

Plasticidad fenotípica del café en un gradiente altitudinal de la región Frailesca de Chiapas

Emanuel Romero José¹
Luis Alfredo Rodríguez Larramendi^{2,5}
Miguel Ángel Salas Marina²
Alder Gordillo Curiel²

1 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 para correspondencia: alfredo.rodriguez@unicach.mx

Resumen

El cultivo de café en agroecosistemas atípicos para esta especie afecta su crecimiento debido al efecto del clima, principalmente la temperatura y la radiación solar. En el año 2021, se estudiaron las variaciones en el microclima, los rasgos funcionales y plasticidad fenotípica del café en dos gradientes altitudinales de la región Frailesca, Chiapas. En dos cafetales bajo sombra, situados a 600 y 1 000 msnm, se registraron la altura de la planta, diámetro del tallo, longitud de entrenudos ortotrópicos, ramas por planta, longitud de ramas plagiotrópicas, nudos totales por planta, hojas por planta, masa foliar específica y área foliar específica. Se registraron las variaciones diurnas de la radiación fotosintéticamente activa, temperatura del aire y humedad relativa. Tanto la radiación fotosintéticamente activa, como la temperatura del aire y las hojas por planta fueron mayores a 1 000 msnm debido la mayor cantidad de sombra existente en el cafetal situado a 600 msnm. La radiación fotosintéticamente activa e incidente en ambas altitudes estuvo por debajo de los puntos de compensación y saturación luminosa reportados para este cultivo, mientras que la temperatura del aire y las hojas por planta HR estuvieron fuera del rango recomendado para el café. El diámetro del tallo, ramas por planta, longitud de ramas plagiotrópicas, la masa foliar específica y el área foliar específica, fueron mayores en los cafetos crecidos a 1 000 msnm. Se concluye que la variedad Costa Rica 95, mostró plasticidad fenotípica en respuesta a la gradiente altitudinal reflejada en incrementos en el índice de plasticidad de distancias relativas del diámetro del tallo y la masa foliar específica.

Palabras clave:

Coffea arabica L., microclima, rasgos funcionales.



License (open-access): Este es un artículo publicado en acceso abierto bajo una licencia **Creative Commons**

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; donde el estado de Chiapas es 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, al mostrar 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 1 000 m (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, lo que propicia el incremento de la temperatura y modifica 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 y modificar 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), donde la luz y el agua son 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, entendiéndose 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, al exhibir características adaptativas con altos atributos para tolerar mayor exposición solar (Fahl *et al.*, 1994); lo cual incrementa el grosor histológico y disminuye 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

El estudio 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. Su territorio ocupa 7 987.19 km², que representan el 10.7% de la superficie estatal, y la segunda región de mayor extensión territorial en el estado. Climáticamente se ubica en los grupos cálidos y semicálidos, con predominio del cálido subhúmedo con lluvias de verano, seguido por el clima semicálido húmedo con lluvias abundantes de verano.

Sitios de muestreo

Se seleccionaron dos plantaciones de cafeto ubicadas en el municipio Villa Corzo de cafetos en dos altitudes. La primera se ubicó a 3 km de la cabecera municipal a 600 msnm, en las coordenadas 15° 54' y 31" latitud norte y los 93° 15' y 37" longitud oeste en 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, en el suelo se registraron valores pobres en zinc, moderadamente bajo en manganeso. Bajo contenido de cobre y muy pobre en boro. El cafetal estuvo 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 ubicó en la localidad Nueva Reforma Agraria, a 1 000 msnm, en las coordenadas 15° 09' y 31" latitud norte y los 93° 16' y 64" longitud oeste, en 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 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 y muy pobre en boro. Predominaron los árboles de sombra de *Conostegia xalapensis* B., *Platymiscium yucatanum* S. y *Ficus carica* L. En cada sitio se seleccionaron al azar cinco parcelas de 20 x 20 m y en cada parcela se eligieron dos plantas al azar con características fenotípicas (altura y número de ramas) similares. Cada planta se consideró como una unidad experimental, para un total de diez repeticiones en cada sitio de muestreo.

