Fv/Fm) and maximum quantum product of photochemical excitation (Fo/Fm); at 1000 masl, the parameters remained in optimal ranges. Altitude did not modify the water status of the plants, but stomata density was higher in plants grown at 1000 masl, while stomata dimensions were not modified by altitude.

Key words: *Coffea arabica* L., phenotypic plasticity, functional traits, photosynthetic active radiation, altitudinal gradient.

INTRODUCCIÓN GENERAL

El café es el segundo producto básico más comercializado después del petróleo (DaMatta *et al.*, 2007; Davis *et al.*, 2012), se cultiva en 52 países, en su mayoría de bajos ingresos, y el 70% de su producción proviene de la especie *Coffea arabica* L. (Bote *et al.*, 2018). Brasil es el mayor productor mundial, seguido de Vietnam y Colombia (DaMatta *et al.*, 2007), mientras que México ocupa el décimo lugar (Vargas, 2022), siendo el estado de Chiapas el mayor productor a nivel nacional, a pesar de las afectaciones provocadas por la incidencia de la Roya del cafeto (*Hemileia vastatrix* B. & Br) (Gordillo *et al.*, 2020).

La producción de café a nivel mundial se desarrolla mayormente en sistemas agroforestales bajo sombra, en altitudes superiores a 1000 msnm para las especies arábica (Latifah *et al.*, 2018; Malhi *et al.*, 2021). No obstante, en las últimas décadas el cambio climático se ha acentuado, propiciando el incremento de la temperatura y modificando los regímenes de precipitaciones (Gómez-Tosca *et al.*, 2021). Con el aumento de la temperatura a escala mundial se esperan cambios en los patrones de crecimiento de las plantas, en dependencia de la capacidad de adaptabilidad o de plasticidad fenotípica que muestren (Nicotra *et al.*, 2010; Nicholls *et al.*, 2015).

La capacidad de un genotipo de generar diferentes fenotipos en una escala temporal o espacial modificando los rasgos funcionales en las plantas se denomina plasticidad fenotípica (Valladares *et al.*, 2007) y es esencial para su adaptación en respuesta a los factores abióticos (Nicholls *et al.*, 2015). Consecuentemente, las modulaciones del crecimiento se expresan principalmente en cambios morfológicos, fisiológicos o bioquímicos en función de factores externos (Rahn *et al.*, 2018); siendo la luz y el agua factores importantes que, en situaciones de estrés, influyen significativamente en el crecimiento de las plantas (Cavatte *et al.*, 2012). En este sentido, Zelada y Reynel (2019) demostraron que morfológicamente los cambios más notables en las plantas sometidas a presiones de factores externos son el número de hojas, diámetro de tallo y el área foliar específica.

Se observó que las especies bajo sombra presentan mayor plasticidad morfológica que fisiológica (Matos *et al.*, 2009) y el café ha demostrado ser una especie facultativa de sombra con patrones de aclimatación a pleno sol (Fahl *et al.*, 1994). Diversas han sido las

investigaciones relacionadas con las respuestas fisiológicas del café a limitaciones de recursos externos, entiéndase radiación solar (Rodríguez-Larramendi *et al.*, 2016; Bernado *et al.*, 2021), temperatura (Ovalle-Rivera *et al.*, 2015) y humedad del suelo (Mofatto *et al.*, 2016). Cavatte *et al.*, (2012) infieren que el café debería tener suficiente plasticidad en entornos contrastantes de luz, exhibiendo características adaptativas con altos atributos para tolerar mayor exposición solar (Fahl *et al.*, 1994); incrementando el grosor histológico y disminuyendo el área foliar (Rodríguez-Larramendi *et al.*, 2016).

Se ha demostrado que las características microclimáticas se modifican con la altitud, e influyen en el crecimiento y desarrollo del café (Núñez *et al.*, 2021). Esta heterogeneidad ambiental modifica los rasgos funcionales de las hojas, tallos y raíces, modulando el crecimiento y supervivencia de las plantas (de la Riva *et al.*, 2014). Estas variaciones funcionales son características de las plantas como respuesta ante el entorno, y su efecto sobre el genotipo (Buchanan *et al.*, 2019).

Por otro lado, la fluorescencia de la clorofila se ha utilizado como indicador para estudiar procesos de foto protección de la hoja para disipar el exceso de energía absorbida que no puede ser totalmente utilizado en las reacciones fotoquímicas, y refleja la capacidad de las plantas para adaptarse a condiciones ambientales (Ceacero *et al.*, 2012), por lo que su aplicación para estudiar la capacidad de adaptación del cafeto a los cambios producidos en las variables climáticas como consecuencia de las diferencias en altitud, podría ser de gran valor para entender el funcionamiento del fotosistema II.

En la región Frailesca no existen estudios en condiciones naturales que permitan conocer cómo responden los cafetos a la influencia de factores externos; radiación solar, humedad relativa y la temperatura en el crecimiento de plantas de la especie *arabica* en condiciones de la región VI, en altitud de 600 y 1000 msnm indagando en la plasticidad. Además de conocer la fase dependiente de la luz mediante un análisis no destructivo (fluorescencia de la clorofila) para observar el funcionamiento del fotosistema II. De igual forma se comprender los procesos estomáticos, y el uso del agua para poder sentar bases para un mejor manejo agronómico de la variedad Costa Rica 95; introducida y genéticamente mejorada con resistencia a la roya.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo general

Estudiar las variaciones de los rasgos funcionales, fisiológicos y plasticidad fenotípica de cafetos en un gradiente altitudinal de la región Frailesca de Chiapas.

1.1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar el microclima de cafetales localizados en un gradiente altitudinal de la región Frailesca a 600 y 1000 msnm.
- Estudiar las variaciones en los rasgos funcionales y la plasticidad fenotípica del cafeto en un gradiente altitudinal de la región Frailesca.
- Estudiar las variaciones de los rasgos fisiológicos asociados a la actividad fotosintética (fluorescencia de la clorofila), contenido relativo de agua y transpiración de cafetos en un gradiente altitudinal de la región Frailesca.

RESULTADOS

Artículo 1¹: Rasgos funcionales y plasticidad fenotípica del cafeto (*Coffea arabica* L. Var. Costa Rica 95) en un gradiente altitudinal de la región Frailesca, Chiapas

Functional traits and phenotypic plasticity of the coffee plants (*Coffea arabica* L. Var. Costa Rica 95) in an altitudinal gradient of the Frailesca region of Chiapas

Emanuel Romero José¹, Luis Alfredo Rodríguez Larramendi^{2*}, Miguel Ángel Salas Marina², Alder Gordillo Curiel²

¹ Estudiante de la Maestría en Ciencias Agroforestales, Facultad de Ingeniería, Sede Villa Corzo, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (emanuel.romeroj@e.unicach.mx).

² Cuerpo Académico Agroforestería y Desarrollo Rural, Facultad de Ingeniería, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (miguel.salas@unicach.mx, alder.gordillo@unicach.mx).

* Autor de correspondencia: alfredo.rodriguez@unicach.mx

Resumen

El objetivo de esta investigación fue estudiar las variaciones en el microclima, los rasgos funcionales y plasticidad fenotípica del cafeto en dos gradientes altitudinales de la región Frailesca, Chiapas. En dos cafetales bajo sombra situados a 600 y 1000 metros de altitud, se seleccionaron cinco parcelas de 40 m², en las cuales se evaluaron rasgos funcionales relacionados con el crecimiento del tallo (altura de la planta, diámetro del tallo y longitud de entrenudos ortotrópicos), ramas (cantidad y longitud de

¹ Enviado a la Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas

ramas plagiotrópicas y nudos totales por planta) y hojas (hojas por planta, masa foliar específica y área foliar específica). Se registraron las variaciones diurnas de la radiación fotosintéticamente activa (RFA), temperatura del aire y humedad relativa, desde las 07:00 hasta las 17:00 horas cada 30 minutos. Tanto la RFA, como la temperatura del aire y la humedad relativa fueron mayores a 1000 msnm debido a la mayor cantidad de sombra existente en el cafetal situado a 600 msnm. La RFA incidente en ambas altitudes estuvo por debajo de los puntos de compensación y saturación luminosa reportados para este cultivo, mientras que la temperatura y la humedad relativa estuvieron fuera del rango recomendado para el café. El diámetro del tallo, cantidad y longitud de ramas plagiotrópicas, la masa foliar específica y el área foliar específica fueron mayores en los cafetos crecidos a 1000 msnm. El diámetro del tallo, la masa foliar específica y el área foliar específica fueron los rasgos que mostraron los mayores índices de plasticidad de distancias relativas.

Palabras clave: Crecimiento, microclima, radiación fotosintéticamente activa, temperatura, humedad relativa.

Abstract

The objective of this research was to study variations in microclimate, functional traits and phenotypic plasticity of coffee plants in two altitudinal gradients of the Frailesca region, Chiapas. In two coffee plantations under shade trees located at 600 and 1000 meters altitude, five 40 m² plots were selected, in which functional traits related to stem growth (plant height, stem diameter and length of orthotropic internodes), branches (number and length of plagiotropic branches and total nodes per plant) and leaves (leaves per plant, specific leaf mass and specific leaf area) were evaluated. Diurnal variations in photosynthetically active radiation (PAR), air temperature and relative humidity were recorded from 07:00 to 17:00 hours every 30 minutes. Both PAR, air temperature and relative humidity were higher at 1000 masl due to the greater amount of shade in the coffee plantation located at 600 masl.

Incident PAR at both altitudes was below the compensation and light saturation points reported for this crop, while temperature and relative humidity were outside the recommended range for coffee plants. Stem diameter, number and length of plagiotropic branches, specific leaf mass and specific leaf area were greater in coffee plants grown at 1000 m asl. Stem diameter, specific leaf mass and specific leaf area were the traits that showed the highest relative distance plasticity indices.

Key words: growth, microclimate, photosynthetic active radiation, temperature, relative humidity.

Introducción

El café es el segundo producto básico más comercializado en el mundo después del petróleo (DaMatta *et al.*, 2007), se cultiva en 52 países, en su mayoría de bajos ingresos, y el 70% de su producción proviene de la especie *Coffea arabica* L. (Bote *et al.*, 2018). Brasil es el mayor productor mundial, seguido de Vietnam y Colombia (DaMatta *et al.*, 2007), mientras que México ocupa el décimo lugar; siendo el estado de Chiapas el mayor productor a nivel nacional, a pesar de las afectaciones provocadas en dicho estado por la incidencia de la enfermedad de la Roya del cafeto (Gordillo *et al.*, 2020).

El cafeto, a pesar de ser una especie originaria de los bosques tropicales de Etiopía donde crece y se desarrolla bien bajo los estratos de bosques de galería (Carvajal, 1984), rápidamente se diseminó en un rango de latitud que varía entre los 21° norte y 25° Sur, mostrando su amplia capacidad de adaptación a diversos ambientes. Esto ha traído como consecuencia que las principales plantaciones comerciales a nivel mundial se encuentren en sistemas agroforestales, aunque en países como Brasil existen cafetales a pleno sol en altitudes superiores a 1000 msnm (Latifah *et al.*, 2018; Malhi *et al.*, 2021), de ahí que el cafeto se considere como una especie facultativa de sombra con patrones de aclimatación a pleno sol (Fahl *et al.*, 1994). No obstante, en las últimas décadas el cambio climático se ha acentuado, propiciando el incremento de la temperatura y modificando los regímenes de precipitaciones (Gómez-Tosca *et al.*, 2021). Con el aumento de la temperatura a escala mundial se esperan cambios en los patrones de crecimiento de las plantas, en dependencia de su capacidad de

adaptabilidad (Nicotra *et al.*, 2010), de ahí que se necesiten estudios puntuales en cultivos que como el café representa la base económica fundamental de muchas familias de escasos recursos.

A la capacidad de un genotipo de generar diferentes fenotipos en una escala temporal o espacial modificando los rasgos funcionales en las plantas se denomina plasticidad fenotípica (Valladares *et al.*, 2007) y es esencial para su adaptación en respuesta a los factores abióticos. Consecuentemente, las modulaciones del crecimiento de las plantas en función de factores externos se expresan principalmente en cambios morfológicos, fisiológicos o bioquímicos (Rahn *et al.*, 2018); siendo la luz y el agua factores importantes que, en situaciones de estrés, influyen significativamente en el crecimiento de las plantas (Cavatte *et al.*, 2012) y que sus variaciones son generalmente sensibles a la altitud.

En este sentido, Zelada y Reynel (2019) han demostrado que morfológicamente los cambios más notables en las plantas sometidas a presiones de factores externos se han observado en el número de hojas, diámetro de tallo y el área foliar específica. Mientras que en el cultivo del café diversas han sido las investigaciones relacionadas con la respuesta fisiológica frente a limitaciones de recursos externos, entiéndase radiación solar (Rodríguez-Larramendi *et al.* 2001, Rodríguez-Larramendi *et al.*, 2016; Bernado *et al.*, 2021), temperatura (Ovalle-Rivera *et al.*, 2015) y humedad del suelo (Mofatto *et al.*, 2016). Cavatte *et al.*, (2012) infieren que el café debería tener suficiente plasticidad en entornos contrastantes de luz, exhibiendo características adaptativas con altos atributos para tolerar mayor exposición solar (Fahl *et al.*, 1994); incrementando el grosor histológico y disminuyendo el área foliar (Rodríguez-Larramendi *et al.*, 2016).

El objetivo de esta investigación fue estudiar los cambios en los rasgos funcionales morfológicos, así como la plasticidad fenotípica de cafetos en un gradiente altitudinal de la región Frailesca de Chiapas, México.

Materiales y métodos

Localización

La investigación se realizó en dos localidades ubicadas en la región Frailesca, Chiapas, la cual está conformada por seis municipios: Ángel Albino Corzo, La Concordia, Montecristo de Guerrero, Villa Corzo, El Parral y Villaflores. Colinda al norte con las Regiones I Metropolitana y IV De Los Llanos, al este con la Región XI Sierra Mariscal, al sur con la Región IX Istmo Costa y al oeste con la Región II Valles Zoque (Figura 1). Su territorio ocupa 7987.19 Km², que representan el 10.7% de la superficie estatal, siendo la segunda región de mayor extensión territorial en el estado. Climáticamente se ubica en los grupos cálidos y semi-cálidos, con predominio del cálido subhúmedo con lluvias de verano, seguido por el clima semi-cálido húmedo con lluvias abundantes de verano.

Sitios de muestreo

Se seleccionaron dos plantaciones de cafetos en dos altitudes del municipio Villa Corzo. La primera se encuentra a 3.0 km de la cabecera municipal a 600 msnm, en las coordenadas 15° 54' y 31'' latitud N y los 93° 15' y 37'' longitud W. El cafetal se encuentra sobre un suelo franco de pH moderadamente ácido, de textura media, libre de carbonatos y de sales. Con muy alto porcentaje de materia orgánica. Deficiente en potasio y muy bajo contenido de azufre. En cuanto a la disponibilidad de micronutrientes, el suelo es pobre en zinc, moderadamente bajo en manganeso. Bajo contenido de cobre, muy pobre en boro. Bajo la sombra conformada predominantemente por árboles de *Mangifera indica* L., *Gliricidia sepium* L., *Cedrela odorata* L. e *Inga edulis* L.

El segundo sitio se encuentra en la localidad Nueva Reforma Agraria, a 1000 msnm, en las coordenadas 15° 09' y 31'' latitud N y los 93° 16' y 64'' longitud W sobre un suelo con pH moderadamente ácido, de textura media, libre de carbonatos y de sales, con muy alto porcentaje de materia orgánica. Deficiente en potasio, muy bajo contenido de azufre. En cuanto a la disponibilidad de micronutrientes, el suelo es pobre en zinc, moderadamente bajo en manganeso, bajo contenido de cobre y muy pobre en boro. Predominan los árboles de sombra de *Conostegia xalapensis* B., *Platymiscium yucatanum* S., y *Ficus carica* L. En cada sitio se establecieron al azar 5 parcelas de 20

x 20 metros, y en cada una se seleccionaron 2 plantas al azar con características similares, considerándose cada una como una unidad experimental, para un total de 10 repeticiones en cada sitio de muestreo.

Material vegetal

La investigación se desarrolló en plantaciones de café (*Coffea arabica* L. var Costa Rica 95), de 4 años de plantadas a una densidad de 5000 plantas ha⁻¹ en sistemas agroforestales típicos de la región Frailesca, Chiapas.

Microclima

En cada una de las localidades se registraron la radiación fotosintéticamente activa (RFA, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) con un sensor Quantum Flux, Apogee Instruments®, colocado en el centro de las parcelas encima del dosel de los cafetos. La temperatura diurna del aire (°C) y la humedad relativa del aire (HR, %) se registraron con una micro estación meteorológica Watch Dog 1000 Series (Spectrum ® Technologies, Inc.). Todas las mediciones se realizaron durante tres días de cada mes desde las 7:00 a 17:00 horas, cada 30 minutos, desde febrero a noviembre de 2022.

Rasgos funcionales

Se midió la altura de la planta, desde la base del tallo hasta el ápice caulinar con un flexómetro (cm•planta⁻¹). El diámetro del tallo se tomó a 30 centímetros de la base del tallo con un vernier digital marca Lenfech Caliper. Con el mismo equipo se tomaron mediciones de la longitud de entrenudos ortotrópicos. La longitud de ramas plagiotrópicas se realizó con un flexómetro. Se contaron las hojas por planta, ramas por planta y nudos totales. Para determinar la masa foliar específica y el área foliar específica se tomaron 10 discos de hojas de la parte media de cada una de las cinco plantas seleccionadas y se colocaron en estufa a 80°C hasta peso constante. Luego se dividió el peso seco entre el área de cada disco para determinar la masa foliar específica (g cm⁻²) y viceversa para el área foliar específica (cm² g⁻¹).

Cuantificación de la plasticidad fenotípica

La cuantificación de la plasticidad fenotípica se calculó a través del índice de plasticidad de distancias relativas (RDPI) (Valladares *et al.*, 2006).

Análisis estadísticos

De acuerdo a las características del experimento y para los análisis estadísticos se consideró un modelo matemático lineal de efectos fijos. Los datos de microclima fueron analizados por estadística descriptiva, a través de los valores promedios, máximo, mínimo y desviación estándar, apoyados en histogramas de frecuencias y para demostrar la hipótesis del efecto de la altitud (localidades) sobre las variaciones diurnas del microclima se realizaron pruebas de t de Student, con un nivel de significación estadística de $p \leq 0.05$. Para comparar las variaciones en los rasgos funcionales entre las dos altitudes se realizaron pruebas de t de Student ($p \leq 0.05$), previa comparación de los supuestos (homogeneidad de varianza y normalidad de los datos). Para todos los análisis se utilizó el software STATISTICA V. 8.0 (StatSoft, 2008).

Resultados y discusión

Microclima

Los registros de radiación fotosintéticamente activa (RFA) fueron significativamente superiores en el cafetal situado a 1000 msnm ($p \leq 0.05$), excepto en el mes de noviembre (Tabla 1). El promedio anual de la radiación PAR a 1000 msnm fue de $252.23 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ estadísticamente mayor que a 600 msnm, oscilando entre 58.86 y $556.52 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Tabla 1) lo cual se atribuye a una menor densidad de árboles de sombra existente en este sitio. Este resultado confirma el efecto regulador que ejercen los árboles de sombra al atenuar la intensidad de la radiación solar que llega al dosel de los cafetos sombreados (Lisnawati *et al.*, 2017) y demuestra que la disminución de la radiación disponible, debido a la sombra, modifica las condiciones microclimáticas para el cultivo asociado (Andrade y Zapata, 2020).

Tabla 1. Variación mensual y anual de las variables del microclima en cafetales crecidos a 600 y 1000 msnm en la región Frailesca.

Meses	Variables	600 msnm	Desviación estándar	Mínimo	Máximo	1000 msnm	Desviación estándar	Mínimo	Máximo	t de Student	p
Febrero	HR (%)	50.0	0.4	49.5	50.4	57.86	0.9	56.61	58.8	-17.3	0.00
	T (°C)	27.4	0.1	27.2	27.6	28.39	0.1	28.20	28.6	-8.4	0.00
	Radiación PAR ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	155.4	48.1	100.0	220.1	410.05	101.5	270.24	556.5	-5.0	0.00
Mayo	HR (%)	70.8	0.3	70.4	71.2	70.50	0.1	70.28	70.7	2.1	0.05
	T (°C)	27.0	0.2	26.7	27.2	30.51	0.08	30.42	30.6	-36.0	0.00
	Radiación PAR ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	100.6	28.3	78.4	147.9	241.61	134.0	64.00	437.8	-2.3	0.05
Agosto	HR (%)	71.6	1.8	68.4	73.1	75.24	0.1	74.93	75.4	-4.2	0.00
	T (°C)	24.1	0.1	24.0	24.2	25.70	0.2	25.41	26.0	-12.3	0.00
	Radiación PAR ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	61.6	69.6	25.4	185.8	181.70	112.5	58.86	342.4	-2.0	0.08
Noviembre	HR (%)	67.5	0.4	66.8	67.8	69.74	0.4	69.08	70.3	-7.7	0.00
	T (°C)	23.1	0.09	23.0	23.2	23.15	0.09	23.02	23.2	0.0	1.00
	Radiación PAR ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	24.9	5.40	16.7	30.8	175.56	111.1	93.86	359.1	-3.0	0.02
Promedio	HR (%)	65.03	0.4	49.5	73.1	68.34	0.4	56.61	75.4	-1.3	0.19
	T (°C)	25.4	0.09	23.0	27.6	26.94	0.09	23.02	30.6	-1.9	0.06
	Radiación PAR ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	85.6	5.4	16.7	220.1	252.23	111.1	58.86	556.5	-4.7	0.00

A 600 msnm más de 250 registros de la RFA oscilaron entre 0 y $500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, mientras que a 1000 msnm 120 registros estuvieron el rango de 1000 a $1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Figura 1), inferior a los valores reportados por Andrade y Zapata (2020) al medio día en cafetales con bajo nivel de sombrío. En estas condiciones, es muy probable que los cafetos expuestos a mayor RFA se afecte más la

fotosíntesis, pues se ha demostrado que en *C. canephora* los puntos de compensación y saturación de radiación oscilan entre 10,7 – 27,6 y 552 - 660 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respectivamente (Rodríguez *et al.*, 2012) y aunque en cafetos arábigos (*C. arabica* L.) se reportan valores de saturación luminosa (600-700) más altos (DaMatta *et al.*, 2007), aún están por encima de los registrados en esta investigación. Sin embargo, la respuesta de las plantas a la RFA es compleja, pues depende de la especie y de la misma radiación solar, ya que el punto de compensación de luz es mayor en las hojas expuestas al sol y en plantas heliófilas que en las láminas foliares sombreadas y plantas umbrófilas (2006; Matos *et al.*, 2009; Andrade y Zapata, 2020) por lo que se requerirá profundizar en el efecto de la relación existente entre la fotosíntesis y la RFA en ambas altitudes para llegar a conclusiones más sólidas sobre la relación entre la radiación solar y el crecimiento del café.