Material vegetal

La investigación se desarrolló en plantaciones de café (*Coffea arabica* L. var Costa Rica 95), de cuatro años de plantadas a una densidad de 5 000 plantas ha⁻¹, en sistemas agroforestales típicos de la región Frailesca, Chiapas.

Microclima

En cada localidad se registró 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 h, cada 30 min, desde febrero a noviembre de 2022.

Rasgos funcionales

Se midió la altura de la planta (AP), desde la base del tallo hasta el ápice caulinar con un flexómetro (cm planta⁻¹). El diámetro del tallo (DT) se tomó a 30 cm 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 (LE). La longitud de ramas plagiotrópicas (LRP) se midió con un flexómetro. Se contaron las hojas por planta (HP, ramas por planta (RP) y nudos totales (NP). La determinación de la masa foliar específica (MFE) y el área foliar específica (AFE) se realizó con diez discos de hojas de la parte media de cada una de las cinco plantas seleccionadas, los que se colocaron en un horno de secado por convección de gravedad, marca Dakton®, a 80 °C hasta

peso constante. Luego se dividió el peso seco entre el área de cada disco para obtener la masa foliar específica (g cm^{-2}) y viceversa para el área foliar específica ($\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$).

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 con 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, 2007).

Resultados y discusión

Microclima

Los registros de radiación fotosintéticamente activa (RFA) fueron significativamente superiores en el cafetal situado a 1 000 msnm ($p \neq 0.05$), excepto en el mes de noviembre (Cuadro 1). El promedio anual de la RFA a 1 000 msnm fue de $252.23 \text{ (mol m}^{-2} \text{ s}^{-1})$, estadísticamente mayor que a 600 msnm, en un rango de 58.86 y $556.52 \text{ (mol m}^{-2} \text{ s}^{-1})$ (Cuadro 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 demostró que la disminución de la radiación disponible, debido a la sombra, modifica las condiciones microclimáticas para el cultivo asociado (Andrade y Zapata, 2020).

Cuadro 1. Variación mensual y anual de las variables del microclima en cafetales crecidos a 600 y 1 000 msnm en la región Frailesca.

Meses	Variables	600 (msnm)			1000 (msnm)			t de Student	p		
		Desviación estándar	Mínimo	Máximo	Desviación estándar	Mínimo	Máximo				
Febrero	HR (%)	50.08	0.4	49.55	50.41	57.86	0.92	56.61	58.87	-17.35	0
	T (°C)	27.44	0.17	27.28	27.67	28.39	0.18	28.2	28.69	-8.47	0
	RFA ($\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	155.41	48.15	100.05	220.19	410.05	101.58	270.24	556.52	-5.07	0
Mayo	HR (%)	70.89	0.37	70.42	71.2	70.5	0.19	70.28	70.7	2.1	0.05
	T (°C)	27.06	0.2	26.79	27.24	30.51	0.08	30.42	30.61	-36.06	0
	RFA ($\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	100.64	28.33	78.48	147.9	241.61	134.02	64	437.86	-2.3	0.05
Agosto	HR (%)	71.64	1.88	68.44	73.18	75.24	0.19	74.93	75.42	-4.27	0
	T (°C)	24.12	0.1	24.02	24.26	25.7	0.27	25.41	26.07	-12.33	0

Meses	Variables	600 (msnm)	Desviación estándar	Mínimo	Máximo	1000 (msnm)	Desviación estándar	Mínimo	Máximo	t de Student	p
Noviembre	RFA ((mol m ⁻² s ⁻¹))	61.66	69.61	25.43	185.86	181.7	112.5	58.86	342.43	-2.03	0.08
	HR (%)	67.51	0.42	66.84	67.84	69.74	0.49	69.08	70.35	-7.72	0
	T (°C)	23.15	0.09	23.02	23.27	23.15	0.09	23.02	23.27	0	1
Promedio	RFA ((mol m ⁻² s ⁻¹))	24.94	5.4	16.76	30.86	175.56	111.11	93.86	359.14	-3.03	0.02
	HR (%)	65.03	0.42	49.55	73.18	68.34	0.49	56.61	75.42	-1.32	0.19
	T (°C)	25.45	0.09	23.02	27.67	26.94	0.09	23.02	30.61	-1.95	0.06
	RFA ((mol m ⁻² s ⁻¹))	85.66	5.4	16.76	220.19	252.23	111.11	58.86	556.52	-4.73	0

RFA= radiación fotosintéticamente activa; T= temperatura; HR= humedad relativa

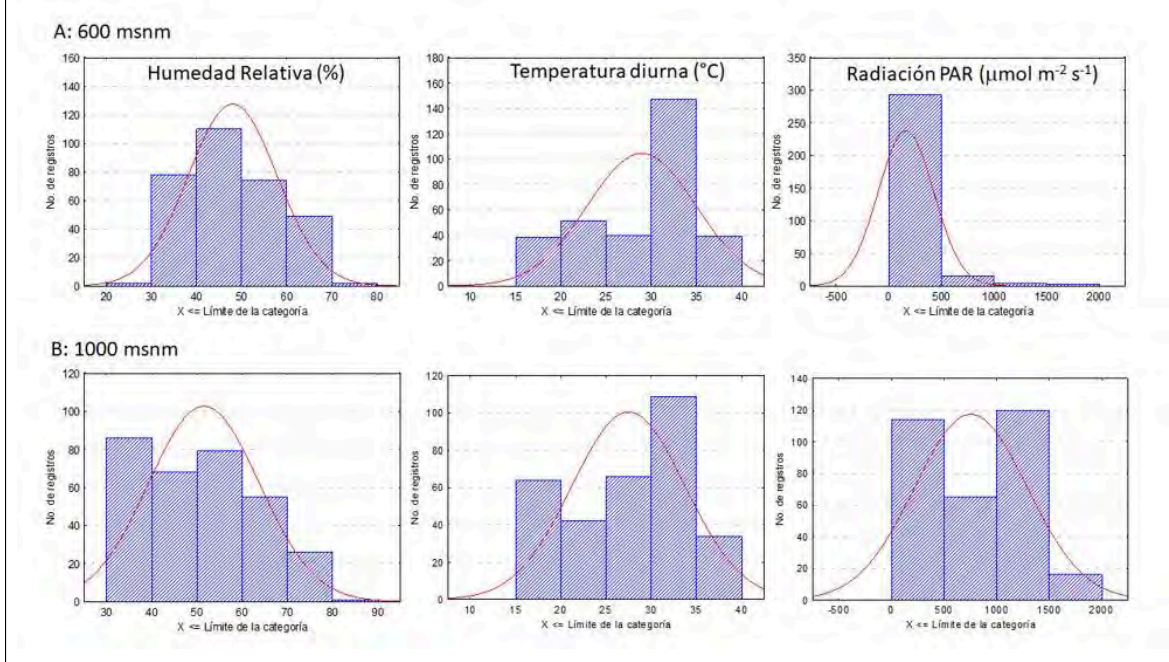
A 600 msnm más de 250 registros de la RFA oscilaron entre 0 y 500 (mol m⁻² s⁻¹), mientras que a 1 000 msnm 120 registros estuvieron el rango de 1 000 a 1 500 (mol m⁻² s⁻¹) (Figura 1), inferior a los valores reportados por Andrade y Zapata (2020) al medio día en cafetales con bajo nivel de sombrío. En estas condiciones, se afecta más la fotosíntesis, pues se ha demostrado que en *C. canephora* los puntos de compensación y saturación de radiación fluctúan entre 10.7 - 27.6 y 552 - 660 μmol m⁻² 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 (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.