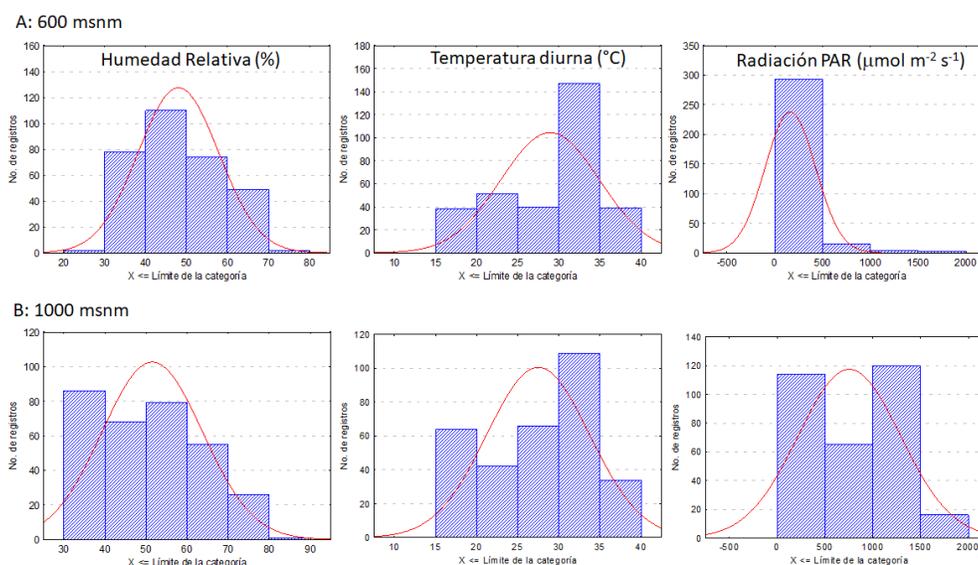


Figura 1. Histograma de frecuencias de los registros de temperatura diurna del aire, humedad relativa y la RFA en cafetales a 600 y 1000 metros sobre el nivel del mar en la región Frailesca.

La temperatura media diurna del aire fue superior a 1000 msnm en comparación con la menor altitud, asociado a una mayor radiación solar incidente con valores mínimos y máximos de 23.02 y 30.61 °C. A 600 msnm la temperatura diurna media anual osciló entre 23.02 y 27.67 °C; con valor medio anual de 25.45 (Tabla 1). Hay que mencionar que el rango de temperatura de 18 a 21 °C reportado como

óptimo para el cultivo del cafeto (Carvajal, 1984) incluye valores nocturnos, mientras que en nuestra investigación se reportan valores diurnos lo cual podría conducir a interpretaciones erróneas. Aun así, se podría afirmar que los valores promedios anuales (febrero a noviembre) de temperatura registrados a 600 msnm están dentro del rango adecuado y presumiblemente no debería afectar la conductancia estomática ni afectar el intercambio de gases, pues se ha demostrado que tales afectaciones deben producirse cuando las plantas crecen en un ambiente donde los registros de temperatura alcanza valores entre 30-35°C (Taiz y Zeiger, 2006; Andrade y Zapata, 2020).

El valor promedio anual de humedad relativa fue ligeramente superior a 1000 msnm, osciló entre 49.55 y 73.18 % mientras que a 600 msnm entre 56.61 y 75.42%. Se ha indicado que *Coffea arabica* L. crece y se desarrolla bien en un intervalo de 70-95% de humedad relativa (Carvajal 1984). En este sentido habría que prestar especial interés en futuras investigaciones pues la información obtenida con esta investigación demuestra que el microclima en ambos sitios de muestreo es más seco que el indicado para el género *Coffea*.

Rasgos funcionales

El diámetro del tallo, la cantidad de ramas por planta y la longitud de las ramas, nudos por planta y masa foliar específica fueron los rasgos funcionales que mayor respuesta presentaron a las variaciones en la altitud. Sin embargo, el crecimiento del eje ortotrópico (altura de la planta y longitud de entrenudos del eje ortotrópico) no cambió significativamente con la altitud (Figura 2 A y E), lo cual demuestra que esta variable no es sensible a los cambios producidos por la altitud y sugiere que no es un buen indicador para evaluar la plasticidad del cafeto a ambientes ecológicamente contrastantes. El total de nudos por planta fue siempre superior a menor altitud (Figura 2 F).

La cantidad de hojas por plantas (Figura 2 D), sólo presentó diferencias significativas a favor de los cafetos crecidos a 600 metros sobre el nivel del mar en el mes de agosto. La masa foliar específica (Figura 2 G) fue superior a mayor altitud en todos los meses, muy probablemente debido a una mayor incidencia de la RFA (Tabla 1).

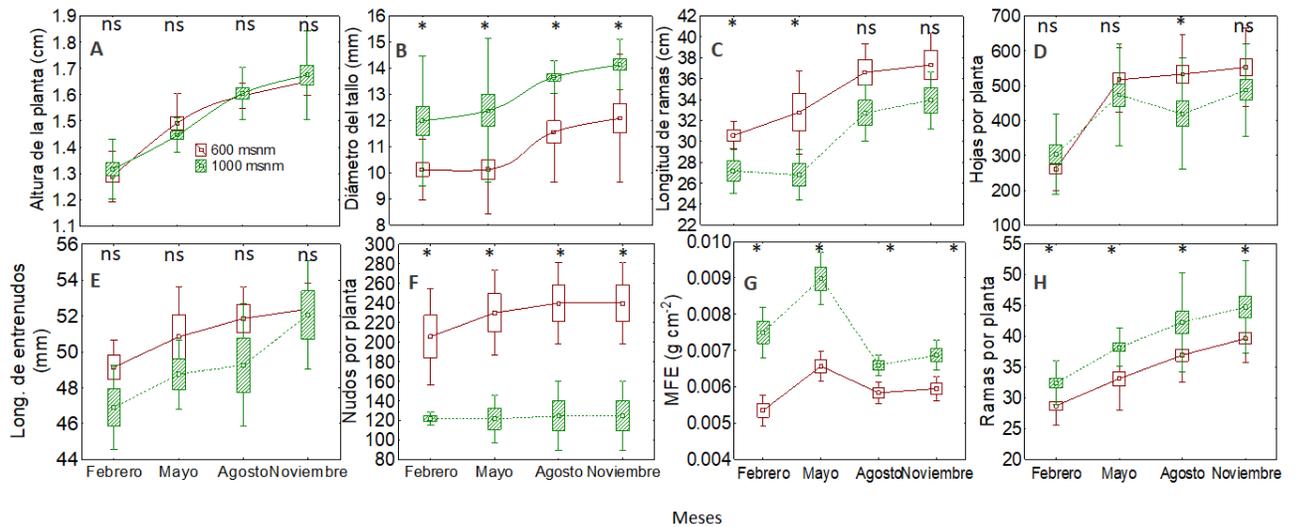


Figura 2. Cambios en los rasgos funcionales del crecimiento de cafetos crecidos a diferentes altitudes en la región Frailesca de Chiapas, México. ns: no significativo, * significativo ($p \leq 0.05$).

En este sentido, se ha demostrado que las hojas expuestas a mayor radiación solar son más gruesas en cafetos expuestos a mayor radiación solar y tienden a formar doble capa de parénquima de empalizada, lo cual le confiere mayor volumen interno para la asimilación de CO₂ (Rodríguez-Larramendi *et al.*, 2016).

De manera general, se observó una mayor emisión de ramas plagiotrópicas en los cafetos crecidos a 1000 msnm (Figura 2 H), contrario a lo observado en el crecimiento de las ramas (Figura 2 C), las cuales presentaron mayores valores a 600 msnm durante los meses febrero y mayo. El diámetro del tallo fue consistentemente superior en los cafetos crecidos a mayor altitud con diferencias superiores a los 2 cm en todos los momentos de muestreo (Figura 2 B), lo cual se debe a que morfológicamente los cambios más notables en los rasgos funcionales de las plantas en ambientes contrastantes se expresan mayormente en el número de hojas, diámetro de tallo y el área foliar específica (Zelada y Reynel 2019).

Las correlaciones canónicas entre los rasgos funcionales y las variables del microclima en ambas altitudes muestran una correlación significativa entre ambos grupos de variables (Tabla 2). A 600 msnm la humedad relativa favoreció el crecimiento en altura de los cafetos, así como la emisión de hojas, de ramas, de nudos y la acumulación de biomasa por unidad de superficie foliar (MFE); mientras que a 1000 msnm la humedad relativa favoreció también el crecimiento en altura de los cafetos, así como la emisión de hojas y ramas plagiotrópicas.

Tabla 2. Correlaciones canónicas entre los rasgos funcionales del crecimiento de los cafetos y las variables del microclima a 600 y 1000 metros sobre el nivel del mar.

Rasgos funcionales	600 msnm			R		
	Variables de microclima			Canónico	Chi ²	p
	HR	T	RFA			
	(%)	(°C)	(mol m ⁻² s ⁻¹)			
Altura de la planta	0.82	-0.86	-0.67			
Diámetro del tallo	0.30	-0.73	-0.57			
Hojas por planta	0.90	-0.65	-0.59			
Ramas por planta	0.66	-0.87	-0.60	0.98	72.39	< 0.01
Longitud promedio de ramas	0.53	-0.69	-0.72			
Nudos totales	0.62	-0.51	-0.20			
Longitud de entrenudos ortotrópicos	0.15	-0.25	-0.39			
MFE	0.60	-0.02	-0.30			
	1000 msnm					
Altura de la planta	0.73	-0.75	-0.55	0.97	59.05	< 0.01
Diámetro del tallo	-0.25	-0.44	0.09			

Hojas por planta	0.60	-0.21	-0.45
Ramas por planta	0.72	-0.63	-0.43
Longitud promedio de ramas	0.49	-0.76	-0.25
Nudos totales	-0.36	0.08	0.13
Longitud de entrenudos ortotrópicos	0.05	-0.28	0.04
MFE	-0.13	0.76	0.17

Sin embargo, incrementos en temperatura a 600 msnm inhibió la altura de la planta, el diámetro del tallo, la emisión de hojas y el crecimiento de las ramas. A 1000 msnm el efecto negativo de la temperatura se evidenció en la altura de los cafetos y el crecimiento de las ramas, mientras que la masa foliar específica incrementó proporcionalmente con la temperatura (Tabla 3). El efecto negativo de la radiación fotosintéticamente activa se observó solamente a menor altitud en la altura de las plantas y el crecimiento de las ramas plagiotrópicas.

La significativa relación observada entre la altura de la planta ($p \leq 0.01$), la mayor emisión de hojas y de ramas en los cafetos y la humedad relativa en ambas altitudes demuestra la alta relación que existe entre la humedad del aire imperante en la región Frailesca con el crecimiento vegetativo del cafeto, expuesto con anterioridad por Da Matta *et al.* (2007), aun cuando se ha demostrado que el café arábica requiere clima menos húmedo, comparable a la de las tierras altas de Etiopía (Carvajal, 1984), y aunque se ha documentado que los cafetos de la especie *Canephora* son más sensibles a ambientes más húmedos, todo parece indicar que las condiciones de humedad diurna del aire imperantes en la región Frailesca son favorables para el mejor crecimiento de los cafetos arábigos, específicamente de la variedad Costa Rica 95.

El efecto negativo de la temperatura diurna del aire en el crecimiento vegetativo del cafeto observado en ambas altitudes pero con mayor relevancia a 600 msnm por la cantidad de variables de crecimiento

afectadas (altura de la planta, diámetro del tallo, hojas por planta, ramas por planta y longitud de las ramas), en comparación con los cafetos crecidos a 1000 msnm (altura de la planta, ramas por planta, longitud de las ramas) demuestran que la exposición continua a temperaturas fuera del rango óptimo para el cafeto y superiores a 30 °C (Figura 1) no sólo afecta el crecimiento del cafeto, sino también expone a las plantas al amarillamiento de las hojas (Franco, 1958, Da Matta *et al.*, 2007) y modificaciones en la anatomía foliar y la masa foliar específica, sobre todo por su relación directa con la radiación solar (Rodríguez-Larramendi *et al.* (2016).

En cuanto al efecto negativo ejercido por la intensidad de la RFA observada solamente a 600 msnm (Tabla 2), se demuestra que incrementos en la radiación solar provocan disminución en el crecimiento de la planta (Fahl *et al.*, 1994; Rodríguez-Larramendi *et al.*, 2001) debido a una disminución en las tasas de crecimiento. En este sentido, Rodríguez-Larramendi *et al.* (2001) demostraron que en particular, la altura de la planta y el diámetro del tallo fueron las variables más afectadas por los niveles de luz solar, pero no así en el número de ramas. Llama la atención que la masa foliar específica, una variable sensible al efecto de la radiación solar (Rodríguez-Larramendi *et al.*, 2016) no estuvo correlacionada con la intensidad de la radiación solar, sino, como se ha mencionado antes, con la temperatura diurna del aire.

Los cálculos del índice de plasticidad basado en las distancias fenotípicas relativas para los rasgos funcionales de crecimiento de tallo (altura de la planta, diámetro del tallo, longitud de entrenudos ortotrópicos), ramas (ramas por planta, longitud de ramas y nudos totales por planta) y hojas (hojas por planta, masa foliar específica, área foliar específica) demostraron que los rasgos funcionales relacionados con el crecimiento foliar (área foliar específica y masa foliar específica) y el diámetro del tallo fueron los que mayor plasticidad fenotípica mostraron (Figura 3). Le siguen en ese orden los rasgos relacionados con el crecimiento de las ramas y la emisión de hojas por plantas. Estos resultados sugieren que tanto el diámetro del tallo como el crecimiento unitario foliar relacionado con la

anatomía de las hojas, son más sensibles a la altitud y presumiblemente estén relacionados con una mayor actividad metabólica en estas condiciones; aunque es de esperar que exista un efecto de las covariables del microclima que influya en el mayor crecimiento mostrado por los cafetos a mayor altitud.

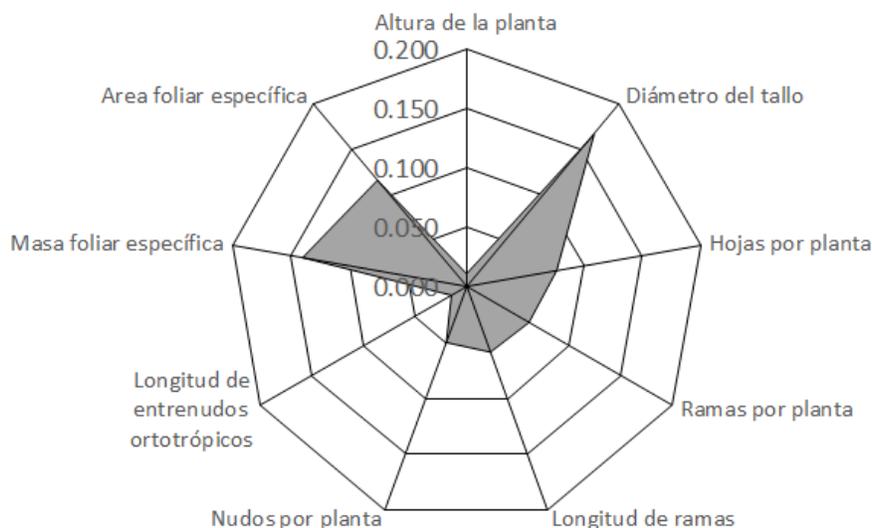


Figura 3. Índices de plasticidad basado en distancias fenotípicas relativas (RDPI) de rasgos funcionales de cafetos en dos altitudes de la región Frailesca de Chiapas, México.

Con relación a los mayores índices de plasticidad fenotípica observados para la masa y el área foliar específica Garnica y Saldarriaga (2015) señalaron que la variación del área foliar en gradientes altitudinales tropicales está directamente relacionado con el efecto de los factores ambientales, la geología, altitud y latitud, así como de los factores alométricos propios de cada especie. Se confirma entonces que el café es una planta con capacidad de modificar los rasgos morfológicos, demostrando su plasticidad a los cambios producidos con la altitud. Esta capacidad de modular el crecimiento con la altitud se refleja más en los rasgos morfológicos relacionados con la emisión y crecimiento de ramas plagiotrópicas, la emisión de nudos, el grosor del tallo y el crecimiento foliar.

Conclusiones

Los cafetos crecidos a 1000 msnm estuvieron expuestos a mayor radiación fotosintéticamente activa (RFA), humedad relativa y temperatura diurna del aire en comparación con el sitio localizado a 600 msnm. En ambas altitudes la RFA estuvo por debajo del punto de saturación y compensación luminosa reportado para el café. Mientras que la temperatura media mensual y anual se encuentra por encima de los valores reportados como óptimos para este cultivo.

Los rasgos funcionales asociados con el diámetro del tallo, el crecimiento foliar (hojas por planta, masa foliar específica y área foliar específica), así como la cantidad y la longitud de ramas plagiotrópicas fueron los más sensibles a las diferencias en la altitud; siendo los cafetos crecidos a 1000 msnm los que desarrollaron tallos más gruesos y mayor cantidad de nudos totales por planta, mientras que la masa foliar específica y la cantidad de ramas por planta fueron mayores en los cafetos crecidos a 600 msnm. La variedad Costa Rica 95 mostró plasticidad fenotípica en respuesta al gradiente altitudinal reflejada en incrementos en el índice de plasticidad de distancias relativas del diámetro del tallo y la masa foliar específica.

Bibliografía

- Andrade, H. J. y Zapata Arango, P. C. (2019). Desempeño ecofisiológico de café (*Coffea arabica* L.) cv. Castillo a la sombra en San Juan de Rioseco, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 11 (1), pp.15–27. doi:10.22490/21456453.2915.
- Bernado, W. de P., Rakocevic, M., Santos, A. R., Ruas, K. F., Baroni, D. F., Abraham, A. C., Pireda, S., Oliveira, D. da S., Da Cunha, M., Ramalho, J. C., *et al.* (2021). Biomass and leaf acclimations to ultraviolet solar radiation in juvenile plants of *Coffea arabica* and *C. Canephora*. *Plants*, 10 (4).doi:10.3390/plants10040640.
- Bote, A. D., Zana, Z., Ocho, F. L. and Vos, J. (2018). Analysis of coffee (*Coffea arabica* L.) performance in relation to radiation level and rate of nitrogen supply II. Uptake and distribution of nitrogen, leaf photosynthesis and first bean yields. *European Journal of Agronomy*, 92 (August 2016). Elsevier., pp.107–114. doi:10.1016/j.eja.2017.10.006.

- Carvajal, F. J. (1984). Cafeto: Cultivo y fertilización. pp. 3–254.
- Cavatte, P. C., Oliveira, Á. A. G., Morais, L. E., Martins, S. C. V., Sanglard, L. M. V. P. and Damatta, F. M. (2012). Could shading reduce the negative impacts of drought on coffee? A morphophysiological analysis. *Physiologia Plantarum*, 144 (2), pp.111–122. doi:10.1111/j.1399-3054.2011.01525.x.
- DaMatta, F.M., Ronchi, C.P, Sales, E.F., Araújo, J.B.S (2007). O café conilon em sistemas agroflorestais. In: Ferrão RG, Fonseca AFA, Bragança SM, Ferrão MAG, De Muner LH (eds), *Café Conilon*, pp.377-389. Seag/Incaper, Vitória
- Fahl, J. I., Carelli, M. L. C., Vega, J. and Magalhães, A. C. (1994). Nitrogen and irradiance levels affecting net photosynthesis and growth of young coffee plants (*Coffea arabica* L.). *Journal of Horticultural Science*, 69 (1), pp.161–169. doi:10.1080/14620316.1994.11515262.
- Franco, C. M. (1958) Efeito da temperatura do solo e suas variações no crescimento do cafeeiro. In *Congresso brasileiro de pesquisas cafeeiras* (Vol. 2, pp. 296-297).
- Garnica, J. y Saldarriaga, S. (2015). Diversidad funcional en un gradiente altitudinal del complejo de páramos Sumapaz - Cruz Verde. p.73.
- Gómez-Tosca, E. G., Alvarado-Castillo, G., Benítez, G., Cerdán-Cabrera, C. R. and Estrada-Contreras, I. (2021). Distribución potencial actual y futura de *Coffea arabica* L. en la subcuenca Decozalapa, Veracruz, México. *Madera y Bosques*, 27 (2), p.e2722070. doi:10.21829/myb.2021.2722070.
- Gordillo, A., Rodríguez, L., Salas, M. and Rosales, M. (2020). Effect of salicylic acid on the germination and initial growth of coffee (*Coffea arabica* L. var. Costa Rica 95). *Revista de la Facultad de Agronomía, Universidad del Zulia*, 38 (1). doi:10.47280/RevFacAgron(LUZ).v38.n1.03.
- Latifah, S., Muhdi, Purwoko, A. and Tanjung, E. (2018). Estimation of aboveground tree biomass *Toona sureni* and *Coffea arabica* in agroforestry system of Simalungun, North Sumatra, Indonesia. *Biodiversitas*, 19 (2), pp.590–595. doi:10.13057/biodiv/d190239.

- Lisnawati, A., Lahjie, A. M., Simarangkir, B. D. A. S., Yusuf, S.; Ruslim, Y. (2017). Agroforestry system biodiversity of Arabica coffee cultivation in North Toraja District, South Sulawesi, Indonesia. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 18 (2), pp.741–751. doi:10.13057/biodiv/d180243.
- Malhi, G. S., Kaur, M. and Kaushik, P. (2021). Impact of climate change on agriculture and its mitigation strategies: A review. *Sustainability (Switzerland)*, 13 (3), pp.1–21. doi:10.3390/su13031318.
- Matos, F. S., Wolfgramm, R., Gonçalves, F. V., Cavatte, P. C., Ventrella, M. C. and DaMatta, F. M. (2009). Phenotypic plasticity in response to light in the coffee tree. *Environmental and Experimental Botany*, 67 (2), pp.421–427. doi:10.1016/j.envexpbot.2009.06.018.
- Mofatto, L. S., Carneiro, F. de A., Vieira, N. G., Duarte, K. E., Vidal, R. O., Alekcevetch, J. C., Cotta, M. G., Verdeil, J. L., Lapeyre-Montes, F., Lartaud, M., *et al.* (2016). Identification of candidate genes for drought tolerance in coffee by high-throughput sequencing in the shoot apex of different *Coffea arabica* cultivars. *BMC Plant Biology*, 16 (1), BMC Plant Biology. doi:10.1186/s12870-016-0777-5.
- Nicotra, A. B., Atkin, O. K., Bonser, S. P., Davidson, A. M., Finnegan, E. J., Mathesius, U., Poot, P., Purugganan, M.D., Richards, C.L., Valladares, F., y van Kleunen, M. (2010). Plant phenotypic plasticity in a changing climate. *Trends in plant science*, 15(12), 684-692.
- Ovalle-Rivera, O., Läderach, P., Bunn, C., Obersteiner, M. and Schroth, G. (2015). Projected shifts in *Coffea arabica* suitability among major global producing regions due to climate change. *PLOS ONE*, 10 (4), pp.1–13. doi:10.1371/journal.pone.0124155.
- Rahn, E., Vaast, P., Läderach, P., van Asten, P., Jassogne, L. and Ghazoul, J. (2018). Exploring adaptation strategies of coffee production to climate change using a process-based model. *Ecological Modelling*, 371 (July 2017), Elsevier., pp.76–89. doi:10.1016/j.ecolmodel.2018.01.009.