La temperatura media diurna del aire fue superior a 1 000 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 (Figura 1).



Figura 1. Histograma de frecuencias de los registros de temperatura diurna del aire, humedad relativa y la RFA en cafetales a 600 y 1 000 msnm en la región Frailesca.



Cabe mencionar que el rango de temperatura de 18 a 21 °C indicado como óptimo para el cultivo del café (Carvajal, 1984) incluye valores nocturnos, mientras que en esta investigación se reportan valores diurnos lo cual podría conducir a interpretaciones erróneas. Aun así, se puede afirmar que los valores promedios anuales (febrero a noviembre) de temperatura registrados a 600 msnm logran ubicarse dentro del rango adecuado y presumiblemente no debería afectar la conductancia estomática ni afectar el intercambio de gases, se ha demostrado que tales repercusiones deben producirse cuando las plantas crecen en un ambiente donde los registros de temperatura alcanzan valores entre 30-35 °C (Taiz y Zeiger, 2007; Andrade y Zapata, 2020).

El valor promedio anual de humedad relativa fue ligeramente superior a 1 000 msnm y osciló entre 49.55 y 73.18% a 600 msnm y entre 56.61 y 75.42% a 1 000 msnm. Se ha indicado que *Coffea arabica* L. crece y se desarrolla bien en un intervalo de 70-95% de humedad relativa (Carvajal, 1984).

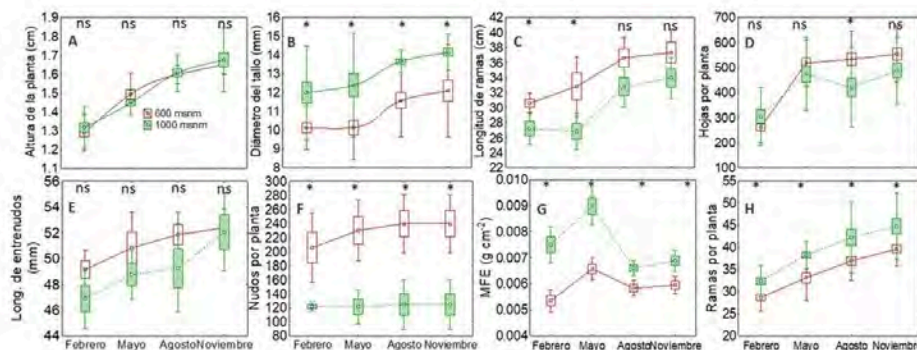
En este sentido, habría que prestar especial interés en futuros hallazgos, pues la información obtenida con esta investigación demuestra que el microclima en ambos sitios de muestreo es más seco que el indicado para el género *Coffea*.

Rasgos funcionales

El DT, RP, LRP, NP y MFE fueron los rasgos funcionales que mayor respuesta presentaron a las variaciones en la altitud. Sin embargo, el crecimiento del eje ortotrópico (AP y LE) no cambió significativamente con la altitud (Figura 2A y E), lo cual demuestra que esta variable no es sensible a las modificaciones producidas por la altitud y sugiere que no es un buen indicador para evaluar la plasticidad del café en ambientes ecológicamente contrastantes. Los NP fueron superiores a menor altitud (Figura 2F).



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 ($p \leq 0.05$). A= altura de la planta (AP); B= diámetro del tallo (DT); C= longitud de ramas plagiotrópicas (LRP); D= hojas por planta (HP); E= longitud de entrenudos (LE); F= nudos por planta (NP); G= masa foliar específica (MFE); H= ramas por planta (RP).



La cantidad de HP (Figura 2D), sólo presentó diferencias significativas a favor de los cafetos crecidos a 600 msnm en el mes de agosto. La MFE (Figura 2G) fue superior a mayor altitud en todos los meses, muy probablemente debido a la mayor incidencia de la RFA (Cuadro 1). 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 CO_2 (Rodríguez-Larramendi *et al.*, 2016).