- Rodríguez-Larramendi, L.; Valdés, R.; Verdecia, J.; Arias, L.; Medina, R.; Velasco, E. (2001). Growth, relative water content, transpiration and photosynthetic pigment content in coffee trees (*Coffea arabica* L.) growing at different sunlight regimes. *Cultivos Tropicales* 22: 37-41.
- Rodríguez-Larramendi, L. A. R., Hernández, F. G., Castro, H. G., Flores, M. F., Castañeda, J. C. G. and Ruiz, R. P. (2016). Anatomía foliar relacionada con la ruta fotosintética en árboles de café (*Coffea arabica* L., var. Caturra Rojo) expuestos a diferentes niveles de radiación solar en la Sierra Maestra, Granma, Cuba. *Acta Agronomica*, 65 (3), pp.248–254. doi:10.15446/acag.v65n3.46731.
- Rodríguez, N.F., Cavatte, P.C., Silva, P.E., Martins, S.C., Morais, L.E., Medina, E.F., y Damatta, F.M. (2012). Physiological and biochemical abilities of robusta coffee leaves for acclimation to cope with temporal changes in light availability. *Phy- siologia Plantarum*, 149 (1), pp. 45–55
- Valladares, F., Gianoli, E. and Gómez, J. M. (2007). Ecological limits to plant phenotypic plasticity. *New Phytologist*, 176 (4), pp.749–763. doi:10.1111/j.1469-8137.2007.02275.x.
- Valladares, F., Sánchez-Gómez, D., Zavala, M.A., (2006). Quantitative estimation of phenotypic plasticity: bridging the gap between the evolutionary concept and its ecological applications. *J. Ecol.* 94, 1103–1116. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.06.018>
- Zelada, H. y Reynel, C. (2019). Estimación de rasgos funcionales en dos especies arbóreas de una gradiente altitudinal tropical en el Centro de Perú. *Revista Forestal del Perú*, 34 (2), p.132. doi:10.21704/rfp.v34i2.1323.

Artículo 2. Variaciones en la fluorescencia de la clorofila en cafetos (*Coffea arabica* L. Var. Costa Rica 95) crecidos en un gradiente altitudinal de la región Frailesca.

Emanuel Romero-José¹, Miguel Ángel Salas-Marina¹, Alder Gordillo-Curiel¹, Luis Alfredo Rodríguez-Larramendi^{1*}

¹ Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. Facultad de ingeniería, Sede Villa Corzo. Carretera a Monterrey, Km 3.0 CP 30520, Chiapas, México. emanuel.romeroj@e.unicach.mx, alder.gordillo@unicach.mx, miguel.salas@unicach.mx.

*Corresponding autor: alfredo.rodriquez@unicach.mx

Resumen

El experimento se realizó en plantas de café *Coffea arabica* L. Var. Costa Rica 95, en dos altitudes (600 y 1000 msnm), con el objetivo de evaluar las variaciones en la fluorescencia de la clorofila, y contenido de clorofilas a y b en la región Frailesca, municipio de Villa Corzo Chiapas, México. La fluorescencia y el contenido de clorofilas se registraron durante los meses de febrero, mayo, agosto y noviembre. Se realizaron análisis de varianza considerando dos factores, las dos altitudes (Factor A), y los meses de muestreo (Factor B) para comprobar el efecto de la altitud, así como posibles variaciones estacionales en los parámetros medidos. Los resultados demuestran que a 600 msnm en los meses de febrero, mayo y noviembre, los parámetros Absorción por centro de reacción (ABS/CR), Disipación por centro de reacción (DIO/CR), atrapamiento por centro de reacción (TRO/CR), fueron superiores a 1000 msnm y el parámetro transporte de electrones por centro de reacción (ETO/CR) fue mayor en los meses de febrero, mayo y agosto. La radiación solar afectó la transferencia de energía a 600 msnm, en las relaciones ABS/CR, DIO/CR, TRO/CR, ETO/CR, rendimiento cuántico de la fotoquímica primaria (Fv/Fm) y producto cuántico máximo de excitación fotoquímica (Fo/Fm), a 1000 msnm los parámetros se mantienen en rangos óptimos. En la altitud de 600 la temperatura impactó negativamente en los indicadores fluorescencia inicial (Fo), fluorescencia máxima Fm, ABS/CR, DIO/RC, TRO/RC, ETO/RC, índice vital de funcionamiento (PI), mientras que a 1000 metros de altura se observa un óptimo a 28°C en los indicadores Fo/Fm, ABS/CR, DIO/CR, TRO/CR, ETO/CR. El contenido de clorofila a y b, fue superior en todos los meses a mayor altitud.

Palabras clave: Fluorescencia de la clorofila, *Coffea arabica* L.

Abstract

The experiment was carried out on coffee plants *Coffea arabica* L. Var. Costa Rica 95, at two altitudes (600 and 1000 masl), with the objective of evaluating variations in chlorophyll fluorescence and chlorophyll a and b content in the Frailesca region, municipality of Villa Corzo Chiapas, Mexico. Fluorescence and chlorophyll content were recorded during the months of February, May, August and November. Analysis of variance was performed considering two factors, the two altitudes (Factor A), and the sampling months (Factor B) to test the effect of altitude, as well as possible seasonal variations in the measured parameters. The results show that at 600 masl in the months of February, May and November, the parameters Absorption by reaction center (ABS/CR), Dissipation by reaction center (DIO/CR), trapping by reaction center (TRO/CR), were higher than at 600 masl, and the parameters Absorption by reaction center (ABS/CR), Dissipation by reaction center (DIO/CR), trapping by reaction center (TRO/CR), were higher than at 1000 masl. At 1000 masl and the parameter electron transport per reaction center (ETO/CR) was higher in February, May and August. Solar radiation affected the energy transfer at 600 masl, in the ABS/CR, DIO/CR, TRO/CR, ETO/CR, primary photochemical quantum yield (Fv/Fm) and maximum photochemical excitation quantum product (Fo/Fm) ratios, at 1000 masl the parameters remain in optimal ranges. At the altitude of 600 the temperature impacted negatively on the indicators initial fluorescence (Fo), maximum fluorescence Fm, ABS/CR, DIO/RC, TRO/RC, ETO/RC, vital performance index (PI), while at 1000 meters altitude an optimum is observed at 28°C in the indicators Fo/Fm, ABS/CR, DIO/CR, TRO/CR, ETO/CR. Chlorophyll a and b content was higher in all months at higher altitudes.

Key words: Chlorophyll fluorescence, *Coffea arabica* L.

Introducción

En las últimas décadas el cambio climático se ha acentuado a nivel global, presentándose sequías prolongadas y cambios en los regímenes hídricos (Şmuleac *et al.*, 2020), además de incrementos de hasta 1°C en la temperatura a nivel mundial (Gutiérrez, 2021). Este impacto es perceptible en ecosistemas tropicales con cambios en la distribución altitudinal de las

plantas, así como variaciones en los rasgos funcionales de las mismas, poniendo en riesgo a especies vegetales localizadas a lo largo del gradiente (Ruiz Osorio, 2013).

Está documentado que la intensidad lumínica modifica los procesos fotosintéticos, experimentando alteraciones y variación en la fotosíntesis asociados a los factores ambientales (Mathur *et al.*, 2018; Sharma *et al.*, 2020). En este sentido los gradientes altitudinales presentan heterogeneidad ambiental e influyen en los procesos bioquímicos de las plantas (Ruiz-Osorio, 2013), siendo determinantes en el crecimiento y desarrollo de las plantas (Casierra-Posada *et al.*, 2011).

Las variaciones en el funcionamiento del aparato fotosintético pueden ser cuantificables mediante la fluorescencia de la clorofila, un método no destructivo de manejo fácil, con una rápida respuesta (Delgadillo-Rodríguez *et al.*, 2017; Navarro-Cerrillo *et al.*, 2004). Mediante esta medición se obtienen datos del funcionamiento del Fotosistema II (PS-II), permitiendo identificar la influencia de los factores externos en los órganos fotosintéticos. Cuando la radiación solar incide sobre la planta ocurren simultáneamente tres procesos. Parte de la energía que ingresa a las membranas es químicamente útil, otra parte se disipa en forma de calor y la restante, en menor grado, se reemite en forma de energía luminosa con longitud de onda mayor a la recibida por la planta, conocida como fluorescencia de la clorofila (Delgadillo-Rodríguez *et al.*, 2017; González-Moreno *et al.*, 2008). A través de la fluorescencia de la clorofila se pueden calcular los índices vitales de la fotosíntesis en la fase dependiente de la luz, así como en la cadena de transporte de electrones y el producto máximo de la fotoquímica primaria (Snider *et al.*, 2018; Stirbet *et al.*, 2018).

El café ha sido objeto de disímiles investigaciones relacionadas con las respuestas fisiológicas de este cultivo ante la limitación de recursos (Rodríguez-Larramendi *et al.*, 2016), en las cuales destaca la radiación solar. Se ha demostrado que el café es una planta facultativa de sombra que muestra características adaptativas ante los cambios bruscos de exposición solar (Fahl *et al.*, 1994). A nivel mundial el cultivo de café se desarrolla en sistemas agroforestales bajo sombra que se localiza en los trópicos. La especie *arabica* es la más abundante y comercialmente más importante del mundo; crece y se desarrolla bien en

altitudes superiores a 1000 metros sobre el nivel del mar (Latifah *et al.*, 2018). Los cafetales cultivados bajo estas condiciones están expuestos a regímenes variables de radiación solar, activando diferentes mecanismos de regulación en complejos procesos de adaptación genética y aclimatación de las plantas (César *et al.*, 2013; Giraldo *et al.*, 2010). Para conocer los mecanismos fisiológicos y bioquímicos de adaptación y/o aclimatación de las plantas a factores externos se ha recurrido al estudio de la plasticidad fenotípica, lo cual no es más que la capacidad de una especie para generar diferentes fenotipos en respuesta a diferentes ambientes (Valladares *et al.*, 2007), las cuales pueden expresarse en ajustes, morfológicos, bioquímicos o fisiológicos (Rahn *et al.*, 2018).

Se ha demostrado que las condiciones climáticas se modifican con la altitud e influyen en el crecimiento y desarrollo del café y modifican la intensidad con que se realiza la fotosíntesis. Sin embargo, en la región Frailesca no se registran estudios en condiciones naturales que permitan conocer cómo responden los cafetos a la influencia de factores externos y así poder sentar bases para un mejor manejo agronómico las nuevas variedades introducidas en la región como Costa Rica 95.

El objetivo de esta investigación fue conocer las variaciones que se producen en la fluorescencia de la clorofila, así como en la concentración de clorofilas totales (clorofila a + b) en cafetos crecidos en un gradiente altitudinal de la región Frailesca de Chiapas.

Materiales y métodos

Localización

La investigación se llevó a cabo en dos sitios localizados en la región Frailesca, Chiapas, la cual está conformada por seis municipios: Ángel Albino Corzo, La Concordia, Montecristo de Guerrero, Villa Corzo, El Parral y Villaflores. Colinda al norte con las Regiones I Metropolitana y IV De Los Llanos, al este con la Región XI Sierra Mariscal, al sur con la Región IX Istmo Costa y al oeste con la Región II Valles Zoque. Su territorio ocupa 7987.19

Km 2, que representan el 10.7% de la superficie estatal, siendo la segunda región de mayor extensión territorial en el estado (Figura 1).

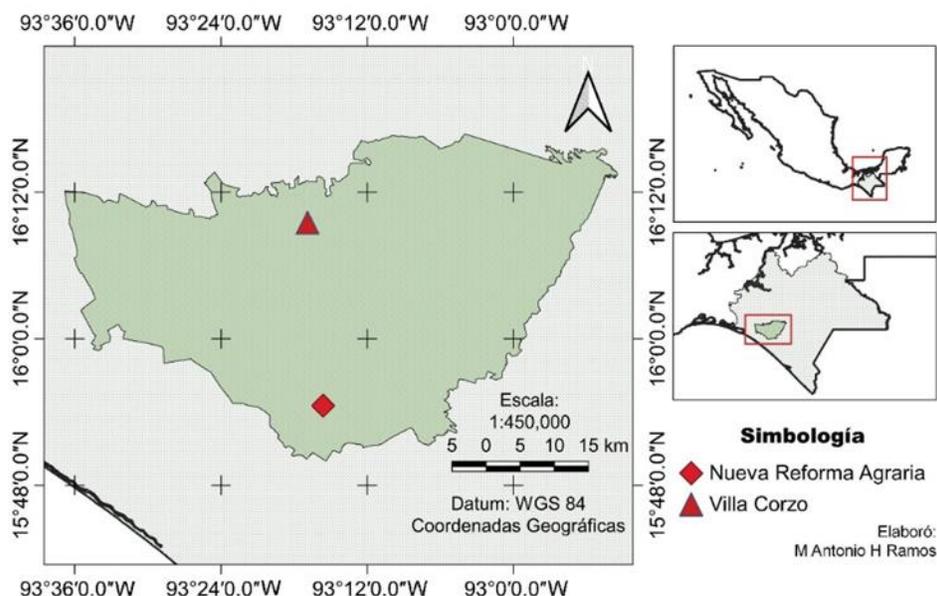


Figura 1. Localización del área de estudio y sitios de muestreo.

Esta región presenta climas de los grupos cálidos y semi-cálidos, con predominio del cálido subhúmedo con lluvias de verano, seguido por el clima semi-cálido húmedo con lluvias abundantes de verano. Las características del microclima en ambos sitios mostraron variaciones estacionales en la radiación fotosintéticamente activa (RFA), la temperatura diurna del aire y la humedad relativa (Figura 2).

La RFA osciló entre 58.86 y 556.52 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y disminuyó durante los meses de febrero a noviembre. La temperatura media diurna del aire fue superior a 1000 msnm en comparación con la menor altitud, asociado a una mayor radiación solar incidente con valores mínimos y máximos de 23.02 y 30.61 °C y el valor promedio anual de humedad relativa fue ligeramente superior a 1000 msnm y osciló entre 49.55 y 73.18 % a 600 msnm y entre 56.61 y 75.42% a 600 msnm.

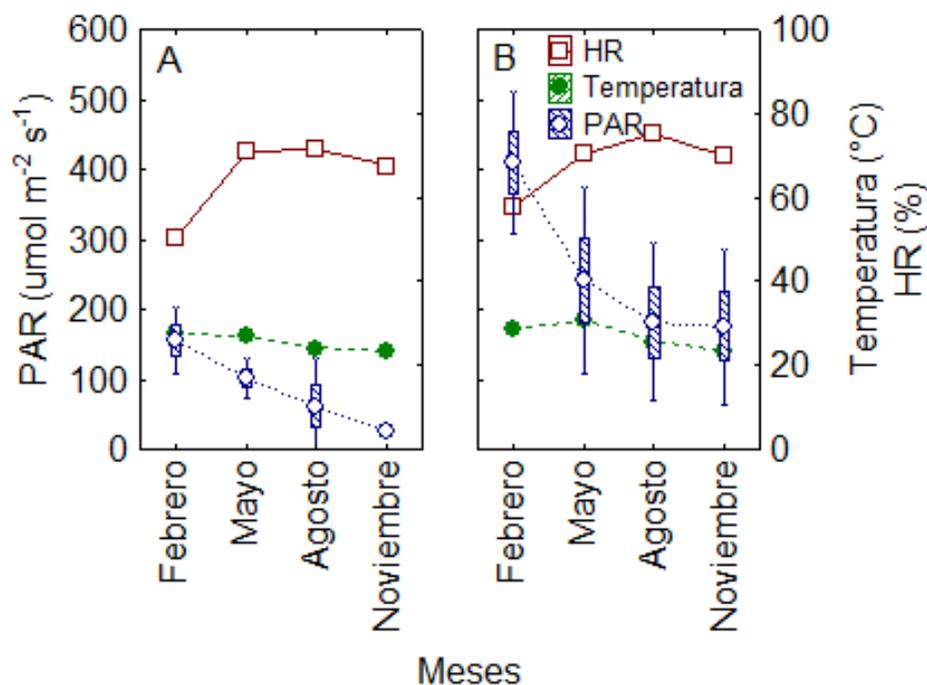


Figura 2. Variaciones mensuales de la radiación fotosintéticamente activa (PAR), la temperatura del aire y la humedad relativa en ambas altitudes.

Sitios de muestreo

Se seleccionaron dos plantaciones de cafetos en dos localidades del municipio Villa Corzo. La primera se encuentra a 600 msnm, en las coordenadas 15° 54' y 31'' latitud N y los 93° 15' y 37'' longitud W. Bajo la sombra conformada predominantemente por árboles de mango (*Mangifera indica* L.), mata ratón (*Gliricidia sepium* L.) y Cedro (*Cedrela odorata* L.) y Machetón (*Inga edulis* L.). El segundo sitio se encuentra en la localidad Nueva Reforma Agraria localizada a 1000 msnm, en las coordenadas 15° 09' y 31'' latitud N y los 93° 16' y 64'' longitud W. Predominan los árboles de sombra de las especies *Conostegia xalapensis* B, *Platymiscium yucatanum* S, y *Ficus carica* L.

Material vegetal

El estudio se realizó en cafetos (*Coffea arabica* L.) de la variedad Costa Rica 95 de 4 años de plantadas a una densidad de 5000 plantas ha⁻¹. En cada sitio se establecieron al azar 5 parcelas de 20 x 20 metros, y se seleccionaron 2 plantas al azar por parcela con características

fenotípicas similares, considerándose cada una como una unidad experimental, para un total de 10 repeticiones en cada sitio de muestreo.

Fluorescencia de la clorofila

Las mediciones de fluorescencia de la clorofila se realizaron durante los meses de febrero, mayo, agosto y noviembre de 2021, a las 07:00, 09:00, 13:00 y 17:00 horas, con un Fluorómetro OS-30p+ (OptiScience®) en hojas de la parte media de diez plantas por sitio de muestreo. El tiempo de adaptación a la oscuridad fue de 20 minutos. La fluorescencia se detectó utilizando un fotodiodo, después de haber atravesado un filtro (50 % transmitancia a 750 nm). El análisis de fluorescencia de la clorofila se realizó mediante la aplicación del protocolo OJIP test (Strasser et al., 2000), considerando la información de los diferentes flujos energéticos que se producen en el aparato fotosintético. Del conjunto de parámetros OJIP, se registraron la fluorescencia inicial (F_o), la fluorescencia máxima (F_m), fluorescencia variable (F_v), producto cuántico máximo de la fotoquímica primaria (ϕP_o), producto cuántico máximo de disminución de excitación fotoquímica (ϕD_o), la eficiencia con que un excitón atrapado puede mover un electrón después de Q_A^- (ϕE_o), así como índices de funcionamiento (PI_{ABS}) y la fuerza impulsora de la fotosíntesis ($DFABS$), de acuerdo con los parámetros descritos por González-Moreno et al. (2008) (Tabla 1).

Tabla 1. Parámetros de formulación del análisis JIP usando datos de la fase rápida de la emisión de fluorescencia (González Moreno *et al.*, 2008).

Parámetros Técnicos		
Fluorescencia a 50 μ s	F_o	
Fluorescencia máxima	F_m	
Fluorescencia variable a 2 ms	F_v	= $F_m - F_o$
Pendiente desde el origen de la fluorescencia	M_o	= $(F_{300\mu s} - F_o) / (F_m - F_o)$
Fluorescencia variable relativa a 2 ms	V_j	= $(F_{2ms} - F_o) / (F_m - F_o)$
Flujos específicos expresados por centro de reacción (reaction center, RC)		

Absorción por RC	ABS/RC	= (Mo/Vj)/(1-Fo/Fm)
Atrapamiento a tiempo 0 por RC	TRo/RC	= Mo/Vj = (ABS/RC) φ _{Po}
Disipación a tiempo 0 por RC	DiO/RC	= (ABS/RC) - (TRo/RC)
Transporte electrónico a tiempo 0 por RC	ETo/RC	= (TRo/RC) ψ _o

Eficiencias cuánticas (relaciones de flujo)

Producto cuántico máximo de la fotoquímica primaria	φ _{Po}	= TRo/ABS = (Fm-Fo)/Fm = 1 - (Fo/Fm) = Fv/Fm
Producto cuántico máximo de disminución de excitación fotoquímica	φ _{Do}	= DiO/ABS = 1 - φ _{Po} = Fo/Fm
Probabilidad con la que un excitón atrapado puede mover un electrón después de QA-	ψ _o	= ETo/TRo = 1 - Vj
Probabilidad de un fotón absorbido mueva un electrón después de QA-	φ _{Eo}	= φ _{Po} - ψ _o = (TRo/ABS)/(ETo/TRo) = ETo/ABS = (1-Fo/Fm)(1-Vj)

Índices de vitalidad

Índice de potencial fotosintético	PI _{ABS}	= [RC/ABS][φ _{Po} /(1- φ _{Po})] [ψ _o /(1- ψ _o)]
Fuerza motriz de la fotosíntesis	DF _{ABS}	= Log [PI _{ABS}]

Concentración foliar de clorofilas totales

Las lecturas de clorofilas se realizaron en el quinto par de hojas de las ramas plagiotrópicas centrales de las diez plantas seleccionadas, durante los meses de febrero, mayo, agosto y noviembre, con un medidor portátil MC-100 (Apogee Instruments®). Los datos se expresaron en μmol m⁻² (AF).

Análisis estadísticos

Se realizaron análisis de varianza bifactorial considerando las dos altitudes (factor A) y los meses de muestreo (factor B) para comprobar el efecto de la diferencia en altitud, así como

posibles variaciones estacionales en los parámetros de fluorescencia de la clorofila ($p \leq 0.05$), previa comparación de los supuestos de homogeneidad de varianza con las pruebas de Hartley (1942), Cochran (1952). Los análisis se realizaron con el software STATISTICA.

Resultados y Discusión

El análisis de varianza factorial no detectó interacción estadística significativa y ni se encontró un efecto significativo del gradiente altitudinal sobre la fluorescencia inicial (Figura 3 A); pero si se observó un efecto significativo ($p \leq 0.05$) del gradiente altitudinal y los meses de muestreo en la fluorescencia máxima (Figura 3 B).

Las variaciones estacionales observadas en ambas variables (F_o y F_m) pudieran atribuirse al efecto que ejercen las condiciones microclimáticas sobre el funcionamiento del fotosistema II independientemente del efecto que podría provocar el gradiente altitudinal. La fluorescencia inicial (F_o) disminuyó de forma lineal de marzo a agosto para mantenerse estable hasta noviembre (Figura 3 A); mientras que para la fluorescencia máxima se observó una tendencia de incremento de agosto y diciembre (Figura 3 B), momento en los que la densidad de flujo fotónico fotosintético y la temperatura diurna del aire disminuyeron (Figura 2).

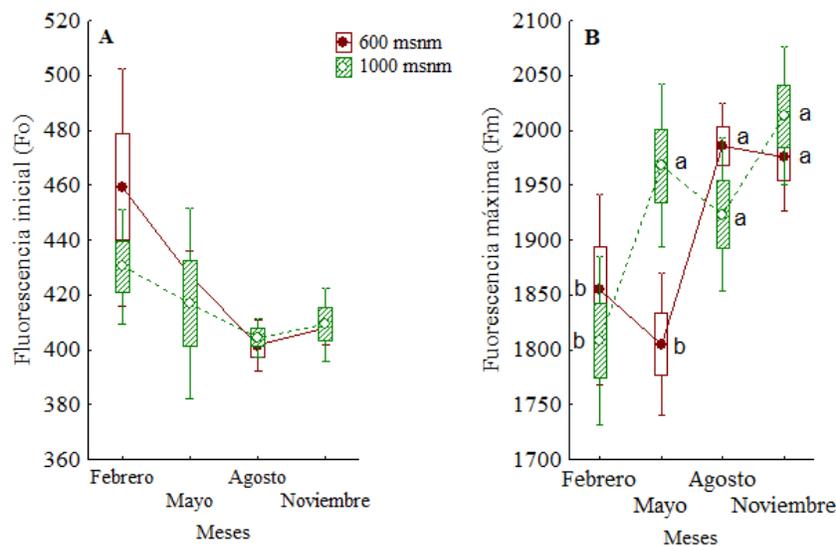


Figura 3. Variaciones estacionales de los parámetros de fluorescencia de la clorofila (A: fluorescencia inicial, F_o , B: Fluorescencia máxima, F_m) en cafetos cultivados en un gradiente altitudinal de la región Frailesca, Chiapas.

Los mayores valores de F_o en febrero y mayo en ambas altitudes son indicadores de alteraciones estructurales del centro colector de la radiación solar del PSII lo cual conduce a afectaciones en el proceso fotosintético (Carrasco y Escobar 2003) y probablemente causados por el incremento en la radiación solar y la temperatura durante esos meses, provocando fotoinhibición y como consecuencia una alteración en el centro colector de la radiación solar, es decir, a nivel de pigmentos y de complejos proteína-clorofila (Carrasco y Escobar 2003). El aumento de F_o puede ser consecuencia de los complejos captadores de luz del PS II, indicando que el exceso de radiación solar inhibe el flujo de electrones por menor transferencia de Q_A a Q_B (Partelli *et al.*, 2009; Kalaji *et al.*, 2016). Estos resultados son acordes con lo observado por De Abreu *et al.* (2022) quienes encontraron que a 22 días posteriores a la exposición solar en plántulas de café (*Coffea arabica* L.), se registró un valor máximo en F_o de 11,293 y un mínimo de 5,791 en la época de otoño. Estos mismos autores encontraron que en verano las plántulas mostraron un aumento en la F_o , con valores de 8,798 al día siguiente de su exposición a pleno sol. Sin embargo en *Fragaria* sp las plantas en condiciones lumínicas óptimas tuvieron un valor promedio de F_o 340,33 (Casierra-Posada *et al.*, 2011). Los flujos de energía por centro de reacción se transcriben en la Figura 4. En todos los casos se observó un efecto significativo de la interacción entre los factores gradiente altitudinal a 600 msnm y en los meses de febrero, mayo y noviembre muestreados.

El flujo de energía absorbida por centro de reacción (ABS/CR) fue mayor en ambas altitudes durante los meses de mayor exposición a la radiación PAR (Figura 4 A), mientras que los menores valores se registraron en agosto y noviembre, en una clara relación con los meses de menor radiación fotosintéticamente activa (RFA) y temperatura diurna del aire, pero con mayores valores de humedad atmosférica. Similar tendencia se observó para la cantidad de energía disipada en forma de calor por centro de reacción (Figura 4 B), mientras que la cantidad de energía atrapada por centro de reacción (Figura 5) y el transporte de electrones (Figura 5) disminuyó en mayo para luego mostrar una recuperación en agosto y mayo en la menor altitud.

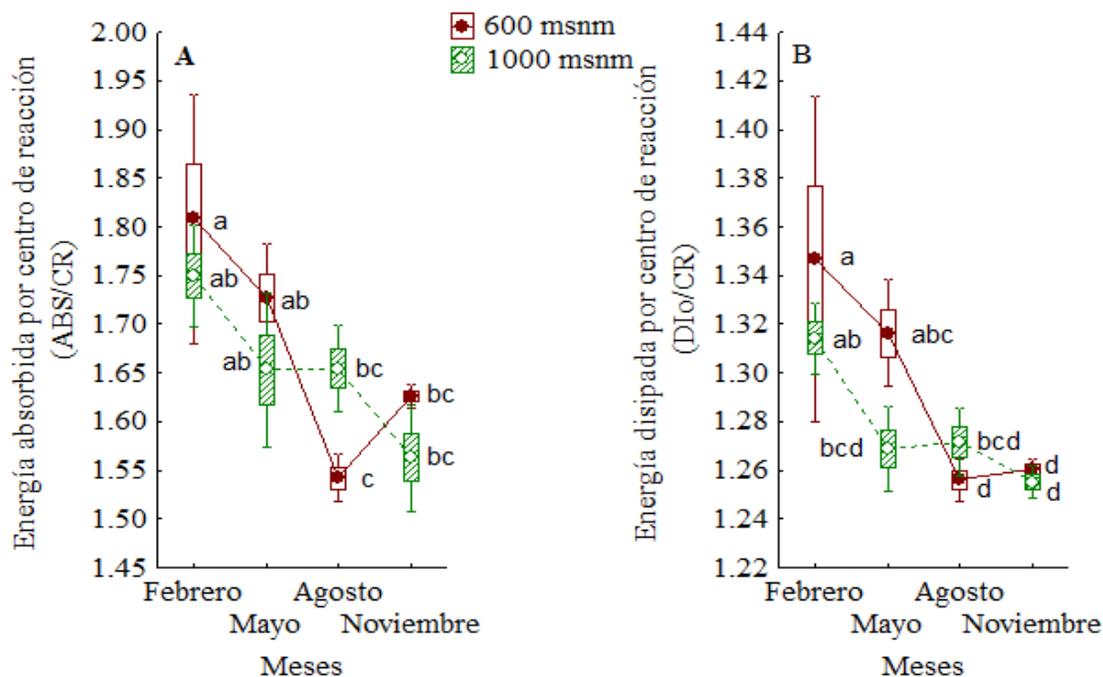


Figura 4. Variaciones estacionales de la energía absorbida (A) y disipada (B) por centro de reacción en cafetos crecidos en un gradiente altitudinal de la región Frailesca de Chiapas.

A 600 msnm el aumento de ABS/CR (Figura 4 A) se debe a la baja disponibilidad lumínica, como un mecanismo para absorber mayor cantidad de fotones, reflejando un mayor tamaño aparente en los centros de reacción del PS II, menor cantidad de complejos cosechadores de luz, por ende menor cantidad de clorofilas totales (Figura 12). González-Moreno *et al.* (2008; Rodrigues *et al.*, 2016). En la misma altitud se observa el comportamiento similar en la disipación de energía Dio/RC (Figura 4 B) y se infiere que la menor cantidad de centros de reacción activos, es la razón por la cual hay mayor energía disipada (Mihaljević *et al.*, 2021). En el flujo máximo de excitones atrapados por unidad activa del PS II (TRo/CR), fue similar en los meses de febrero y mayo con una decaída en el mes de agosto y restableciéndose en noviembre (Figura 5 A), está relacionada con la cantidad de fotones absorbidos, y disipados, reflejando la cantidad atrapada por centro de reacción (Rodrigues *et al.*, 2016; Stirbet *et al.*, 2018). Concomitantemente a 1000 msnm el aumento de ETo/CR (Figura 5 B) se debió al incremento a la exposición de radiación solar, aumentando este parámetro durante los meses de mayor RFA, dificultando el paso de electrones de Q_A a Q_B, con implicaciones en la

capacidad de pool de PQ (plastoquinona) (De Oliveira *et al.*, 2009), mediante procesos fotohinibitorios debido a la temperatura supra óptima (Partelli *et al.*, 2009)

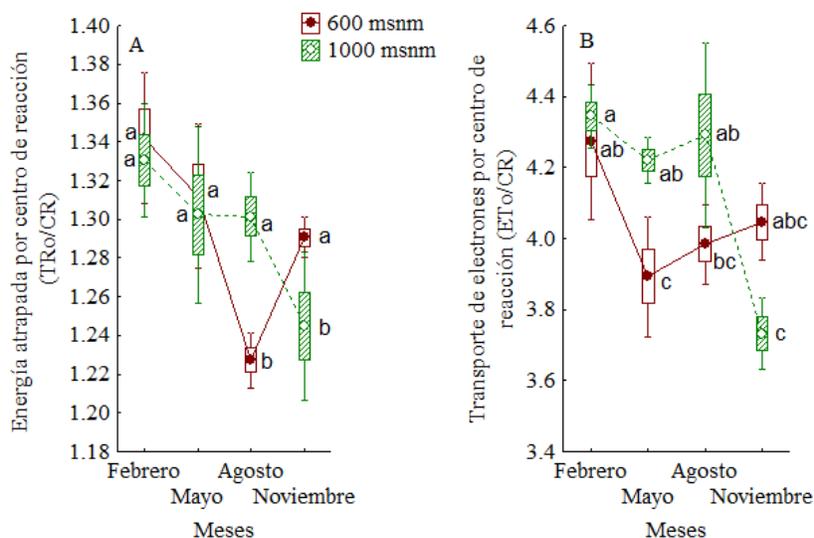


Figura 5. Variaciones estacionales de la energía atrapada (A) y transporte de electrones (B) por centro de reacción en cafetos crecidos en un gradiente altitudinal de la región Frailesca Chiapas.

Las variaciones de los flujos de energía por centro de reacción, así como el efecto que ejerce la intensidad de la radiación PAR sobre el rendimiento cuántico de la fotoquímica primaria (F_v/F_m) se observa más en detalles en la Figura 6. En todos los casos se observaron relaciones lineales negativas (F_v/F_m y PI_{abs}) y positivas (ABS/CR , TR_o/CR), ET_o/CR y Dio/CR). Estos aumentos en los valores mencionados son indicativos de inactivación de algunos centros de reacción (Mihaljević *et al.*, 2021). De estos resultados se deduce que a menor altitud los cafetos estuvieron sometidos a mayor estrés producto de la radiación solar incidente, en este caso demostrado a través de líneas de regresión; consecuencia de una mayor densidad de sombra (Lisnawati *et al.*, 2017). De los resultados mostrados se infiere que la cantidad de energía absorbida, disipada y atrapada en el centro de reacción del PS II es proporcional a la intensidad de radiación solar PAR, mientras que el índice de potencial fotosintético (PI_{abs}) se afecta de forma lineal con incrementos en la intensidad de la radiación PAR a menor altitud.

Resulta interesante recalcar que aunque el análisis de varianza no detectó un efecto significativo y específicamente entre altitudes, los análisis de regresión realizados entre los flujos específicos de energía y la RFA en ambas altitudes demostró que a 600 msnm la dependencia lineal entre las variables de la fluorescencia de la clorofila y la RFA fue más marcada (Figura 6), lo cual nos conduce a pensar que los daños por fotoinhibición en los cafetos se hace más evidente a menor altitud; una condición que bien puede servir de base a la hora de decidir dónde ubicar las plantaciones comerciales de café con la variedad Costa Rica 95.

El aumento en la fluorescencia mínima (F_o), y disminución de la fluorescencia máxima (F_m), en relación con radiación fotosintéticamente activa a 600 msnm, está relacionado con la captación de luz, por los pigmentos de antena ligadas a la transferencia de electrones de Q_A a Q_B . La fluorescencia máxima (F_m) se relacionó negativamente con la RFA, lo que indica que un estrés prolongado produce disminución en la F_m (Cherono *et al.*, 2021). El aumento de la F_o es consecuencia del sombreado como lo demuestra Aimi *et al.* (2020), en la especie de *Myrocarpus frondosus*, incrementando los valores por reducción del 50% por sombreado, esto indica una merma en la capacidad al transferir energía de los complejos de antena a los centros de reacción. Por ello las relaciones ABS/CR , TR_o/CR , ET_o/CR y Dio/CR aumentan, y se ven afectadas en la misma altitud, presentado una relación negativa en F_v/F_m y F_v/F_o , simultáneamente se refleja en uno de los índices vitales de funcionamiento (PI_{ABS}) con una relación desfavorable. Resultados similares en *Coffea arabica* L. a 734 msnm han sido reportados anteriormente e indicando significativas disminuciones en el tamaño del pool de Q_A (Rodrigues *et al.*, 2016).

La F_v/F_m es un indicador sensible al estrés midiendo potencial del desempeño fotosintético de PS II. La disminución observada a 600 msnm, junto con la Dio/RC , indica la activación de mecanismos fotoprotectores, realizando ajustes en el tamaño de la antena, disipando la energía (Delgadillo-Rodríguez *et al.*, 2017).

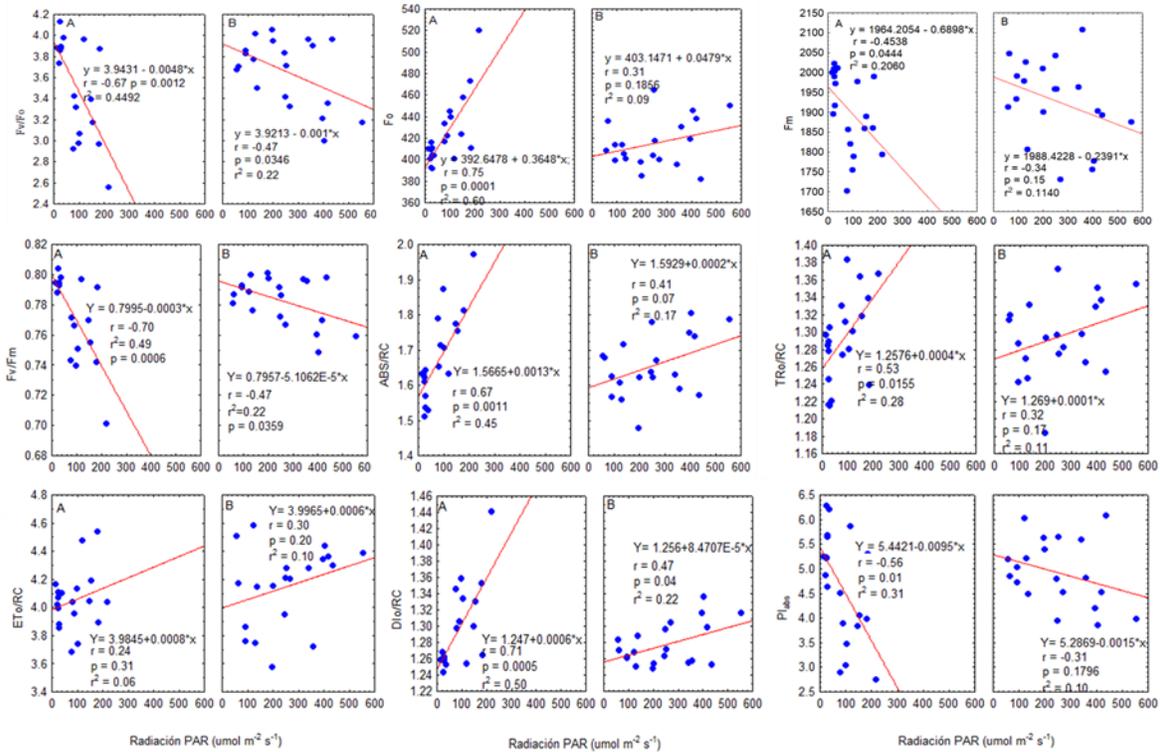


Figura 6. Efecto de la incidencia de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) en los flujos específicos de energía en el fotosistema II en cafetos cultivados a 600 (A) y 1000 (B) metros sobre el nivel del mar.

Los parámetros de Fv/Fm y Fv/Fo son similares, y ambos se usan para evaluar estrés abiótico (de Olivera *et al.*, 2009). Estos resultados concuerdan con los De Abreu *et al.*, (2022) quienes observaron que altas intensidades lumínicas provocaron fotoinhibición en *C. arabica* L, a densidades de flujo fotónico de 600 a 700 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, efecto asociado a afectaciones en el aparato fotosintético (PSII), cuando los valores son menores a 0.75, sin embargo rangos entre 0.75 y 0.85 son óptimos (Rodríguez *et al.*, 2016), lo cual coincide con lo sucedido en esta investigación a 1000 msnm. Las reducciones en Fv/Fm y Fm a 600 msnm conforme incrementa la radiación solar (Figura 6), sugieren daños en los centros de reacción por fotoinhibición en *Coffea arabica* L. (Mariño, 2014). Parámetros similares observados en algas debajo de 0.65 son indicativos de algún tipo de estrés fisiológico (Pinilla, 2006). Para los valores de ABS/CR y TRO/CR menores a 600 msnm son acordes con estudios observados en plantas de manzana, como consecuencias al estrés abiótico (Mihaljević *et al.*, 2021). Por

otra parte, estos resultados son similares a los encontrados en plántulas de *Coffea arabica* L. expuestas a sol, lo que refleja una disociación física de los centros de reacción, indicando que la actividad de del PS II se compromete en la transición de sombra a sol (De Abreu *et al.*, 2022).

Otros hallazgos indican que los valores de Fv/Fm para una gran variedad de plantas adaptadas a oscuridad es de 0.75-0.85 (Rodrigues *et al.*, 2016; Carpenedo *et al.*, 2020; Mihaljević *et al.*, 2021; De Abreu *et al.*, 2022). El parámetro Fv/Fm es una estimación del rendimiento cuántico del PSII y su disminución es indicativa del daño por fotoinhibición, de acuerdo a Krause & Weis (1991), Horton *et al.* (1994), Demming-Adams *et al.* (1996), Maxwell & Johnson (2000). Las reducciones en los valores en las razones Fv/Fm (6.4%) y, especialmente en la razón Fv/Fo sugieren la presencia de daños foto-inhibitorios en los centros de reacción del PSII, que afectaron el desempeño fotosintético. Según Maxwell y Johnson (2000) la razón Fv/Fo es un indicador sensible para estimar la foto-inhibición, por tanto, las reducciones en esta relación indican que se presenta una foto-inhibición crónica, es decir, limitaciones fotoquímicas de la fotosíntesis.

La fluorescencia mínima (Fo) fue mayor conforme aumento la temperatura (Figura 7). Este incremento lineal positivo en la fluorescencia inicial (Fo), indica estrés (De Abreu *et al.*, 2022), por oxidación de los centros de reacción, González Moreno *et al.* (2008) quien observo el decaimiento de Fo a una temperatura de 45° C, respecto al testigo (25° C). Estas regresiones comprueban lo mencionado por Kalaji *et al.*, (2016) quienes observaron inactivación fotoquímica del PS II por elevación de Fo, y una caída de Fm consecuencia de la temperatura (Figura 7).

El aumento de la temperatura está asociado con la reducción de la fluorescencia máxima (González Moreno *et al.*, 2008). Disminuciones en la Fm generalmente están asociados a temperaturas elevadas pero no dañinas para la planta, tal y como pudo haber ocurrido durante los meses de febrero y mayo, cuando se registraron temperaturas diurnas que oscilaron entre 27.9 y 28.8 °C en ambas altitudes, superiores a los meses de agosto y noviembre (24.9 y 23.15 °C respectivamente). Tales incrementos en las temperaturas pudieron causar los aumento observados en Fo, indicando un mecanismo de protección o regulación (Ceacero *et*

al., 2012), y la disminución en Fm acompañado por una inhibición en la actividad del PS II, dicha disminución puede estar relacionada con la desnaturalización de proteínas clorofílicas, (Carrasco y Escobar 2003; Kalaji *et al.*, 2016).

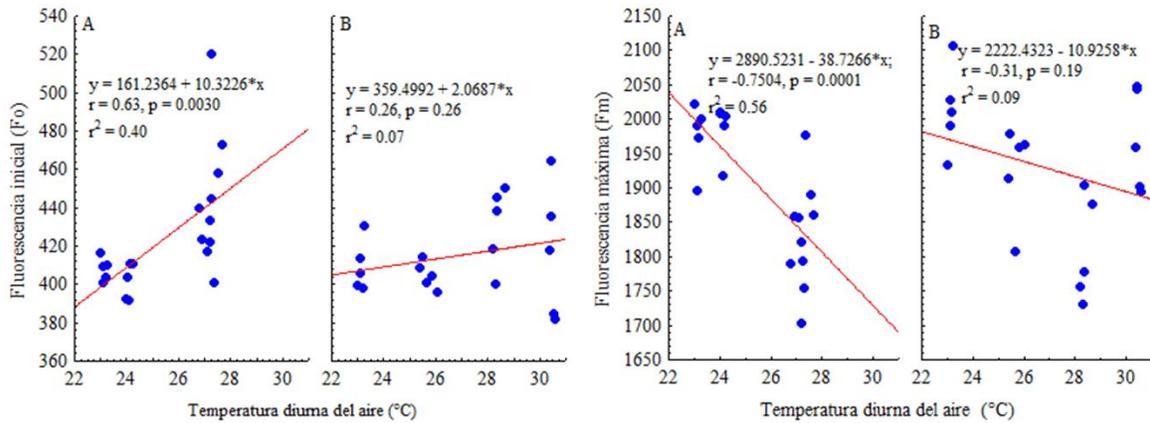


Figura 7. Efecto de la temperatura diurna del aire en la fluorescencia inicial y la fluorescencia máxima en cafetos crecidos a 600 (A) y 1000 (B) metros sobre el nivel del mar en la región Frailesca, Chiapas.

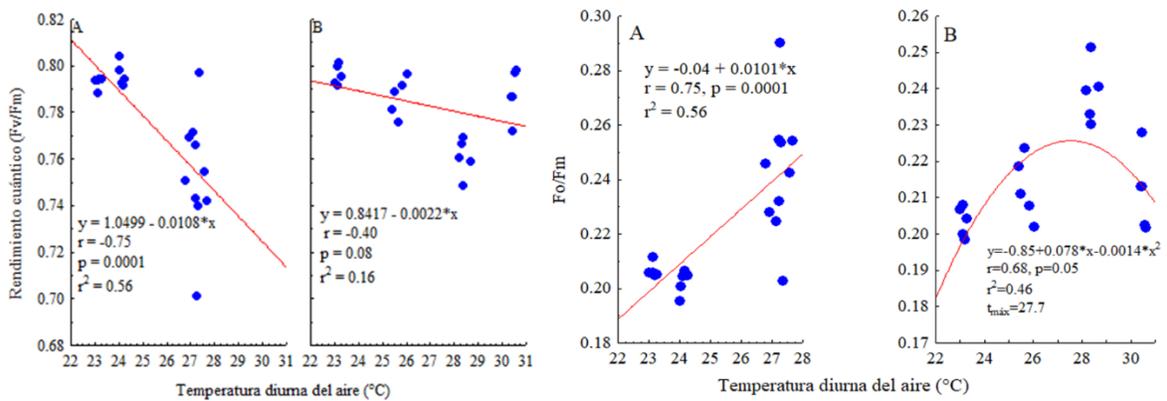


Figura 8. Efecto de la temperatura diurna del aire en el rendimiento cuántico de la fotoquímica primaria (F_v/F_m) y el Producto cuántico máximo de disminución de excitación fotoquímica (F_o/F_m) en cafetos crecidos a 600 (A) y 1000 (B) metros sobre el nivel del mar en la región Frailesca de Chiapas.

Se observó una regresión negativa en la relación Fv/Fm y la temperatura diurna del aire a 600 msnm, con valores inferiores a 0.75 lo que refleja un nivel deficiente (Rodrigues *et al.*, 2016). A 1000 msnm el parámetro Fv/Fm se mantiene en los rangos óptimos 0.75 – 0.85 con temperaturas supra óptimas (Figura 8). La Fv/Fm se utiliza como medida de la eficiencia cuántica potencial del fotosistema II (PS II), obteniendo datos de su desempeño fotosintético, debido a su sensibilidad al estrés; causando disminuciones en esta relación (Pinilla, 2006; De Oliveira *et al.*, 2009; Delgadillo-Rodríguez *et al.*, 2017). Resultados encontrados por De Oliveira *et al.* (2009) en *Coffea arabica* L. hacen evidente una disminución debido a la temperatura. Este efecto también se observa en plantas de café (*Coffea arabica* L.), con un valor mínimo de Fv/Fm de 0.43 y máximo de 0.60 expuestas a pleno sol con un temperatura oscilante de 24 a 30°C (De Abreu *et al.*, 2022). En el producto cuántico máximo de excitación fotoquímica (Fo/Fm) en relación a la temperatura, se observa una regresión lineal positiva a 600 msnm. Sin embargo a 1000 msnm es cuadrática con un óptimo o máximo de 27.7 °C en la especie *Coffea arabica* L. Var. Costa Rica 95 (Figura 8).