De manera general, se notó mayor emisión de ramas plagiotrópicas (RP) en los cafetos crecidos a 1 000 msnm (Figura 2H), contrario a lo observado en el crecimiento de las ramas (LRP) (Figura 2C), las cuales presentaron mayores valores a 600 msnm durante los meses de febrero y mayo. El DT fue consistentemente superior en los cafetos crecidos a mayor altitud con diferencias por encima de 2 cm en todos los momentos de muestreo (Figura 2B), 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 mostraron una correlación significativa (Cuadro 2). A 600 msnm la HR 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 1 000 msnm la HR influyó positivamente en el crecimiento en altura de los cafetos, así como la emisión de hojas y ramas plagiotrópicas.

Cuadro 2. Correlaciones canónicas entre los rasgos funcionales del crecimiento de los cafetos y las variables del microclima a 600 y 1 000 msnm.

Rasgos funcionales	600 (msnm)					
	HR (%)	T (°C)	RFA (mol $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	R Canónico	Chi ²	p
Altura de la planta (AP)	0.82	-0.86	-0.67	0.98	72.39	<0.01
Diámetro del tallo (DT)	0.3	-0.73	-0.57			
Hojas por planta (HP)	0.9	-0.65	-0.59			

Rasgos funcionales	600 (msnm)					
	HR (%)	T (°C)	RFA (mol m ⁻² s ⁻¹)	R Canónico	Chi ²	p
Ramas por planta (RP)	0.66	-0.87	-0.6			
Longitud promedio de ramas plagiotrópicas (LRP)	0.53	-0.69	-0.72			
Nudos por planta (NP)	0.62	-0.51	-0.2			
Longitud de entrenudos ortotrópicos (LN)	0.15	-0.25	-0.39			
Masa foliar específica (MFE)	0.60	-0.02	-0.3			
		1 000 (msnm)				
Altura de la planta (AP)	0.73	-0.75	-0.55	0.97	59.05	<0.01
Diámetro del tallo (DT)	-0.25	-0.44	0.09			
Hojas por planta (HP)	0.6	-0.21	-0.45			
Ramas por planta (RP)	0.72	-0.63	-0.43			
Longitud promedio de ramas plagiotrópicas (LRP)	0.49	-0.76	-0.25			
Nudos por planta (NP)	-0.36	0.08	0.13			
Longitud de entrenudos ortotrópicos (LN)	0.05	-0.28	0.04			
Masa foliar específica (MFE)	-0.13	0.76	0.17			

Sin embargo, incrementos en temperatura a 600 msnm inhibieron la AP, el DT, HP y el crecimiento de las ramas. A 1 000 msnm el efecto negativo de la temperatura se evidenció en la altura de los cafetos y el crecimiento de las ramas, mientras que la MFE aumentó proporcionalmente con la temperatura (Cuadro 2). El efecto negativo de la RFA se observó solamente a menor altitud en la AP y el crecimiento de las ramas plagiotrópicas.

La significativa relación observada entre la AP ($p \# 0.01$), la mayor emisión de hojas y de ramas en los cafetos y la HR en ambas altitudes demuestra la alta correlación que existe entre la humedad del aire imperante en la región Frailesca con el crecimiento vegetativo del cafeto, expuesto con anterioridad por DaMatta *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 café observado en ambas altitudes pero con mayor relevancia a 600 msnm por la cantidad de variables de crecimiento afectadas (AP, DT, HP, RP y LRP), en comparación con los cafetos crecidos a 1 000 msnm (AP, RP, LRP) demuestran que la exposición continua a temperaturas fuera del rango óptimo para el café y superiores a 30 °C (Figura 1) no sólo afecta el crecimiento del café, 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).