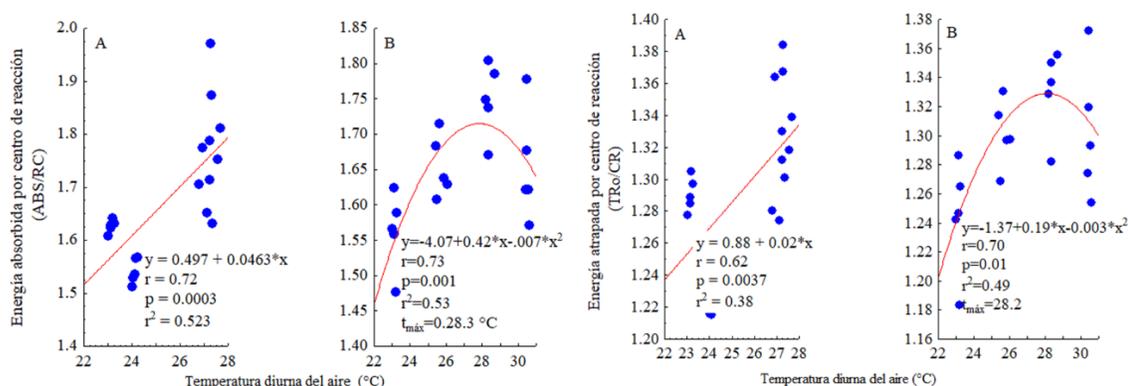


Figura 9. Influencia de la temperatura diurna del aire en la energía absorbida (ABS/CR) y atrapada (TRo/CR) por centros de reacción a 600 (A) y 1000 (B) metros sobre el nivel del mar en la región Frailesca Chiapas.

Se observó un incremento lineal positivo en la relación ABS/CR a temperaturas de 22° C a 28°C oscilando entre los rangos de 1.51 y 1.79, a 600 msnm. Mientras que a 1000 msnm la cantidad absorbida fue menor obteniendo rangos entre los 1.47 a 1.71 alcanzada a 28° C,

sufriendo una merma en este parámetro (ABS/CR), en temperaturas que superen los 28°C (Figura 9). Para el atrapamiento por centro de reacción (TRo/CR) a 600 msnm en condiciones de temperatura diurna de 22 ° C a 28° C, los parámetros se mantienen en 1.24 como mínimo y 1.33 como máximo, sin embargo a el parámetro de TRo/CR tiene un mínimo de 1.21 y un máximo de 1.33 en las mismas temperaturas (22 ° C a 28° C), indicando que temperaturas superiores a este rango reducen la cantidad atrapada por centro de reacción (Figura 9). Estos resultados están relacionados con los encontrados en plantas de *Coffea arabica* L, sometidas a estrés (Cherono *et al* 2021), a 730 msnm en la especie *Coffea arabica* L., mostraron aumentos en las mismas mediciones de ABS/CR y TRo/CR (Rodrigues *et al.*, 2016).

En el parámetro de energía disipada por centro de reacción Dio/RC, se presentan valores mínimos de 1.23 y un máximo de 1.33 en temperaturas entre 22°C y 28°C a 600 msnm, sin embargo a mayor altitud los valores se reducen, con un mínimo de 1.23 y un máximo de 1.29 en temperaturas de 22°C a 28°C, con una reducción en temperaturas por encima de 28°C en la altitud de 1000 msnm (Figura 10). Se observó rangos de 3.8 a 4.4 en el transporte de electrones por centro de reacción (ETo/RC), en temperaturas de 22°C a 30°C en menor altitud, mientras que a mayor altitud con la misma temperatura tiende a disminuir la cantidad de electrones por centro de reacción a partir de 28°C (Figura 10). Estos resultados son similares a los reportados por Rodrigues *et al.* (2016), con mayores concentraciones de antioxidantes como mecanismo de desexcitación que se reflejan en los parámetros Dio/RC y ETo/RC bajo estrés térmico en plantas de *Coffea arabica*.

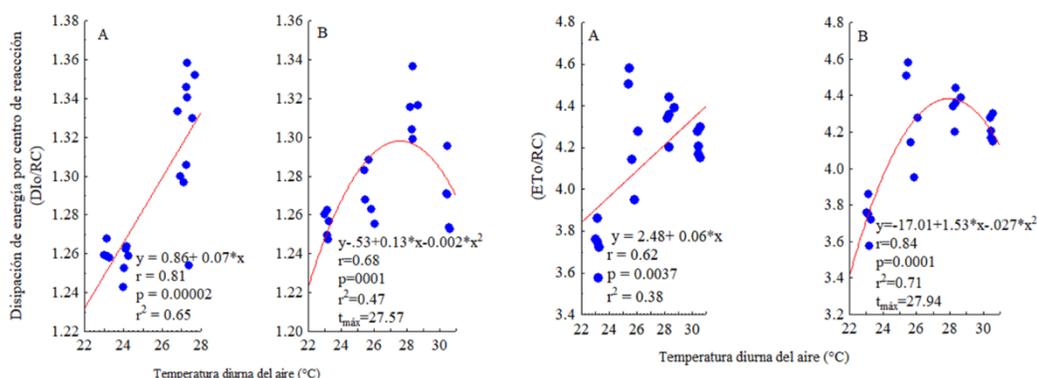


Figura 10. Influencia de la temperatura diurna del aire en la energía disipada (Dio/RC) y el transporte de electrones (ETo/RC) por centro de reacción en cafetos crecidos a 600 (A) y 1000 (B) metros sobre el nivel del mar en la región Frailesca Chiapas.

La relación entre la temperatura y la fuerza impulsora de la fotosíntesis (PI) muestra una pendiente más pronunciada a 600 msnm con un declive de 0.392, es decir, que por cada grado Celsius de temperatura PI disminuye 0.392 unidades, mientras que a 1000 msnm esta relación es solo 0.034 unidades de PI por cada grado de temperatura (Figura 11).

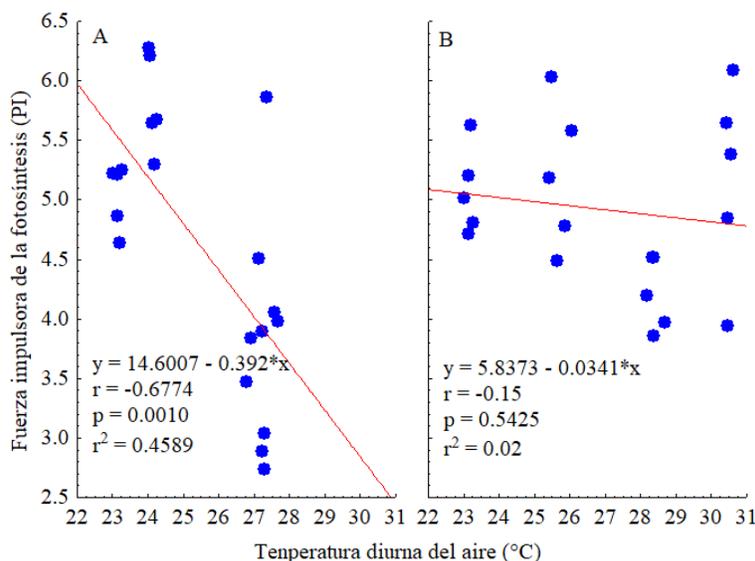


Figura 11. Influencia de la temperatura diaria del aire en la fuerza impulsora de la fotosíntesis (PI) en cafetos crecidos a 600 (A) y 1000 (B) metros sobre el nivel del mar en la región Frailesca de Chiapas.

Lo cual es muy relevante pues este es un indicador vital de funcionamiento (PI), y representa la conservación de la energía desde la absorción de luz por la clorofila del PS II, hasta el transporte de electrones (Snider *et al.*, 2018). Los resultados registrados de PI y el contenido de clorofilas a 600 msnm, son concomitantes debido al menor número de clorofilas, lo cual se refleja en una menor fuerza impulsora de la fotosíntesis, acentuada por la temperatura (Figura 11 y 12), ya que la disminución de la eficiencia de cualquier proceso puede mermar el rendimiento fotosintético global (Snider *et al.*, 2018; Cheroni *et al.*, 2021). Resultados similares se encontraron en árboles de manzana (*Malus domestica* Borkh) en el decrecimiento de PI_{ABS} y PI_{total} (Mihaljević *et al.*, 2021). Valores similares se encontraron en los parámetros ABS/RC , TRo/RC , Dio/RC , ETo/RC , PI_{ABS} y PI_{total} en *Gossypium hirsutum* L (Snider *et al.*, 2018).

El contenido de clorofilas totales a y b fue superior a 1000 msnm durante los meses de febrero, mayo, agosto y noviembre (Figura 12). Este incremento en la concentración de clorofilas es una estrategia de las plantas, para aumentar la capacidad de absorción lumínica evitando procesos de foto-inhibición (Mariño, 2014).

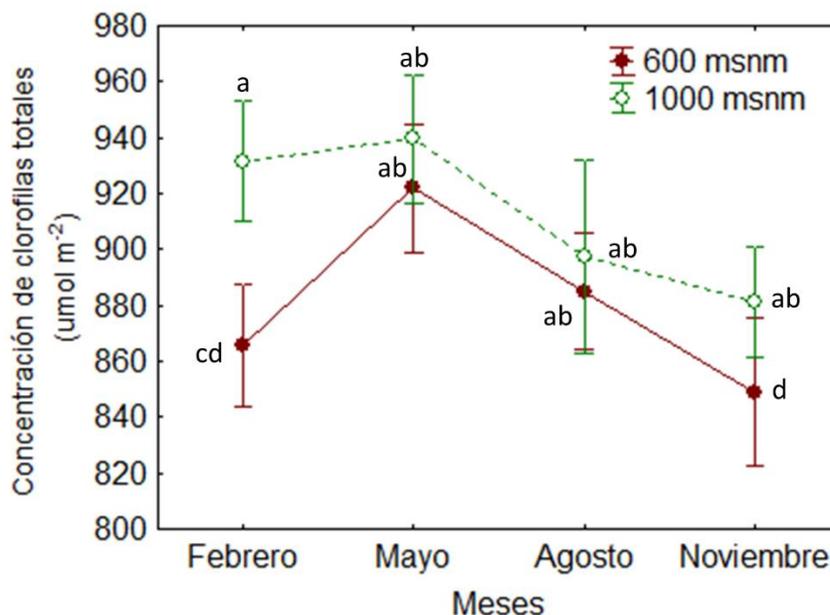


Figura 12. Variaciones estacionales del contenido de clorofilas totales en cafetos crecidos en un gradiente altitudinal de la región Frailesca, Chiapas.

Conclusiones

Los valores de fluorescencia inicial (F_0), fueron mayores en febrero y mayo en ambas altitudes. Los parámetros de absorción de la radiación solar por centro de reacción (ABS/CR), disipación por centro de reacción (DIo/CR), atrapamiento por centro de reacción (TRo/CR), fueron superiores en febrero, mayo y noviembre a 600 msnm. El transporte electrónico ETo/CR fue mayor en febrero, mayo y agosto a 1000 msnm.

La radiación solar afectó la capacidad de transferencia de energía a 600 msnm aumentando las relaciones absorción por centro de reacción (ABS/CR), disipación por centro de reacción (DIo/CR), atrapamiento por centro de reacción (TRo/CR), transporte de electrones por centro de reacción (ETo/CR), y decrecimientos en el producto cuántico máximo de la fotoquímica

primaria (Fv/Fm) y Fo/Fm, disminuyendo la capacidad del potencial fotosintético de PS II. A 1000 msnm los parámetros se mantienen en rangos óptimos.

La temperatura impactó negativamente en la fluorescencia inicial (Fo), fluorescencia máxima (Fm), absorción por centro de reacción (ABS/CR), disipación por centro de reacción (DIO/CR), atrapamiento por centro de reacción (TRO/CR), transporte de electrones por centro de reacción (ETO/CR) y en el índice vital de funcionamiento de la fotosíntesis (PI) a 600 msnm.

A 1000 msnm se observa un declive a 28°C en los parámetros de la fluorescencia de la clorofila, producto cuántico máximo de disminución de excitación fotoquímica (Fo/Fm), absorción por centro de reacción (ABS/CR), disipación por centro de reacción (DIO/CR), atrapamiento por centro de reacción (TRO/CR), transporte de electrones por centro de reacción (ETO/CR) en *Coffea arabica* L. Var. Costa Rica 95.

Los cafetos cultivados a mayor altitud mostraron mayor cantidad de clorofilas totales durante todos los meses evaluados.

Bibliografía

- Aimi, S. C., Araujo, M. M., Tabaldi, L. A., León, E. B., Zavistanovicz, T. C., Barbosa, F. M., Pasquetti Berghetti, Á. L. and De Lima, M. S. (2020). Is shading able to potentiate the growth of myrocarpus frondosus seedlings in the field? *Bosque*, 41 (2), pp.93–102. [Online]. Available at: doi:10.4067/S0717-92002020000200093.
- Carrasco, L.R., Escobar, L.A. (2002). Cambios en los contenidos de clorofila, proteínas y niveles de fluorescencia de clorofila en plantas de café (*Coffea arabica* L.) cultivadas en zonas áridas en diferentes condiciones de luminosidad. *Idesia (Chile)*, 20(2), 111-118.
- Carpenedo Aimi, S., Machado Araujo, M., Almeri Tabaldi, L., Benítez León, E., Zavistanovicz, T. C., Manzoni Barbosa, F., Pasquetti Berghetti, P.B., y Santos de Lima, M. (2020). ¿ El sombreado es capaz de potenciar el crecimiento de plantas de *Myrocarpus frondosus* en el campo?. *Bosque (Valdivia)*, 41(2), 93-102.
- Casierra Posada, F., Peña Olmos, J. and Ulrichs, C. (2011). Crecimiento y eficiencia fotoquímica del fotosistema II en plantas de fresa (*Fragaria* sp.) Afectadas por la calidad de la luz: implicaciones agronómicas. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 14 (2), pp.43–53. [Online]. Available at: doi:10.31910/rudca.v14.n2.2011.774.

- Ceacero, C. J., Díaz-Hernández, J. L., del Campo, A. D., & Navarro-Cerrillo, R. M. (2012). Evaluación temprana de técnicas de restauración forestal mediante fluorescencia de la clorofila y diagnóstico de vitalidad de brinzales de encina (*Quercus ilex* sub. *ballota*). *Bosque (Valdivia)*, 33(2), 191-202.
- César, F. R. C. F., Naomi, S. M., Viana, A. E. S. and Bonfim, J. A. (2013). Morphological Plasticity of Three Coffee Cultivars Under Light Gradient. *Coffee Science*, 8 (2), pp.121–131.
- Cherono, S., Ntini, C., Wassie, M., Mollah, M. D., Belal, M. A., Ogutu, C., & Han, Y. (2021). Exogenous application of melatonin improves drought tolerance in coffee by regulating photosynthetic efficiency and oxidative damage. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 146(1), 24-32.
- Cochran, W. G. (1952). The χ^2 test of goodness of fit. *The Annals of mathematical statistics*, 315-345.
- Delgadillo Rodríguez, I. P., Montenegro Ruíz, L. C., Pinilla Agudelo, G. A. and Marina Melgarejo, L. (2017). Medición de la fluorescencia de la clorofila a en algas encapsuladas en alginato de calcio. *Acta Biologica Colombiana*, 22 (2), pp.199–208. [Online]. Available at: doi:10.15446/abc.v22n2.56166.
- Demmig-Adams, B., Adams III, W. W., Barker, D. H., Logan, B. A., Bowling, D. R., & Verhoeven, A. S. (1996). Using chlorophyll fluorescence to assess the fraction of absorbed light allocated to thermal dissipation of excess excitation. *Physiologia Plantarum*, 98(2), 253-264.
- De Abreu, D. P., Roda, N. D. M., de Abreu, G. P., Bernado, W. D. P., Rodrigues, W. P., Campostrini, E., & Rakocevic, M. (2022). Kaolin Film Increases Gas Exchange Parameters of Coffee Seedlings During Transference From Nursery to Full Sunlight. *Frontiers in plant science*, 12, 3184.
- De Oliveira, J. G., Alves, P. L. D. C. A., & Vitória, A. P. (2009). Alterations in chlorophyll a fluorescence, pigment concentrations and lipid peroxidation to chilling temperature in coffee seedlings. *Environmental and Experimental Botany*, 67(1), 71-76.
- Fahl, J. I., Carelli, M. L. C., Vega, J. and Magalhães, A. C. (1994). Nitrogen and irradiance levels affecting net photosynthesis and growth of young coffee plants (*Coffea arabica* L.). *Journal of Horticultural Science*, 69 (1), pp.161–169. [Online]. Available at: doi:10.1080/14620316.1994.11515262.
- Giraldo, C. J., Cano, M. A. O. and Ribas, R. F. (2010). Respuesta fotosintética de diferentes ecotipos de fríjol a la radiación y la salinidad. *Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, 10 (2), pp.129–140. [Online]. Available at: doi:10.21930/rcta.vol10_num2_art:135.
- González Moren, S., Perales Vela, H. y Salcedo Alvarez, M.O. (2008). La fluorescencia de la clorofila a como herramienta en la investigación de efectos tóxicos en el aparato fotosintético de plantas y algas. *Revista de Educación Bioquímica*, 27 (4), pp.119–129.

- Gutiérrez, D. (2021). Efectos del cambio global sobre la dinámica poblacional de la fauna de montaña. *Ecosistemas*, 30 (1), p.2177. [Online]. Available at: doi:10.7818/ECOS.2177.
- Hartley, R. V. (1942). A more symmetrical Fourier analysis applied to transmission problems. *Proceedings of the IRE*, 30(3), 144-150.
- Horton, P., Ruban, A. V., & Walters, R. G. (1994). Regulation of Light Harvesting in Green Plants (Indication by Nonphotochemical Quenching of Chlorophyll Fluorescence). *Plant Physiology*, 106(2), 415.
- Kalaji, Hazem M.; Jajoo, Anjana; Oukarroum, Abdallah; Brestic, Marian; Zivcak, Marek; Samborska, Izabela A.; Cetner, Magdalena D.; Łukasik, Izabela; Goltsev, Vasilij; Ladle, Richard J. (2016). *Chlorophyllafluorescence as a tool to monitor physiological status of plants under abiotic stress conditions. Acta Physiologiae Plantarum*, 38(4), 102–. doi:10.1007/s11738-016-2113-y
- Lisnawati, A., Lahjie, A. M., Simarankir, B. D. A. S., Yusuf, S.; Ruslim, Y. (2017). Agroforestry system biodiversity of Arabica coffee cultivation in North Toraja District, South Sulawesi, Indonesia. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 18 (2), pp.741–751. doi:10.13057/biodiv/d180243.
- Krause, G.H. and Weis, E. (1991) Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: The basics. *Ann Rev Plant Physiol Plant Mol Biol* 42: 313–349
- Mariño, Y. A. (2014). Respuesta fotosintética de Coffea arabica L. a diferentes niveles de luz y disponibilidad hídrica. *Acta Agronómica*, 63(2), 128-135.
- Mathur, S., Jain, L. and Jajoo, A. (2018). Photosynthetic efficiency in sun and shade plants. *Photosynthetica*, 56 (SPECIAL ISSUE), Photosynthetica., pp.354–365. [Online]. Available at: doi:10.1007/s11099-018-0767-y.
- Maxwell K, G Johnson. 2000. Chlorophyll fluorescente. A practical guide. *Journal of Experimental Botany* 51: 659-668.
- Mihaljević, I., Viljevac Vuletić, M., Šimić, D., Tomaš, V., Horvat, D., Josipović, M., Zdunić, Z., Dugalić, K. and Vuković, D. (2021). Comparative Study of Drought Stress Effects on Traditional and Modern Apple Cultivars. *Plants*, 10 (3), p.561. [Online]. Available at: doi:10.3390/plants10030561.
- Navarro Cerrillo, R. M., Maldonado-Rodríguez, R. and Ariza Mateos, D. (2004). Fluorescencia de la clorofila en 5 procedencias de Pinus halapensis mill y su respuesta al estres hidrico. *Cuad. Soc. Esp. Cien. For.*, 17 (1), pp.69–74.
- Partelli, F. L., Vieira, H. D., Viana, A. P., Batista-Santos, P., Rodrigues, A. P., Leitão, A. E., & Ramalho, J. C. (2009). Low temperature impact on photosynthetic parameters of coffee genotypes. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 44, 1404-1415.

- Pinilla, G. A. (2006). Evaluación de la eficiencia fotosintética del fitoplancton en un lago amazónico (Lago Boa) y en un lago andino (Lago Guatavita). *Acta amazónica*, 36, 221-228.
- Rahn, E., Vaast, P., Läderach, P., van Asten, P., Jassogne, L. and Ghazoul, J. (2018). Exploring adaptation strategies of coffee production to climate change using a process-based model. *Ecological Modelling*, 371 (July 2017), Elsevier., pp.76–89. [Online]. Available at: doi:10.1016/j.ecolmodel.2018.01.009.
- Rodrigues, W. P., Vieira, H. D., Campostrini, E., Figueiredo, F. A. M. M. A., Ferraz, T. M., Partelli, F. L. and Ramalho, J. C. (2016). *Physiological aspects , growth and yield of Coffea spp . in areas of high altitude*. 10 (5), pp.666–674. [Online]. Available at: doi:10.21475/ajcs.2016.10.05.p7366.
- Rodríguez-Larramendi, L. A., Guevara Hernández, F., Gómez Castro, H., Fonseca Flores, M., Gómez Castañeda, J. C. and Pinto Ruiz, R. (2016). Anatomía foliar relacionada con la ruta fotosintética en árboles de café (*Coffea arabica* L., var. Caturra Rojo) expuestos a diferentes niveles de radiación solar en la Sierra Maestra, Granma, Cuba. *Acta Agronómica*, 65 (3), pp.248–254. [Online]. Available at: doi:10.15446/acag.v65n3.46731.
- Ruiz Osorio, E. C. (2013). *Impacto potencial del cambio climático en bosques de un gradiente altitudinal a través de rasgos funcionales*. CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA.
- Sharma, A., Kumar, V., Shahzad, B., Ramakrishnan, M., Singh Sidhu, G. P., Bali, A. S., Handa, N., Kapoor, D., Yadav, P., Khanna, K., et al. (2020). Photosynthetic Response of Plants Under Different Abiotic Stresses: A Review. *Journal of Plant Growth Regulation*, 39 (2), Springer US., pp.509–531. [Online]. Available at: doi:10.1007/s00344-019-10018-x.
- Șmuleac, L., Rujescu, C., Șmuleac, A., Imbrea, F., Radulov, I., Manea, D., Ienciu, A., Adamov, T. and Pașcalău, R. (2020). Impact of Climate Change in the Banat Plain, Western Romania, on the Accessibility of Water for Crop Production in Agriculture. *Agriculture*, 10 (10), p.437. [Online]. Available at: doi:10.3390/agriculture10100437.
- Snider, J. L., Thangthong, N., Pilon, C., Virk, G. and Tishchenko, V. (2018). OJIP-fluorescence parameters as rapid indicators of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) seedling vigor under contrasting growth temperature regimes. *Plant Physiology and Biochemistry*, 132 (September), Elsevier., pp.249–257. [Online]. Available at: doi:10.1016/j.plaphy.2018.09.015.
- Stirbet, A., Lazár, D., Kromdijk, J. and Govindjee, G. (2018). Chlorophyll a fluorescence induction: Can just a one-second measurement be used to quantify abiotic stress responses? *Photosynthetica*, 56 (SPECIAL ISSUE), Photosynthetica., pp.86–104. [Online]. Available at: doi:10.1007/s11099-018-0770-3.
- Strasser, H., Vey, A., & Butt, T. M. (2000). Are there any risks in using entomopathogenic fungi for pest control, with particular reference to the bioactive metabolites of

Metarhizium, Tolypocladium and Beauveria species?. *Biocontrol Science and technology*, 10(6), 717-735.