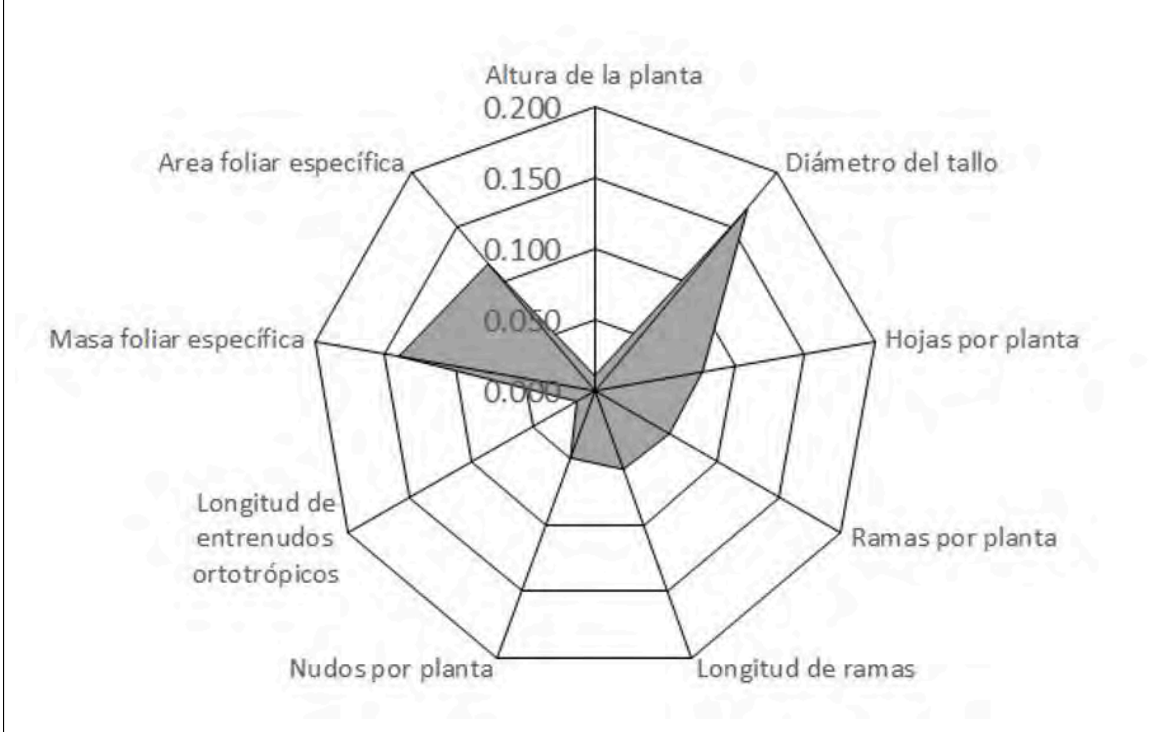
En cuanto al efecto negativo ejercido por la intensidad de la RFA observada solamente a 600 msnm (Cuadro 2), se demuestra que incrementos en la radiación solar afectan el crecimiento de la planta (Fahl *et al.*, 1994; Rodríguez-Larramendi *et al.*, 2001) debido a la reducción de las tasas de crecimiento. En este sentido (Rodríguez-Larramendi *et al.*, 2001) demostraron que en particular, la AP y el DT, fueron las variables más afectadas por los niveles de luz solar, pero no así en el número de ramas. Llama la atención que la MFE, 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 (AP, DT, LE), ramas (RP, LRP y NP) y hojas (HP, MFE, AFE) demostraron que los rasgos funcionales relacionados con el crecimiento foliar (AFE y MFE) y el DT 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 DT como el crecimiento unitario foliar ligados con la anatomía de las hojas (MFE y AFE), son más sensibles a la altitud y presumiblemente sean afines 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. Índice de plasticidad basado en distancias fenotípicas relativas RDPI de rasgos funcionales de cafetos en dos altitudes de la región Frailesca de Chiapas, México.



Los mayores índices de plasticidad fenotípica observados para la masa y el AFE, indican que la variación del área foliar en gradientes altitudinales tropicales está directamente relacionada, con el efecto de los factores ambientales, la geología, altitud y latitud, así como de los factores alométricos propios de cada especie (Garnica y Saldarriaga, 2015). Se confirma entonces que el café es una planta con capacidad de modificar los rasgos morfológicos, lo que demuestra 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 ligados 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 1 000 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 encontró por encima de los valores reportados como óptimos para este cultivo.

Los rasgos funcionales asociados con el diámetro del tallo, el crecimiento foliar (HP, MFE y AFE), así como la cantidad de RP y la LRP fueron los más sensibles a las diferencias en la altitud, siendo los cafetos crecidos a 1 000 msnm los que desarrollaron tallos más gruesos y mayor cantidad de nudos totales por planta, mientras que la MFE y la cantidad de RP fueron mayores en los cafetos crecidos a 600 msnm. La variedad Costa Rica 95 mostró plasticidad fenotípica en respuesta a la gradiente altitudinal reflejada en incrementos en el índice de plasticidad de distancias relativas del DT y la MFE.

De acuerdo con los resultados y evidencias mostradas en esta investigación se recomienda, que, para el manejo de cafetales en la región Frailesca, se consideren las variaciones provocadas por

la altitud en el microclima. Sobre todo, las modificaciones producidas en la radiación solar y la temperatura diurna del aire.

Bibliografía

- 1 Andrade, H. J. y Zapata, P. C. 2019. Desempeño ecofisiológico de café (*Coffea arabica* L.) cv. Castillo a la sombra en San Juan de Rioseco, Colombia. *Rev. Inv. Agrar. Amb.* 11(1):15-27. Doi:10.22490/21456453.2915.
- 2 Bernado, W. P.; Rakocevic, M.; Santos, A. R.; Ruas, K. F.; Baroni, D. F.; Abraham, A. C.; Pireda, S.; Oliveira, D. S.; Da C. M. and Ramalho, J. C. 2021. Biomass and leaf acclimations to ultraviolet solar radiation in juvenile plants of *Coffea arabica* and *C. Canephora*. *Plants*. 10(4):640. Doi:10.3390/plants10040640.
- 3 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. *Eur. J. Agron. Elsevier*. 92:107-114. Doi:10.1016/j.eja.2017.10.006.
- 4 Carvajal, F. J. 1984. Cafeto: cultivo y fertilización. Instituto Internacional de la Potasa. 2. Suiza. 3-254 pp.
- 5 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):111-122. Doi:10.1111/j.1399-3054.2011.01525.x.
- 6 DaMatta, F. M.; Ronchi, C. P.; Sales, E. F. and Araújo, J. B. S. 2007. O café conilon em sistemas agroflorestais. In: Ferrão, R. G.; Fonseca, A. F. A.; Bragança, S. M.; Ferrão, M. A. G. and De Muner, L. H. Ed. *Café Conilon*. 377-389 pp. Seag/Incaper, Vitória
- 7 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.). *J. Hortic. Sci.* 69(1):161-169. Doi:10.1080/14620316.1994.11515262.
- 8 Franco, C. M. 1982. Efeito da temperatura do solo e suas variações no crescimento do cafeeiro e o acúmulo de nutrientes nas partes aéreas do cafeeiro. *Turrialba*. 32(3):249-255.
- 9 Garnica, J. y Saldarriaga, S. 2015. Diversidad funcional en un gradiente altitudinal del complejo de páramos Sumapaz-Cruz Verde. Tesis de grado. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. 73 p.
- 10 Gómez-Tosca, E. G.; Alvarado-Castillo, G.; Benítez, G.; Cerdán-Cabrera, C. R. y Estrada-Contreras, I. 2021. Distribución potencial actual y futura de *Coffea arabica* L. en la subcuenca Decozalapa, Veracruz, México. *Madera y Bosques*. 27(2):e2722070. Doi:10.21829/myb.2021.2722070.
- 11 Gordillo, C. A.; Rodríguez, L. A.; Salas, M. A. and Rosales, M. A. 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):43-59. Doi:10.47280/RevFacAgron(LUZ).v38.n1.03.
- 12 Latifah, S.; Muhdi, M.; Purwoko, A.; Tanjung, E. 2018. Estimation of aboveground tree biomass *Toona sureni* and *Coffea arabica* in agroforestry system of Simalungun, North Sumatra, Indonesia. *Biodiversitas*. 19(2):590-595. Doi:10.13057/biodiv/d190239.
- 13 Lisnawati, A.; Lahjie, A. M.; Simarankir, B. D. A. S.; Yusuf, S. and Ruslim, Y. 2017. Agroforestry system biodiversity of Arabica coffee cultivation in North Toraja District, South Sulawesi, Indonesia. *Bio. J. Biol. Div.* 18(2):741-751. Doi:10.13057/biodiv/d180243.