Valladares, F., Gianoli, E. and Gómez, J. M. (2007). Ecological limits to plant phenotypic plasticity. *New Phytologist*, 176 (4), pp.749–763. [Online]. Available at: doi:10.1111/j.1469-8137.2007.02275.x.

Artículo 3. Contenido relativo de agua, transpiración y características estomáticas en cafetos en cafetos (*Coffea arabica* L. Var. Costa Rica 95) crecidos en un gradiente altitudinal de la región Frailesca.

Emanuel Romero-José¹, Luis Alfredo Rodríguez-Larramendi^{1*}, Alder Gordillo-Curiel¹, Miguel Ángel Salas-Marina¹

¹ Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. Facultad de ingeniería, Sede Villa Corzo. Carretera a Monterrey, Km 3.0 CP 30520, Chiapas, México. emanuel.romeroj@e.unicach.mx, alder.gordillo@unicach.mx, miguel.salas@unicach.mx.

*Corresponding autor: alfredo.rodriguez@unicach.mx

Resumen

El experimento se realizó en plantaciones de cafetos localizadas a 600 y 1000 msnm, en la región Frailesca perteneciente al municipio de Villa Corzo, Chiapas, México con el objetivo de estudiar las variaciones en el estado hídrico foliar. Se midieron las variaciones diarias del contenido relativo de agua (CRA) y transpiración, además la densidad y las dimensiones de los estomas. Las mediciones de CRA y transpiración se realizaron desde las 7:00 hasta las 17:00 horas día intervalos de dos horas durante los meses de febrero, mayo, agosto y noviembre. Las mediciones de la densidad estomática y dimensiones de los estomas se realizaron en febrero. Los resultados muestran que a 1000 msnm el contenido relativo de agua en las hojas fue mayor en febrero. La transpiración no mostró diferencias significativas durante los meses febrero, mayo y noviembre. El largo y ancho de los estomas no mostraron diferencias en las altitudes. La densidad estomática fue superior a 1000 msnm.

Palabras clave: Densidad estomática, transpiración, contenido relativo de agua, *Coffea arabica* L.

Abstract

The experiment was conducted in coffee plantations located at 600 and 1000 m asl, in the Frailesca region of the municipality of Villa Corzo de Chiapas, Mexico, with the objective of studying variations in leaf water status. Daily variations in relative water content (RWC), transpiration and stomata density and dimensions were measured. Measurements of RWC and transpiration were made from 7:00 to 17:00 hours per day at two-hour intervals during

the months of February, May, August and November. Measurements of stomatal density and stomata dimensions were made in February. The results show that at 1000 m asl the relative water content in the leaves was higher in February. Transpiration showed no significant differences during February, May and November. The length and width of stomata showed no differences between altitudes. Stomatal density was higher at 1000 m asl.

Key words: stomatal density, transpiration, relative water content, *Coffea arabica* L.

Introducción

El café (*Coffea arabica* L.) es originario del continente africano, en donde se desarrolló bajo el sotobosque como una planta de sombra, sin embargo por su importancia económica fue dispersada por el mundo (Biruk, 2018; Melese y Kolech, 2021), sembrándose bajo diferentes condiciones climáticas a las originales (Aceves-Navarro *et al.*, 2020; Jaulis C. *et al.*, 2020; Pilozo Mantuano *et al.*, 2022).

En el continente americano la producción se estableció en zonas tropicales, en bosques templados donde encontró la temperatura óptima para este cultivo que oscila entre los 18° y 22 °C (Carvajal, 1984), lo cual permite el adecuado crecimiento y desarrollo de la planta (Carvajal, 1984; Núñez Rodríguez *et al.*, 2021). En México, el café se cultiva en sistemas agroforestales bajo sombra, asociado a diferentes ecosistemas: selvas altas y medianas, bosques de pino encino, selvas bajas caducifolias y bosques mesófilos de montaña (Flores Vichi, 2015), y se localizan en altitudes superiores a 1000 metros sobre el nivel del mar (Latifah *et al.*, 2018; Malhi *et al.*, 2021).

Los gradientes altitudinales donde se distribuyen las plantaciones de cafetos se caracterizan por condiciones climáticas específicas, reflejando una disminución en la temperatura del aire a mayor altitud (Läderach *et al.*, 2017) y diferentes regímenes de radiación solar en función de la latitud, convirtiendo estas zonas altas idóneas para el estudio del comportamiento fisiológico de las especies de plantas de interés económico y su adaptación ante estas nuevas eventualidades ambientales (Zelada y Reynel, 2019). Bajo estas condiciones los elementos climáticos relacionados con el crecimiento de las plantas, como la temperatura, radiación y precipitación son factores determinantes de la productividad biológica y agrícola de las plantas (Garc y Roa-acosta, 2022). Rodríguez-Larramendi (2001) en un estudio realizado en

Cuba menciona que el agroecosistema de un cafetal no experimenta su máximo potencial biótico en virtud de la incidencia de factores limitantes. Tanto en la parte aérea como en el sistema radicular de la planta, influyen factores que se identifican según Lövenstein *et al.* (1993) como factores que definen, limitan y reducen el crecimiento y la productividad del cultivo.

En este sentido, las condiciones ambientales desfavorables para la especie *arabica*, afectan las características funcionales de la planta, modulando las respuestas fisiológicas ante las condiciones externas en las que se encuentra expuesta (Gómez-Tosca *et al.*, 2021). Taiz y Zeiger (2002) mencionan un cambio mínimo en el flujo del agua puede provocar mal funcionamiento de diferentes procesos celulares. El delicado potencial hídrico y las nuevas condiciones climáticas, generarán ajustes ante las nuevas condiciones mediante la plasticidad fenotípica; rango de modulación expresado por los genotipos ante las condiciones externas (Nicotra *et al.*, 2010).

Se ha demostrado que el café mantiene un alto contenido relativo de agua en condiciones de campo, superiores al 90% consecuencia de un eficiente movimiento estomático y tanto el contenido relativo de agua como la transpiración dependen del nivel de exposición a la radiación solar (Rodríguez- Larramendi *et al.*, 2001). Sin embargo hay muy poca información disponible sobre transpiración y contenido relativo de agua del café (*Coffea arabica* L.) en las condiciones agroforestales de la región Frailesca, Chiapas. Por tal motivo, el objetivo de esta investigación fue estudiar las variaciones en las relaciones hídricas de cafetos, variedad Costa Rica 95, en un gradiente altitudinal de la región Frailesca de Chiapas.

Materiales y métodos

Localización

La investigación se llevó a cabo en la región Frailesca, Chiapas, la cual está conformada por seis municipios: Ángel Albino Corzo, La Concordia, Montecristo de Guerrero, Villa Corzo,

El Parral y Villaflores. Colinda al norte con las Regiones I Metropolitana y IV De Los Llanos, al este con la Región XI Sierra Mariscal, al sur con la Región IX Istmo Costa y al oeste con la Región II Valles Zoque. Su territorio ocupa 7987.19 Km 2, que representan el

10.7% de la superficie estatal, siendo la segunda región de mayor extensión territorial en el estado (Figura 1).

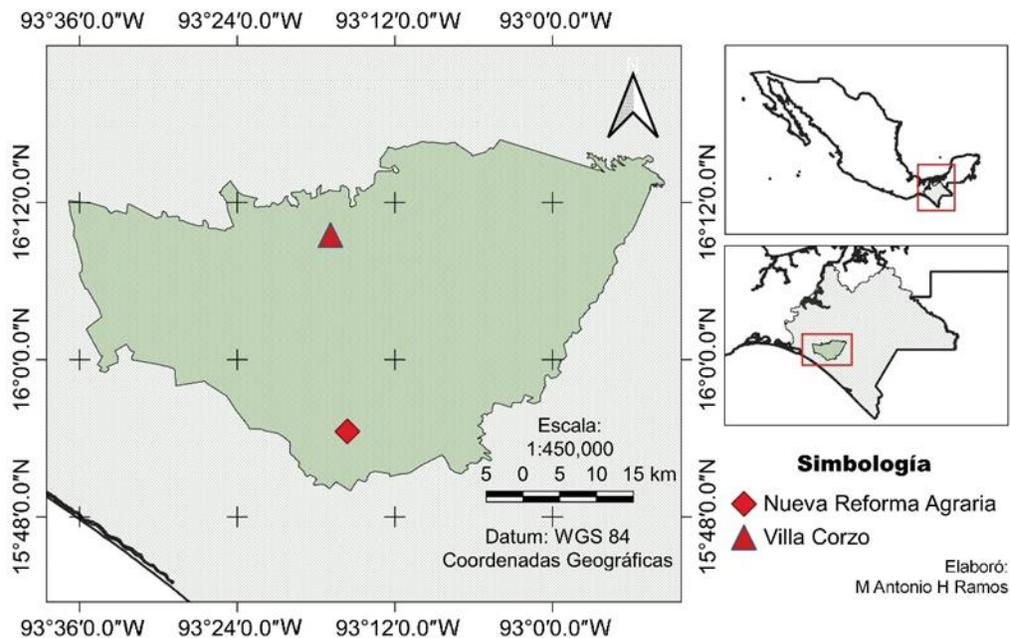


Figura 1. Localización del área de estudio y sitios de muestreo.

Esta región presenta climas de los grupos cálidos y semi-cálidos, con predominio del cálido subhúmedo con lluvias de verano, seguido por el clima semi-cálido húmedo con lluvias abundantes de verano

Sitios de muestreo

Se seleccionaron dos plantaciones de cafetos en el municipio Villa Corzo. La primera se encuentra a 3.0 km de la cabecera municipal a 600 msnm, en las coordenadas 15° 54' y 31'' latitud N y los 93° 15' y 37'' longitud W. Bajo la sombra conformada predominantemente por árboles de mango (*Mangifera indica* L.), mata ratón (*Gliricidia sepium* L.) y Cedro (*Cedrela odorata* L.) y Machetón (*Inga edulis* L.). El segundo sitio seleccionado se encuentra en la localidad Nueva Reforma Agraria está localizada a 1000 msnm, en las coordenadas 15° 09' y 31'' latitud N y los 93° 16' y 64'' longitud W. Predominan los árboles de sombra de las especies *Conostegia xalapensis* B, *Platymiscium yucatanum* S, y *Ficus carica* L.

Material vegetal y diseño experimental

La investigación se desarrolló en plantaciones de café (*Coffea arabica* L. var Costa Rica 95), con 4 años de plantadas a una densidad de 5000 plantas ha⁻¹. En cada sitio (600 y 1000 msnm) se establecieron al azar 5 parcelas de 20 x 20 metros a través de un diseño de efectos fijos (altitudes), y se seleccionaron 2 plantas al azar por parcela con características similares, considerándose cada una como una unidad experimental, para un total de 10 repeticiones en cada sitio de muestreo.

Relaciones hídricas

Transpiración

En cada sitio experimental se seleccionaron dos plantas y en cada una de ellas se tomaron dos hojas totalmente expuesta de la parte central de la planta. Las hojas se pesaron en una balanza digital con una precisión de 0.01g inmediatamente después de separarse de las plantas para determinar el peso fresco inicial (PF_i). Posteriormente las hojas fueron colocadas a temperatura ambiente en el mismo sitio de las parcelas durante 20 minutos. Después de ese tiempo fueron pesadas nuevamente para determinar el peso fresco final (PF_f). Las hojas fueron llevadas al laboratorio para medirle el área foliar en cm² (AF) con un escáner CID-200 de la marca BioScience®. Este procedimiento se repitió a las 07:00, 09:00, 13:00 y 17:00 horas durante los meses de febrero, mayo, agosto y noviembre del año 2021. Para calcular la pérdida de agua por transpiración se calculó a través de la diferencia de peso en el tiempo transcurrido entre los dos pesajes en función del área foliar unitaria de cada hoja y expresado en mg (H₂O) cm⁻² min⁻¹ de acuerdo con Rodríguez-Larramendi *et al.* (2001).

Contenido relativo de agua

En cada planta se seleccionaron dos hojas de la parte media y en cada una se realizaron 2 perforaciones de discos foliares de 0.92 cm². Los discos se pesaron para determinar el peso fresco (PF). Posteriormente se colocaron en un recipiente con agua destilada hasta lograr la máxima turgencia y se pesaron para determinar el peso turgente (PT). Los discos se colocaron en bolsas de papel y se trasladaron al laboratorio para determinar el peso seco (PS) colocando

los discos en una estufa hasta peso constante a una temperatura de 80 °C. El contenido relativo de agua (CRA, %) se calculó a través de la siguiente fórmula:

$$\text{CRA (\%)} = \frac{PF-PS}{PT-PS} * 100$$

Dimensiones y frecuencia estomática

En dos hojas de cada una de las plantas seleccionadas por parcelas en ambas altitudes se tomaron dos huellas epidérmicas usando esmalte transparente para uñas. El conteo y la medición de los estomas se realizaron en la superficie abaxial con el uso de un microscopio ocular (ZEISS AxioLab 5) conectado a una cámara fotográfica, partiendo de las huellas epidérmicas tomadas en su parte central, por ser la zona donde es menos variable la distribución estomática (Sharma y Rai, 1989).

Análisis estadístico

Los datos fueron analizados a través de la prueba de Student considerando las altitudes como variantes experimentales a comparar por cada fecha de muestreo, a través de un diseño experimental de efectos fijos. Previamente se aplicaron as pruebas de normalidad de Kolmogorov-Smirnov y Shapiro Wilk y la prueba de homogeneidad de varianzas de Levene y Bartlett. Todos los análisis estadísticos se realizaron con el software STATISTICA.

Resultados y Discusión

Los cafetos crecidos a mayor altitud mostraron contenido relativo de agua más favorable durante los meses de febrero ($p \leq 0.05$) y agosto ($p \leq 0.10$) en comparación con la menor altitud (Tabla 1). Sin embargo, en el mes de mayo, los cafetos crecidos a 600 msnm mostraron mayor cantidad de agua en las hojas que los crecidos a mayor altitud, lo cual demuestra que el estado hídrico varía en función del momento de muestreo y no existe un efecto consistente de la altitud. En sentido general, los cafetos mostraron valores por debajo 85% durante todo el período evaluado lo cual no coincide con los resultados publicados por Yamazaki y Rebello (1999) en las condiciones de Brasil, quienes encontraron que los cafetos, en condiciones de campo, muestran por lo general valores de CRA superiores a 90% debido a su eficiente mecanismo de apertura y cierre de los estomas y corroborado por Rodríguez-Larramendi et al. (2001), quienes reportaron valores de CRA superiores a 90%, incluso al medio día en cafetos crecidos a pleno sol.

Tabla 1. Variaciones mensuales del CRA y la transpiración en cafetos crecidos a 600 y 1000 msnm en la región Frailesca, Chiapas.

Febrero						
Variables	600 msnm	1000 msnm	t-value	p	Std.Dev.	Std.Dev.
CRA (%)	54.25	75.62	-6.10	0.00	16.06	15.25
Transpiración (mg (H ₂ O) cm ⁻² min ⁻¹)	2.64	2.82	-0.18	0.86	1.69	5.96
Mayo						
CRA (%)	83.38	75.65	2.47	0.02	8.81	17.69
Transpiración (mg (H ₂ O) cm ⁻² min ⁻¹)	5.28	5.83	-0.67	0.50	3.62	3.70
Agosto						
CRA (%)	80.20	84.99	-1.73	0.09	14.57	9.72
Transpiración (mg (H ₂ O) cm ⁻² min ⁻¹)	6.23	8.87	-1.41	0.16	5.71	10.36
Noviembre						
CRA	78.46	80.83	-0.87	0.39	13.15	11.13
Transpiración (mg (H ₂ O) cm ⁻² min ⁻¹)	5.31	4.46	1.05	0.30	3.08	4.12

Las variaciones diurnas del CRA durante los cuatro muestreos realizados (Figura 2) no mostró el típico patrón de disminución del contenido hídrico foliar al medio día reportado anteriormente por Rodríguez-Larramendi *et al.* (2001). Mientras que el efecto de la altitud sólo fue significativo en el mes de febrero, siendo los cafetos crecidos a mayor altitud los que mostraron mejor estado hídrico con valores de CRA ligeramente superiores al 70% al medio día (Figura 2).

El contenido relativo de agua está relacionado con la apertura estomática, debido a los cambios de la turgencia de las células oclusivas o células guardianas (Azcón-Bieto y Talón, 2008). Estas células son multisensoriales, y funcionan como válvulas hidráulicas (Taiz y Zaiger, 2002). Los factores ambientales como la disponibilidad de agua en el suelo, la temperatura, radiación solar, humedad relativa, y factores internos de la planta, como el área foliar, estructura y resistencia estomática alteran el potencial hídrico. Estos cambios son percibidos por estas células protectoras, con respuestas estomáticas bien definidas, modificando la turgencia y aumentando el volumen celular y la turgencia (Taiz y Zaiger,

2002; Azcón-Bieto y Talón, 2008). Estos resultados coinciden con los reportados por Rodríguez-Larramendi *et al.* (2001), quienes reportaron que a diferentes regímenes solares el contenido relativo de agua fluctuó durante el día, demostrando que las variaciones están asociadas al movimiento estomático en *Coffea arabica* L. var. Caturra debido al eficiente control estomático y a la constitución coriácea de las hojas.

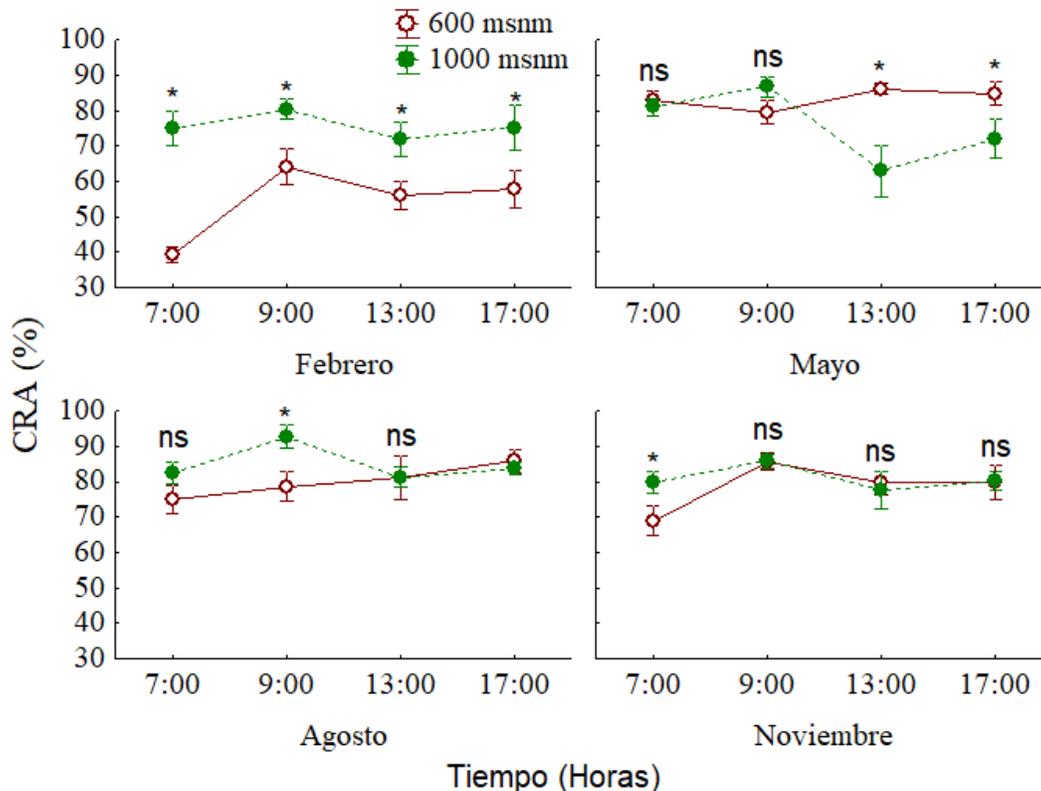


Figura 2. Variaciones diurnas del contenido relativo de agua (CRA, %) en hojas de cafetos crecidos en un gradiente altitudinal de la región Frailesca, Chiapas.

No se observaron diferencias significativas en la transpiración en los meses de febrero y mayo y noviembre en ambas altitudes. Sin embargo en el mes de agosto a las 9:00 y 13:00 horas se observaron incrementos en la pérdida de agua en los cafetos crecidos a 1000 msnm, presumiblemente debido a una mayor exposición de la radiación solar bajo estas condiciones. Estos resultados coinciden con los encontrados por López-Ruiz, (2005) en cafetos cultivados a 1100, 1400, y 1900 msnm. Donde la altitud no modificó significativamente la transpiración, sin embargo, a las 13:00 horas se observó un incremento en la radiación y temperatura diurna que limita la fotosíntesis y favorece el cierre de los estomas. Este efecto es corroborado por Rodríguez-Larramendi *et al.* (2001) en plantaciones de cafetos bajo sombra

regulada, sombra no regulada y pleno sol, donde la transpiración fue mayor a medio día, demostrando que las plantas de *Coffea arabica* L. presentan un mejor estado hídrico con luz leve o moderada.

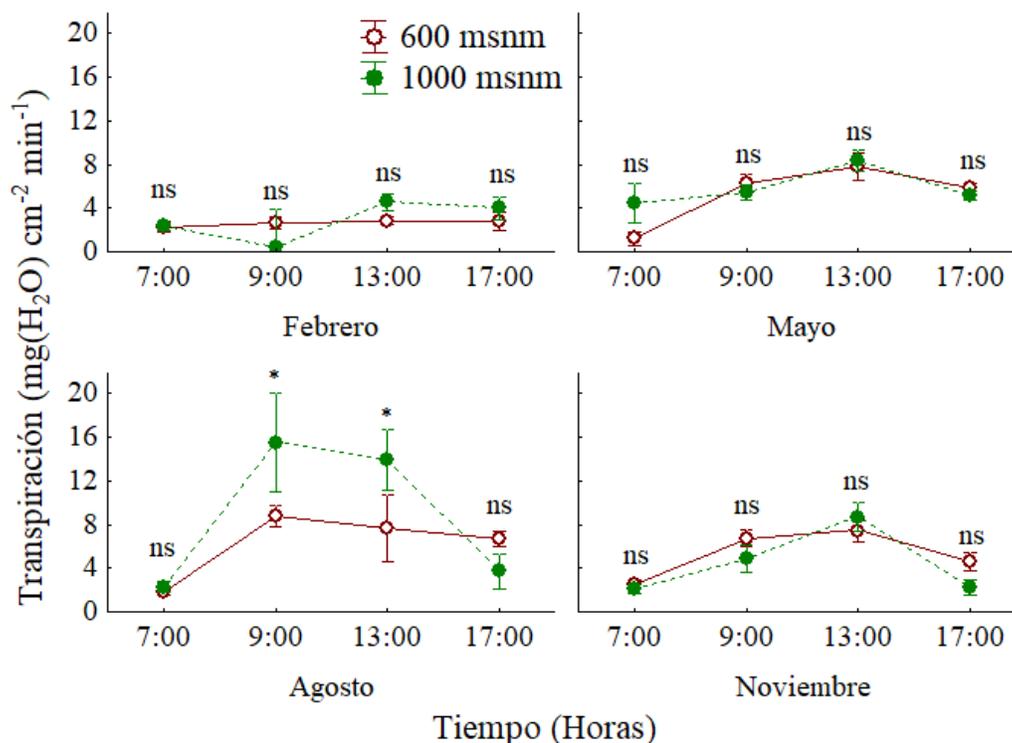


Figura 3. Variaciones diurnas la transpiración en hojas de cafetos crecidos en un gradiente altitudinal de la región Frailesca, Chiapas.