- 14 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):1-21. Doi:10.3390/su13031318.
- 15 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. *Environ. Exp. Bot.* 67(2):421-427. Doi:10.1016/j.envexpbot.2009.06.018.
- 16 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. 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):2-18. Doi:10.1186/s12870-016-0777-5.
- 17 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 Sci.* 15(12):684-692.
- 18 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):1-13. Doi:10.1371/journal.pone.0124155.
- 19 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*. 371:76-89. Doi:10.1016/j.ecolmodel. 2018.01.009.
- 20 Rodríguez-Larramendi, L.; Valdés, C. R.; Verdecia, M. J.; Arias, B. L.; Medina, R. R.; Velasco, B. 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.
- 21 Rodríguez-Larramendi, L. A. R.; Hernández, F. G.; Castro, H. G.; Flores, M. F.; Castañeda, J. C. G. y 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 Agron.* 65(3):248-254. Doi:10.15446/acag.v65n3.46731.
- 22 Rodríguez, N. F.; Cavatte, P. C.; Silva, P. E.; Martins, S. C.; Morais, L. E.; Medina, E. F. and DaMatta, F. M. 2012. Physiological and biochemical abilities of robusta coffee leaves for acclimation to cope with temporal changes in light availability. *Physiologia Plantarum*. 149(1):45-55.
- 23 StatSoft, Inc. 2007. Statistica. Data analysis software system. Version 8.0. <https://www.statsoft.de/en/home/>.
- 24 Taiz, L. y Zeiger, E. 2007. Fisiología vegetal. Universitat Jaume I. 1 265 p.
- 25 Valladares, F.; Gianoli, E. and Gómez, J. M. 2007. Ecological limits to plant phenotypic plasticity. *New Phytologist*. 176(4):749-763. Doi:10.1111/j.1469-8137.2007. 02275.x.
- 26 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(6):1103-1116. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.06.018>.
- 27 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 de Perú*. 34(2):132-143. Doi:10.21704/rfp.v34i2.1323.



Plasticidad fenotípica del café en un gradiente altitudinal de la región Frailesca de Chiapas

Journal Information
Journal ID (publisher-id): remexca
Title: Revista mexicana de ciencias agrícolas
Abbreviated Title: Rev. Mex. Cienc. Agríc
ISSN (print): 2007-0934
Publisher: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Article/Issue Information
Date received: 01 November 2023
Date accepted: 01 January 2024
Publication date: 30 January 2024
Publication date: January 2024
Volume: 15
Issue: 1
Electronic Location Identifier: e3289
DOI: 10.29312/remexca.v15i1.3289

Categories

Subject: Artículo

Palabras clave:

Palabras clave:

Coffea arabica L.
microclima
rasgos funcionales

Counts

Figures: 3
Tables: 2
Equations: 0
References: 27
Pages: 0