No se observó diferencias estadísticas significativas en la longitud y ancho de las células estomáticas en los cafetos crecidos a 600 y 1000 msnm (Tabla 2). Sin embargo, la densidad estomática fue mayor en los cafetos crecidos a 1000 msnm, lo cual es probable que esté relacionado con la mayor radiación solar registrada bajo estas condiciones. Resultados similares se observaron previamente por Encalada-Córdova *et al.*, (2016) a 138 msnm en cafetos arábigos (*Coffea arabica* L. cv. Caturra) en condiciones de vivero a pleno sol, con mayor número de estomas por área foliar. Resultados similares fueron reportados por Rodríguez-Larramendi *et al.* (2016) en *Coffea arabica* L., var. Caturra Rojo en condiciones de campo a 450 msnm en las condiciones de la Sierra Maestra en Cuba.

Tabla 2. Dimensiones de los estomas y frecuencia estomática en cafetos crecidos en un gradiente altitudinal de la región Frailesca, Chiapas.

VARIABLES	600 msnm	1000 msnm	t de Student	P
Longitud del estoma (mm)	0.15 ± 0.01	0.15 ± 0.01	-1.36	0.19
Ancho del estoma (mm)	0.12 ± 0.01	0.12 ± 0,01	0.43	0.67
Densidad estomática (Estomas/mm ⁻²)	117.30 ± 23.58	136.22 ± 16.23	-2.56	0.02

Media ± desviación estándar, p (probabilidad de error).

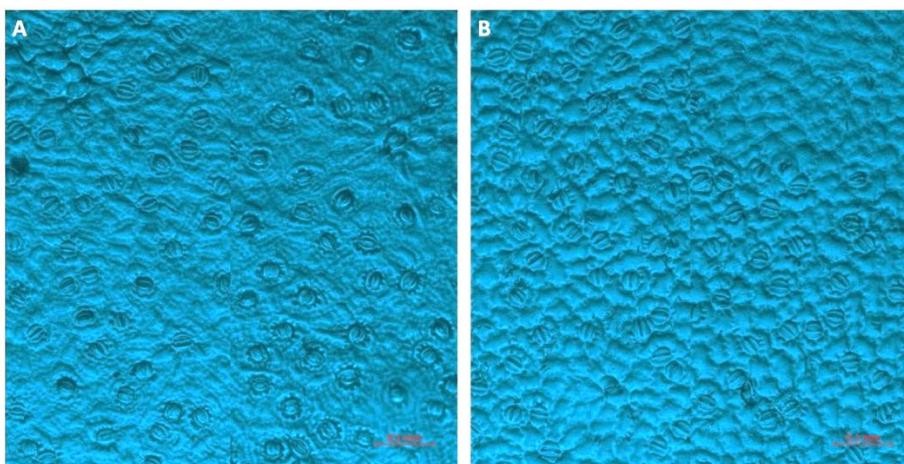


Figura 4. Microfotografías mostrando la densidad estomática en hojas de café sembrados a 600 (A) y 1000 (B) metros sobre el nivel del mar en la región Frailesca, Chiapas.

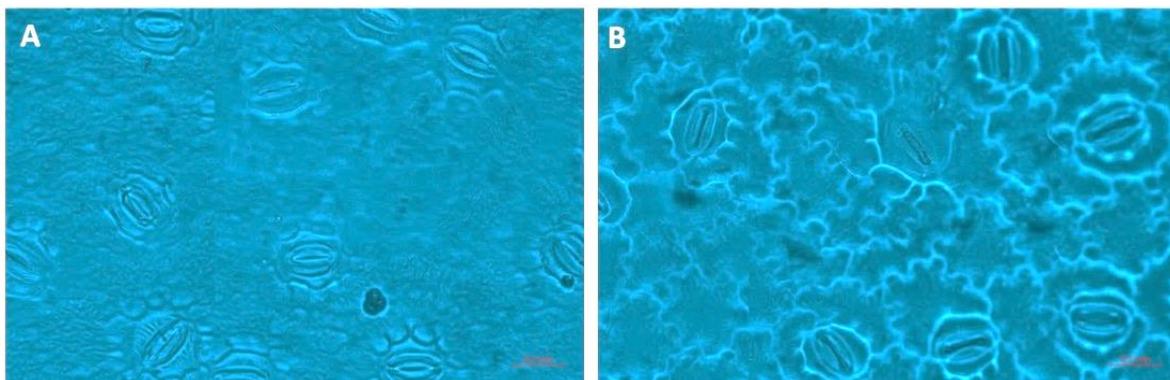


Figura 5. Microfotografías mostrando las dimensiones de los estomas en hojas de café sembrados a 600 (A) y 1000 (B) metros sobre el nivel del mar en la región Frailesca, Chiapas.

Se observó un menor número estomas a 600 msnm (Figura 4A), en comparación con los cafetos cultivados a 1000 metros de altitud (Figura 4B), con un 13% más en la densidad estomática (Tabla 2), lo cual demuestra un agrupamiento de los estomas por área foliar en

condiciones de mayor exposición a la radiación solar, sin un efecto sobre las dimensiones del estoma (Rodríguez-Larramendi *et al.* 2016), puesto que no se observaron diferencias significativas en las dimensiones de los estomas en ambas altitudes.

Conclusiones

El contenido relativo de agua fue mayor en el mes de febrero en los cafetos crecidos a 1000 msnm. La transpiración no mostró diferencias significativas en los meses de febrero, mayo y noviembre, demostrando que la altitud no tiene un efecto directo sobre la pérdida de agua por transpiración. La densidad estomática fue mayor a 1000 msnm consecuencia de una mayor exposición solar. La altitud no modificó la longitud y ancho de los estomas.

Bibliografía

- Aceves-Navarro, L. A., Rivera-Hernández, B., Santillán-Fernández, A., Arrieta-Rivera, A., Juárez-López, J. F. And Gutiérrez-Burón, R. (2020). Impacto del cambio climático en la adaptación del cultivo de café (*Coffea arabica* L.) En Tabasco, México. *Agro Productividad*, 13 (4), pp.53–58. [Online]. Available at: doi:10.32854/agrop.vi.1618.
- Azcón-Bieto, J. y Talón, M. 2008. Fundamentos de fisiología vegetal. Segunda Edición. Interamericana-McGraw-Hill. Interamericana de España. p. 25 - 55.
- Biruk, A. (2018). Impact of shade on morpho-physiological characteristics of coffee plants, their pests and diseases: A review. *African Journal of Agricultural Research*, 13 (39), pp.2016–2024. [Online]. Available at: doi:10.5897/ajar2018.13408.
- Carvajal, F. J. (1984). *Cafeto: Cultivo y fertilización*. Pp.3–254. [Online]. Available at: <https://www.ipipotash.org/uploads/udocs/65-carvajal-cafeto-cultivo-y-fertilizacion.pdf> consultado: 28-02-2021.
- Encalada-Córdova, M., Soto-Carreño, F., Morales-Guevara, D., & Álvarez-Bello, I. (2016). Influencia de la luz en algunas características fisiológicas del cafeto (*Coffea arabica* L. cv. Caturra) en condiciones de vivero. *Cultivos Tropicales*, 37(4), 89-97.
- Flores Vichi, F. (2015). La producción de café en México: ventana de oportunidad para el sector agrícola de Chiapas. *Revista Espacio I+D Innovación más Desarrollo*, 4 (7), pp.174–194. [Online]. Available at: doi:10.31644/imasd.7.2015.a07.
- Garc, M. And Roa-acosta, D. (2022). *Effect of the Altitude Gradient on the Physiological Performance of Quinoa in the Central Region of Colombia*. Pp.1–14.
- Gómez-Tosca, E. G., Alvarado-Castillo, G., Benítez, G., Cerdán-Cabrera, C. R. And Estrada-Contreras, I. (2021). Distribución potencial actual y futura de *Coffea arabica* L. En la subcuenca Decozalapa, Veracruz, México. *Madera y Bosques*, 27 (2), p.e2722070. [Online]. Available at: doi:10.21829/myb.2021.2722070.
- Jaulis C., J. C., Martínez V., A., Juscamaita M., J., Adama Rojas, E. R. And Adama Gómez,

- J. V. (2020). Efecto de la aplicación combinada de abono líquido y sólido en la producción de plantines de café (*Coffea arabica*) cultivado bajo condiciones de vivero en Chirinos, Cajamarca, Perú. *Anales Científicos*, 81 (2), p.347. [Online]. Available at: doi:10.21704/ac.v81i2.1644.
- Läderach, P., Ramirez–Villegas, J., Navarro-Racines, C., Zelaya, C., Martinez–Valle, A. And Jarvis, A. (2017). Climate change adaptation of coffee production in space and time. *Climatic Change*, 141 (1), Climatic Change., pp.47–62. [Online]. Available at: doi:10.1007/s10584-016-1788-9.
- Latifah, S., Muhdi, M., Purwoko, A. and Tanjung, E. (2018). Estimation of aboveground tree biomass *Toona sureni* and *Coffea arabica* in agroforestry system of Simalungun, North Sumatra, Indonesia. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 19 (2), pp.620–625. [Online]. Available at: doi:10.13057/biodiv/d190239.
- Lövenstein, H.; Lantinga, E.A.; Rabbinge, R.; Van Keulen, H. 1993. Principles of production ecology. Wageningen, Agricultural University. 117 p.
- López-Ruiz, J. C. (2005). Comportamiento del intercambio gaseoso de *Coffea arabica* L en tres altitudes de la zona cafetera central colombiana. *Cenicafé* 55 (3): 202-212.2004
- Malhi, G. S., Kaur, M. And Kaushik, P. (2021). Impact of climate change on agriculture and its mitigation strategies: A review. *Sustainability (Switzerland)*, 13 (3), pp.1–21. [Online]. Available at: doi:10.3390/su13031318.
- Melese, Y. Y. And Kolech, S. A. (2021). Coffee (*Coffea arabica* L.): Methods, objectives, and future strategies of breeding in Ethiopia—Review. *Sustainability (Switzerland)*, 13 (19). [Online]. Available at: doi:10.3390/su131910814.
- Nicotra, A. B., Atkin, O. K., Bonser, S. P., Davidson, A. M., Finnegan, E. J., Mathesius, U., Poot, P., Purugganan, M.D., Richards, C.L., Valladares, F., and van Kleunen, M. (2010). Plant phenotypic plasticity in a changing climate. *Trends in Plant Science*, 15 (12), pp.684–692. [Online]. Available at: <https://pdf.sciencedirectassets.com/271203/1-s2.0-S1360138510X00127/1-s2.0-S1360138510001986/main.pdf?X-amz-security-token=agojb3j pz2lux2vjedeacxvzlwvhc3qtmsjhmeuciqd65jtelnrk0qpn ydhu5jrtljqswd1sydlka3vpednarqigwelwuhlthfyd2mnpok49d6%2f3c%2Ff4O94Hd%2feshq>.
- Núñez Rodríguez, J. De J., Carvajal Rodríguez, J. C. And Mendoza Ferreira, O. (2021). Tamaño y peso de granos de café en relación con rangos altitudinales en zonas cafetaleras de Toledo, Norte de Santander (Colombia). *Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, 22 (2). [Online]. Available at: doi:10.21930/rcta.vol22_num2_art:1820.
- Pilozo Mantuano, W., Indacochea Ganchozo, B., Castro Landín, A., Vera Tumbaco, M. And Gabriel Ortega, J. (2022). Principales enfermedades causantes de la pérdida de rendimientos de los cultivos de café arábigo (*Coffea arabica* L.) en la zona sur de Manabí, Ecuador. *UNESUM-Ciencias. Revista Científica Multidisciplinaria. ISSN 2602-8166*, 6 (2), pp.117–134. [Online]. Available at: doi:10.47230/unesum-ciencias.v6.n2.2022.632.

- Rodríguez, L., Valdés, R., Verdecia, J., Arias, L., Medina, R., & Velasco, E. (2001). Growth, relative water content, transpiration and photosynthetic pigment content in coffee trees (*Coffea arabica* L.) growing at different sunlight regimes. *Cultivos Tropicales*, 22(4), 37-41.
- Rodríguez-Larramendi, L. A., Hernández, F. G., Castro, H. G., Flores, M. F., Castañeda, J. C. G. and Ruiz, R. P. (2016). Anatomía foliar relacionada con la ruta fotosintética en árboles de café (*Coffea arabica* L., var. Caturra Rojo) expuestos a diferentes niveles de radiación solar en la Sierra Maestra, Granma, Cuba. *Acta Agronomica*, 65 (3), pp.248–254. doi:10.15446/acag.v65n3.46731.
- Taiz, L., & Zeiger, E. (2002). *Fisiología Vegetal* (volumen 2) Sinauer Associates Inc Barcelona. *España ISBN*, 978-84.
- Zelada, H.; Reynel, C. (2019). Estimación de rasgos funcionales en dos especies arbóreas de una gradiente altitudinal tropical en el Centro de Perú. *Revista Forestal del Perú*, 34 (2), p.132. [Online]. Available at: doi:10.21704/rfp.v34i2.1323.
- Sharma, U.D. & Rai, V.K. 1989. Modulation of osmotic closure of stomata, stomatal resistance and k fluxes by exogenous amino acids in *Vicia faba* L. leaves. *Biochemic and Physiologie der Pflanzen*. 185:369

DISCUSIÓN GENERAL

El análisis factorial de componentes principales (AFCP) permitió realizar un análisis integrador de la información obtenida durante los cuatro muestreos realizados en ambos gradientes altitudinales (Figura 1). Se demuestra el efecto regulador que ejercen los árboles de sombra independientemente del gradiente altitudinal, confirmando por Lisnawati *et al.*, 2017; Andrade y Zapata, 2020 que la densidad de árboles ejerce un efecto atenuador; modificando el microclima y la radiación disponible. A 1000 msnm, debido a la mayor exposición de los cafetos a la radiación solar, se observó también incrementos en la temperatura diurna del aire; cuya relación fue más notoria en mayo. Esto trajo como consecuencia que los cafetos desarrollaran mayor diámetro del tallo (DT). Al respecto se reporta que morfológicamente el diámetro de tallo es uno de los rasgos funcionales que presenta cambios ante ambientes contrastantes (Zelada y Rangel 2019).

El incremento en la concentración de clorofilas es una estrategia de las plantas, para aumentar la cantidad de absorción lumínica y así evitar procesos de foto-inhibición, lo cual supone una activación de pigmentos fotoprotectores, a fin de realizar una desintoxicación de la clorofila por disipación térmica, mediante el reordenamiento de los cloroplastos en la periferia de la célula (Partelli *et al.*, 2009; Mariño, 2014; Rodrigues *et al.*, 2016; Rodríguez-Larramendi *et al.*, 2016) y que las hojas fueran más densas, lo cual significa que mostraran mayor masa por unidad de superficie foliar (MFE), hallazgo que fue corroborado por Rodríguez-Larramendi *et al.*, (2016), quienes demostraron que las hojas expuestas a mayor radiación solar son más gruesas, formando una doble capa de parénquima de empalizada, lo cual le brinda un mayor volumen para la asimilación de CO₂ (Rodríguez-Larramendi *et al.*, 2016), y que bajo estas condiciones, los cafetos mostraran mayor capacidad de transporte de electrones por centro de reacción (ETo/ CR). Resultados similares fueron reportados por Rodrigues *et al.* (2016) en plantas de *Coffea arabica*, con mayores concentraciones de antioxidantes como mecanismo de desintoxicación, bajo condiciones de estrés térmico (Figura 1).

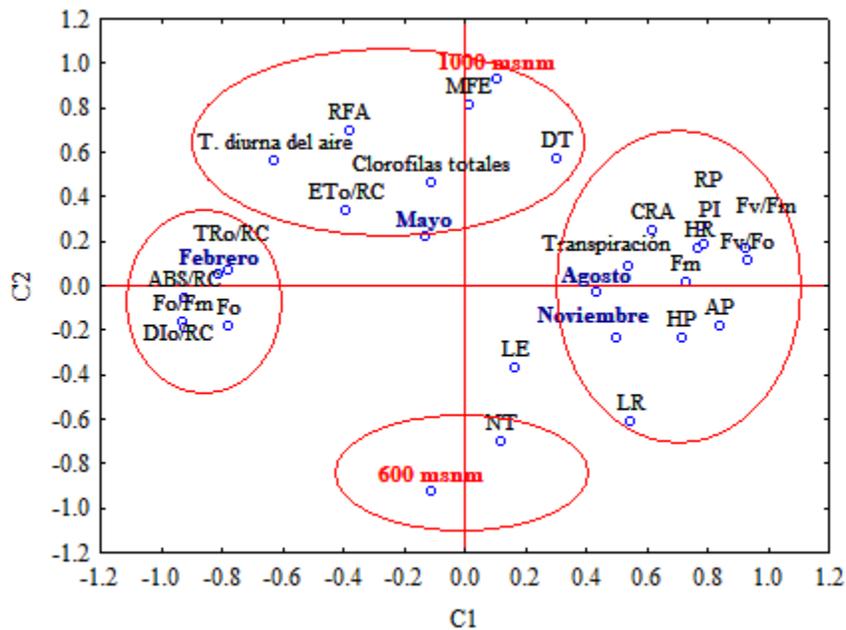


Figura 1. Distribución de las variables del microclima, rasgos funcionales, relaciones hídricas y fluorescencia de la clorofila en cafetos cultivados a 600 y 1000 msnm en diferentes meses del año. Radiación fotosintéticamente activa (RFA), humedad relativa (HR) masa foliar específica (MFE), diámetro de tallo (DT), contenido relativo de agua (CRA), ramas por planta (RP), hojas por planta (HP), altura de la planta (AP), longitud de entrenudos (LE), nudos totales (NT), largo de las ramas (LR), fluorescencia inicial (Fo), fluorescencia máxima (FM), absorción por centro de reacción (ABS/CR), disipación por centro de reacción (DIo/CR), atrapamiento por centro de reacción (TRo/CR), transporte de electrones por centro de reacción (ETo/CR), y decrecimientos en el producto cuántico máximo de la fotoquímica primaria (Fv/Fm), producto cuántico máximo de disminución de excitación fotoquímica (Fo/Fm), fuerza impulsora de la fotosíntesis (PI).

En los meses de agosto y noviembre, en los que la humedad relativa del aire fue mayor los cafetos se caracterizaron por mostrar un estado hídrico más favorable (CRA y Transpiración) resultados similares fueron reportados por Rodríguez-Larramendi *et al.* (2001) en *Coffea arabica* L. var. Caturra, bajo diferentes regímenes de exposición a la radiación solar el contenido relativo de agua fluctuó durante el día, demostrando que las variaciones están asociadas al movimiento estomático debido al eficiente control estomático y a la constitución coriácea de las hojas, asociado a un mayor crecimiento de ramas plagiotrópicas (NR y LR),

altura de la planta (AP), cantidad de hojas por planta (HP) y en menor medida la longitud de los entrenudos fueron mayores. El mayor número de emisión de hojas y ramas en las plantas de café y la humedad relativa demuestran la alta relación que existe con el crecimiento vegetativo, además de que las temperaturas por encima del óptimo reportado para el café afectan la altura de la planta y la longitud de las ramas (Franco, 1958; Da Matta *et al.*, 2007). Tanto las variables que caracterizan el estado hídrico de los cafetos como los rasgos funcionales anteriormente señalados, se correlacionaron un mayor rendimiento cuántico de la fotoquímica primaria, en contraposición con lo observado en los demás flujos de energía relacionados con la absorción, disipación y transferencia de energía por centro de reacción, los cuales mostraron su mayor potencial en el mes de febrero. Resulta interesante que, a 600 msnm, sin bien es cierto que mostró una ubicación totalmente opuesta a la mayor altitud en el biplot, los cafetos crecidos bajo estas condiciones se caracterizaron por emitir mayor cantidad de nudos, lo cual presumiblemente los coloque en una ventaja fenotípica para producir mayor cantidad de frutos, lo cual abre una nueva ventana al estudio del comportamiento productivo del café en el gradiente altitudinal de la región Frailesca.

CONCLUSIONES GENERALES

Las variaciones del microclima en cafetales del gradiente altitudinal seleccionado en la región Frailesca se supeditan al efecto que ejercen los árboles de sombra, tanto por el tipo de copa de la especie usada como sombra como por la densidad de las mismas en los sitios estudiados. En este sentido, los cafetales ubicados a mayor altitud (1000 msnm) estuvieron expuestos a mayor incidencia de radiación fotosintéticamente activa y mayor temperatura diurna del aire, durante todo el año. La RFA osciló entre 16.76 y 220.19 $\mu\text{mol m}^{-1} \text{s}^{-1}$ a 600 msnm, mientras que a 1000 msnm, se registraron valores mínimos y máximos de 58.86 y 556.52 $19 \mu\text{mol m}^{-1} \text{s}^{-1}$. La temperatura del aire promedio anual a 600 msnm osciló entre 23.02 y 27.67 °C y ligeramente inferior a mayor altitud donde se registró un promedio mínimo igual pero con un máximo de 30.61 °C. La humedad relativa se mantuvo por encima a 100° msnm.

Los cafetos crecidos a mayor altitud mostraron mayor crecimiento de los rasgos funcionales relacionados con la anatomía de las hojas, entendiéndose mayor masa foliar específica, debido a la mayor exposición a la RFA, mientras que el diámetro del tallo, la masa foliar específica y el área foliar específica fueron los rasgos que mostraron los mayores índices de plasticidad de distancias relativas.

a 600 msnm en los meses de febrero, mayo y noviembre, los parámetros Absorción por centro de reacción (ABS/CR), Disipación por centro de reacción (DIO/CR), atrapamiento por centro de reacción (TRO/CR), fueron superiores a 1000 msnm y el parámetro transporte de electrones por centro de reacción (ETO/CR) fue mayor en los meses de febrero, mayo y agosto. La radiación solar afectó la transferencia de energía a 600 msnm, en las relaciones ABS/CR, DIO/CR, TRO/CR, ETO/CR, rendimiento cuántico de la fotoquímica primaria (Fv/Fm) y producto cuántico máximo de excitación fotoquímica (Fo/Fm), a 1000 msnm los parámetros se mantienen en rangos óptimos. En la altitud de 600 la temperatura impactó negativamente en los indicadores fluorescencia inicial (Fo), fluorescencia maximaFm, ABS/CR, DIO/RC, TRO/RC, ETO/RC, índice vital de funcionamiento (PI), mientras que a 1000 metros de altura se observa un óptimo a 28°C en los indicadores Fo/Fm, ABS/CR, DIO/CR, TRO/CR, ETO/CR. El contenido de clorofila a y b, fue superior en todos los meses a mayor altitud.

la altitud no tiene un efecto directo sobre la pérdida de agua por transpiración de los cafetos y el contenido relativo de agua fue mayor en febrero en los cafetos crecidos a 1000 msnm. La transpiración no mostró diferencias significativas en los meses de febrero, mayo y noviembre. La altitud ejerce un efecto sobre la densidad estomática siendo de mayor en los cafetos crecidos a 1000 msnm consecuencia de una mayor exposición solar. Las dimensiones de los estomas no se modifican con la altitud.

Estos son los primeros resultados de estudios ecofisiológicos y de plasticidad fenotípica relacionados realizados en plantaciones de cafetos en condiciones de campo en la región Frailesca y establece las bases para un mejor manejo agronómico de cafetales, sobre todo de aquellas prácticas relacionadas con la sombra.

BIBLIOGRAFÍA

- Andrade, H. J. y Zapata Arango, P. C. (2019). Desempeño ecofisiológico de café (*Coffea arabica* L.) cv. Castillo a la sombra en San Juan de Rioseco, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 11 (1), pp.15–27. doi:10.22490/21456453.2915.
- Bernado, W. de P., Rakocevic, M., Santos, A. R., Ruas, K. F., Baroni, D. F., Abraham, A. C., Pireda, S., Oliveira, D. da S., Da Cunha, M., Ramalho, J. C. (2021). Biomass and leaf acclimations to ultraviolet solar radiation in juvenile plants of *Coffea arabica* and *C. Canephora*. *Plants*, 10 (4). [Online]. Available at: doi:10.3390/plants10040640.
- Bote, A. D., Zana, Z., Ocho, F. L. and Vos, J. (2018). Analysis of coffee (*Coffea arabica* L.) performance in relation to radiation level and rate of nitrogen supply II. Uptake and distribution of nitrogen, leaf photosynthesis and first bean yields. *European Journal of Agronomy*, 92 (August 2016). Elsevier., pp.107–114. doi:10.1016/j.eja.2017.10.006.
- Cavatte, P. C., Oliveira, Á. A. G., Morais, L. E., Martins, S. C. V., Sanglard, L. M. V. P. and Damatta, F. M. (2012). Could shading reduce the negative impacts of drought on coffee? A morphophysiological analysis. *Physiologia Plantarum*, 144 (2), pp.111–122. [Online]. Available at: doi:10.1111/j.1399-3054.2011.01525.x.
- Ceacero, C. J., Díaz-hernández, J. L., Antonio, D. and Navarro-cerrillo, R. M. (2012). Evaluación temprana de técnicas de restauración forestal mediante fluorescencia de la clorofila y diagnóstico de vitalidad de brinzales de encina (*Quercus ilex* sub . ballota) Early assessment of forest restoration techniques using chlorophyll fluorescen. 33 (2), pp.191–202. [Online]. Available at: doi:10.4067/S0717-92002012000200009.
- DaMatta, F.M., Ronchi, C.P, Sales, E.F., Araújo, J.B.S (2007). O café conilon em sistemas agroflorestais. In: Ferrão RG, Fonseca AFA, Bragança SM, Ferrão MAG, De Muner LH (eds), *Café Conilon*, pp.377-389. Seag/Incaper, Vitória.

- Davis AP, Gole TW, Baena S, Moat J (2012). The impact of climate change on indigenous arabica coffee (*Coffea arabica* L.): Predicting future trends and identifying priorities. *PLoS One*. 7(11): p.e47981.
- De la Riva, E. G., Pérez-Ramos, I. M., Navarro-Fernández, C. M., Olmo, M., Marañón, T. and Villar, R. (2014). Rasgos funcionales en el género *Quercus*: estrategias adquisitivas frente a conservativas en el uso de recursos. *Ecosistemas*, 23 (2), pp.82–89.
- Fahl, J. I., Carelli, M. L. C., Vega, J. and Magalhães, A. C. (1994). Nitrogen and irradiance levels affecting net photosynthesis and growth of young coffee plants (*Coffea arabica* L.). *Journal of Horticultural Science*, 69 (1), pp.161–169. [Online]. Available at: doi:10.1080/14620316.1994.11515262.
- Franco, C. M. (1958) Efeito da temperatura do solo e suas variações no crescimento do cafeeiro. In *Congresso brasileiro de pesquisas cafeeiras* (Vol. 2, pp. 296-297).
- Gómez-Tosca, E. G., Alvarado-Castillo, G., Benítez, G., Cerdán-Cabrera, C. R. and Estrada-Contreras, I. (2021). Distribución potencial actual y futura de *Coffea arabica* L. en la subcuenca Decozalapa, Veracruz, México. *Madera y Bosques*, 27 (2), p.e2722070. [Online]. Available at: doi:10.21829/myb.2021.2722070.
- Gordillo, A., Rodríguez, L., Salas, M. and Rosales, M. (2020). Effect of salicylic acid on the germination and initial growth of coffee (*Coffea arabica* L. var. Costa Rica 95). *Revista de la Facultad de Agronomía, Universidad del Zulia*, 38 (1). doi:10.47280/RevFacAgron(LUZ).v38.n1.03.
- Latifah, S., Muhdi, Purwoko, A. and Tanjung, E. (2018). Estimation of aboveground tree biomass *Toona sureni* and *Coffea arabica* in agroforestry system of Simalungun, North Sumatra, Indonesia. *Biodiversitas*, 19 (2), pp.590–595. doi:10.13057/biodiv/d190239.

- Lisnawati, A., Lahjie, A. M., Simarangkir, B. D. A. S., Yusuf, S.; Ruslim, Y. (2017). Agroforestry system biodiversity of Arabica coffee cultivation in North Toraja District, South Sulawesi, Indonesia. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 18 (2), pp.741–751. doi:10.13057/biodiv/d180243.
- Mofatto, L. S., Carneiro, F. de A., Vieira, N. G., Duarte, K. E., Vidal, R. O., Alekcevetch, J. C., Cotta, M. G., Verdeil, J. L., Lapeyre-Montes, F., Lartaud, M., et al. (2016). Identification of candidate genes for drought tolerance in coffee by high-throughput sequencing in the shoot apex of different *Coffea arabica* cultivars. *BMC Plant Biology*, 16 (1), BMC Plant Biology. [Online]. Available at: doi:10.1186/s12870-016-0777-5.
- Mariño, Y. A. (2014). Respuesta fotosintética de *Coffea arabica* L. a diferentes niveles de luz y disponibilidad hídrica. *Acta Agronómica*, 63(2), 128-135.
- Matos, F. S., Wolfgramm, R., Gonçalves, F. V., Cavatte, P. C., Ventrella, M. C. and DaMatta, F. M. (2009). Phenotypic plasticity in response to light in the coffee tree. *Environmental and Experimental Botany*, 67 (2), pp.421–427. [Online]. Available at: doi:10.1016/j.envexpbot.2009.06.018.
- Nicholls, C., Henao, A., Altieri, M., Nicholls, C., Henao Salazar, A. and Altieri, M. (2015). Agroecología y el diseño de sistemas agrícolas resilientes al cambio climático. *Agroecología*, 10 (1), pp.7–31.
- Nicotra, A. B., Atkin, O. K., Bonser, S. P., Davidson, A. M., Finnegan, E. J., Mathesius, U., Poot, P., Purugganan, M.D., Richards, C.L., Valladares, F., and van Kleunen, M. (2010). Plant phenotypic plasticity in a changing climate. *Trends in Plant Science*, 15 (12), pp.684–692. [Online]. Available at: <https://pdf.sciencedirectassets.com/271203/1-s2.0-S1360138510X00127/1-s2.0->

S1360138510001986/main.pdf?x-amz-security-token=AgoJb3JpZ2luX2VjEDEaCXVzLWVhc3QtMSJHMEUCIQD65JTElnrk0QpNyDhu5JrtLjqSWd1sYDLKA3vPEdNArQIgWelwuhLThfyd2mNpok49D6%2F3c%2Ff4O94Hd%2FeshQ.

Núñez Rodríguez, J. de J., Carvajal Rodríguez, J. C. and Mendoza Ferreira, O. (2021). Tamaño y peso de granos de café en relación con rangos altitudinales en zonas cafetaleras de Toledo, Norte de Santander (Colombia). *Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, 22 (2). [Online]. Available at: doi:10.21930/rcta.vol22_num2_art:1820.

Olvera Vargas, Luis. Causas y consecuencias de problemas fitosanitarios en el café de San Luis Potosí, México. *Revista Inclusiones* Vol: 9 num Esp (2022): 98-126.

Valladares, F., Gianoli, E. and Gómez, J. M. (2007). Ecological limits to plant phenotypic plasticity. *New Phytologist*, 176 (4), pp.749–763. [Online]. Available at: doi:10.1111/j.1469-8137.2007.02275.x.

Ovalle-Rivera, O., Läderach, P., Bunn, C., Obersteiner, M. and Schroth, G. (2015). Projected shifts in *Coffea arabica* suitability among major global producing regions due to climate change. *PLoS ONE*, 10 (4), pp.1–13. [Online]. Available at: doi:10.1371/journal.pone.0124155.

Partelli, F. L., Vieira, H. D., Viana, A. P., Batista-Santos, P., Rodrigues, A. P., Leitão, A. E., & Ramalho, J. C. (2009). Low temperature impact on photosynthetic parameters of coffee genotypes. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 44, 1404-1415.

Rahn, E., Vaast, P., Läderach, P., van Asten, P., Jassogne, L. and Ghazoul, J. (2018). Exploring adaptation strategies of coffee production to climate change using a

process-based model. *Ecological Modelling*, 371 (July 2017), Elsevier., pp.76–89. [Online]. Available at: doi:10.1016/j.ecolmodel.2018.01.009.

Rodrigues, W. P., Vieira, H. D., Campostrini, E., Figueiredo, F. A. M. M. A., Ferraz, T. M., Partelli, F. L. and Ramalho, J. C. (2016). *Physiological aspects , growth and yield of Coffea spp . in areas of high altitude*. 10 (5), pp.666–674. [Online]. Available at: doi:10.21475/ajcs.2016.10.05.p7366.

Rodríguez-Larramendi, L.; Valdés, R.; Verdecia, J.; Arias, L.; Medina, R.; Velasco, E. (2001). Growth, relative water content, transpiration and photosynthetic pigment content in coffee trees (*Coffea arabica* L.) growing at different sunlight regimes. *Cultivos Tropicales* 22: 37-41.

Rodríguez-Larramendi, L. A. R., Hernández, F. G., Castro, H. G., Flores, M. F., Castañeda, J. C. G. and Ruiz, R. P. (2016). Anatomía foliar relacionada con la ruta fotosintética en árboles de café (*Coffea arabica* L., var. Caturra Rojo) expuestos a diferentes niveles de radiación solar en la Sierra Maestra, Granma, Cuba. *Acta Agronomica*, 65 (3), pp.248–254. doi:10.15446/acag.v65n3.46731.

Taiz, L., & Zeiger, E. (2002). *Fisiología Vegetal (volumen 2)* Synauer Associates Inc Barcelona. *España ISBN*, 978-84.

Valladares, F., Gianoli, E. and Gómez, J. M. (2007). Ecological limits to plant phenotypic plasticity. *New Phytologist*, 176 (4), pp.749–763. [Online]. Available at: doi:10.1111/j.1469-8137.2007.02275.x.

Zelada, H. and Reynel, C. (2019). Estimación de rasgos funcionales en dos especies arbóreas de una gradiente altitudinal tropical en el Centro de Perú. *Revista Forestal del Perú*, 34 (2), p.132. [Online]. Available at: doi:10.21704/rfp.v34i2.1323.

RETRIBUCIÓN SOCIAL



GOBIERNO DE
MÉXICO



CONACYT
CONSEJO NACIONAL DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

Constancia de actividades de retribución social

Ciudad de México a 28 de noviembre de 2022

Lic. Talía Verónica García Aguiar

Coordinadora de Apoyos a Becarios e Investigadores

PRESENTE

Como parte de los compromisos adquiridos en el numeral 8 "LOS DERECHOS Y OBLIGACIONES DEL BECARIO, DE LA COORDINACIÓN ACADÉMICA DE PROGRAMA DEL POSGRADO POSTULANTE Y DEL CONACYT, CON MOTIVO DE LA ASIGNACIÓN DE LA BECA." de la Convocatoria **BECAS CONACYT NACIONALES 2021**, en la cual el **C. Emanuel Romero José** con número de **CVU 1112777** fue beneficiado con una beca para obtener el grado de **maestro** en el programa **Maestría en Ciencias Agroforestales** con número de registro PNPC **006364**, que se imparte en **Universidad de Ciencias y Artes de Chipas**, se hace constar que el **C. Emanuel Romero José** realizó **(1)** actividades de retribución social que se enlistan en el documentó anexo a este documento.

Dichas actividades de retribución social se realizaron durante el periodo **agosto 2020 – julio 2022** tiempo que el becario fue alumno regular de esta **Universidad**. Asimismo, hago constar que, conforme a lo establecido en la Ley General de Archivos, la coordinación del posgrado organiza y conserva la evidencia documental de dichas actividades en caso de que el Conacyt o cualquier otra instancia la requiera.

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo

Dr. Miguel Ángel Salas Marina

Grado, Nombre y firma del Coordinador del posgrado





GOBIERNO DE MEXICO



CONACYT Consejo Nacional de Ciencia e Investigación

Constancia de actividades de retribución social

Actividad 1. Asesorar alumnos en su formación académica.

Descripción de la actividad: Tutorías, capacitación, orientación en temas de relacionados a la fluorescencia de la clorofila, plasticidad fenotípica, rasgos funcionales y diseños experimentales.

Fecha de inicio: Agosto 2020

Fecha de término: Junio 2022

Institución en la que se realizó la actividad: Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas.

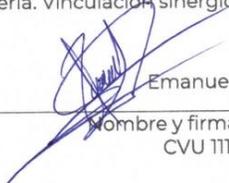
Nombre del responsable de supervisar la actividad: Dr. Luis Alfredo Rodríguez Larramendi.

Cargo del responsable de supervisar la actividad: Coordinador de la facultad de ingeniería agroforestal, sede Villa Corzo.

Datos de contacto del responsable de la actividad: E- mail: alfredo.rodriguez@unicach.mx

Tel: 965 697 5325

Descripción del impacto social de la actividad: Acompañamiento de alumnos a ser profesionales éticos, buscando la vinculación con las comunidades a fin de mejorar la producción local y regional mediante la agroforestería. Vinculación sinérgica entre la academia y las comunidades.


Emanuel Romero José
Nombre y firma del Becario
CVU 1112777


Miguel Ángel Salas Marina
Nombre y firma del Coordinador del programa de posgrado


Luis Alfredo Rodríguez Larramendi
Nombre y firma del responsable de supervisar la actividad





GOBIERNO DE
MÉXICO



Universidades para el Bienestar
Benito Juárez García



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

**LAS UNIVERSIDADES PARA EL BIENESTAR BENITO JUAREZ GARCIA
SEDE PANTEPEC, CHIAPAS, INGENIERIA AGROFORESTAL**

OTORGA EL PRESENTE

RECONOCIMIENTO

AL: **ING. EMANUEL ROMERO JOSE**

POR SU PARTICIPACION COMO PONENTE EN EL TALLER
"CONDICIONES MICROCLIMATICAS QUE INFLUYEN EN EL CRECIMIENTO DEL CAFÉ", EN EL MARCO
DE LA CONMEMORACION DEL NATALICIO DE BENITO JUAREZ GARCIA,
EN LA UNIVERSIDAD PARA EL BIENESTAR BENITO JUAREZ GARCIA, SEDE, PANTEPEC, CHIAPAS

COMISION ACADEMICA DE LA UNIVERSIDAD

ING. NERY ISAIAS SUAREZ RUIZ

LIC. SEBASTIAN HUACASH PALE

BIOL. LAZARO VALENTIN MARTINEZ JIMENEZ

PANTEPEC, CHIAPAS A 17 DE MARZO DEL 2023



LA SOCIEDAD CIENTÍFICA MEXICANA DE ECOLOGÍA A.C.

OTORGA LA PRESENTE

CONSTANCIA

A:

Emanuel Romero José, Luis Alfredo Rodríguez Larramendi, Miguel Ángel Salas Marina, Alder Gordillo Curiel, Eliezer Elias Santizo Toledo, Oel Octavio Solís Vázquez

Por su valiosa participación con la contribución en **cartel** titulada **"Cambios en los rasgos funcionales y plasticidad fenotípica en cafetos en un gradiente altitudinal"**, presentada como parte de la sección temática "Ecología Funcional/Ecosistemas" durante el **VIII Congreso Mexicano de Ecología**, llevado a cabo del 22 al 27 de mayo de 2022 en la ciudad de Oaxaca de Juárez, Oaxaca, México.

DRA. IRERI SUAZO ORTUÑO
PRESIDENTA DE LA SCME

M. EN C. MARCO ANTONIO VÁSQUEZ DÁVILA
PRESIDENTE DEL VIII CMEC

R-134
346



La Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas,
a través de la Facultad de Ingeniería, otorga el
presente

RECONOCIMIENTO

Ing. Emmanuel Romero José

Por su participación en el Coloquio de Proyectos
dentro del evento académico de la XXXIX Semana de
Ingeniería "Ciencia, Tecnología y Desarrollo", llevado a
cabo del 10 al 12 de noviembre de 2021.

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas; A 11 de Noviembre de 2021

ATENTAMENTE
"Por la Cultura de mi Raza"

Ing. Mónica Catalina Cisneros Ramos
Directora de la Facultad de Ingeniería





INRAE



UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS FACULTAD DE INGENIERIA

Otorga la presente CONSTANCIA a:

Emanuel Romero José

Por su participación como **PONENTE** al **Seminario Internacional “Adaptación de árboles forestales al cambio climático”** (Formato híbrido).

En las instalaciones de la **Universidad de ciencias y Artes de Chiapas**
Sede Villa Corzo, el 16 de febrero de 2022.

Villa Corzo, Chiapas, México.


**Dr. Miguel Angel
Salas Marina**

Coordinador de la
Maestría en Ciencias
Agroforestales UNICACH



UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES
DE CHIAPAS
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIDAD ACADÉMICA VILLACORZO

Otras actividades realizadas durante la Maestría en Ciencias Agroforestales.

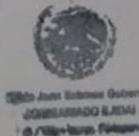


El Ejido Juan Sabines Gutiérrez otorga el
presente

Reconocimiento a:

Emanuel Romero José

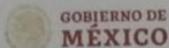
Como participante en el evento "Intercambio de Experiencias de Forestería Comunitaria y Altos Valores de Conservación" que se realizó del 11 al 13 de mayo del 2022 en nuestro Ejido Juan Sabines Gutiérrez, Villa Corzo, Chiapas.



RMCH

C. RENE MUÑOA CHACÓN
Comisariado Ejidal de Juan Sabines
Gutiérrez, Villa Corzo, Chiapas.

C. JAIME CRUZ OLIVER
Promotor forestal comunitario de Juan
Sabines Gutiérrez, Villa Corzo, Chiapas.



GOBIERNO DE
MÉXICO



Universidades para el Bienestar
Benito Juárez García



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

LAS UNIVERSIDADES PARA EL BIENESTAR BENITO JUAREZ GARCIA
SEDE PANTEPEC, CHIAPAS, INGENIERIA AGROFORESTAL

OTORGA EL PRESENTE

RECONOCIMIENTO

A: EMANUEL ROMERO JOSE

POR SU PARTICIPACION COMO PONENTE CON EL TEMA "EFECTO DEL ALUMINIO EN EL CRECIMIENTO Y CONTENIDO DE PIGMENTOS FOTOSINTÉTICOS EN PLÁNTULAS DE MAÍZ (Zea mays L.)", EN EL 2do. FORO ACADÉMICO, USO DEL SUELO EN SISTEMAS AGROFORESTALES, EN LA UBBJ, SEDE PANTEPEC, CHIAPAS

COMISION ACADÉMICA DE LA UNIVERSIDAD

ING. NERY ISAIAS SUAREZ RUIZ

LIC. SEBASTIAN HUACASH PALE

BIOL. LAZARO VALENTIN MARTINEZ JIMENEZ

PANTEPEC, CHIAPAS A 27 DE ABRIL DEL 2022

Colaborador en el artículo que lleva por título:

EFFECTO DEL ALUMINIO EN EL CRECIMIENTO Y CONTENIDO DE CLOROFILA EN PLÁNTULAS DE MAÍZ.

Artículo Científico



Rev. Fitotec. Mex. Vol. 44 (1): 25 - 31, 2021

EFFECTO DEL ALUMINIO EN EL CRECIMIENTO Y CONTENIDO DE CLOROFILA EN PLANTULAS DE MAIZ

EFFECT OF ALUMINUM ON GROWTH AND CHLOROPHYLL CONTENT IN MAIZE SEEDLINGS

Luis A. Rodríguez-Larramendi¹, Francisco Guevara-Hernández^{2*}, Manuel A. La O-Arias², Emanuel Romero-José¹, Vidal Hernández-García¹ y Miguel A. Salas-Marina¹

¹Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Facultad de Ingeniería, Villa Corzo, Chiapas, México. ²Universidad Autónoma de Chiapas, Facultad de Ciencias Agronómicas, Villaflores, Chiapas, México.

*Autor de correspondencia (francisco.guevara@unach.mx)

RESUMEN

El aluminio es el elemento más limitante del crecimiento de las plantas en suelos ácidos. Estudiar el efecto de este elemento en las plantas contribuye a mejorar las prácticas agrícolas. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto del aluminio en plántulas de maíz (*Zea mays* L.), bajo la hipótesis de que el aluminio en concentraciones menores a 1.0 mg L⁻¹ estimula el crecimiento y la síntesis de clorofila. Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con siete repeticiones en condiciones de laboratorio. Los tratamientos consistieron en concentraciones de 0, 0.5, 1.0 y 2.0 mg L⁻¹ de Al³⁺. Se obtuvo el porcentaje de germinación y a los 10 d se midió altura del vástago, diámetro del tallo, porcentaje de plántulas con hojas, área foliar, cantidad de raíces por vástago, biomasa acumulada en el vástago y las raíces, y contenido de clorofila. Los datos se analizaron con análisis de varianza y las medias se compararon con la prueba de Tukey ($P < 0.05$). La germinación se redujo en los tratamientos con aluminio hasta 3.94 y 12.8 % con 1.0 y 2.0 mg L⁻¹, respectivamente, con respecto al testigo. El número de raíces por plántulas aumentó 55.5 % con el tratamiento de 2.0 mg L⁻¹ con respecto al testigo y la altura de la planta fue mayor en todos los tratamientos con Al³⁺. La germinación y la acumulación de biomasa en las raíces fueron las variables más sensibles al Al³⁺, y concentraciones superiores a 1.0 mg L⁻¹ inhibieron el

per seedling increased by 55.5 % with the treatment of 2.0 mg L⁻¹ compared to the control, and the height of the plant was higher in all the treatments with Al³⁺. Germination and biomass accumulation in roots were the most sensitive traits to Al³⁺, and concentrations higher than 1.0 mg L⁻¹ inhibited leaf growth and chlorophyll content.

Index words: *Zea mays* L., aluminum, biomass accumulation, growth, leaf area.

INTRODUCCIÓN

El aluminio representa 7 % de la corteza terrestre y su abundancia es menor sólo a la del oxígeno y el silicio (Matsumoto y Motada, 2012; Matsumoto *et al.*, 2015); al igual que el selenio y el cobalto, no se considera elemento esencial para las plantas, aunque se puede acumular en los tejidos vegetales en concentraciones de 0.1 a 500 µg g⁻¹ de materia seca (Taiz *et al.*, 2015).