

Fluctuación anual del verdor foliar en guamúchil, como indicador del nivel de clorofila foliar

Yearly fluctuation of leaf greenness in guamúchil, as an indicator of leaf chlorophyll level

Omar **Franco Mora**¹, Sara **Aguirre Ortega**², Álvaro **Castañeda Vildózola**³

Resumen

Pithecellobium dulce es una especie arbórea nativa de México, adaptada a ambientes secos, con potencial para forestar y reforestar. El objetivo del presente trabajo fue determinar la fluctuación anual en el verdor foliar, en unidades SPAD, y la influencia de factores ambientales en dicho valor; así como la relación del valor SPAD con el contenido de clorofila. De enero a diciembre de 2023, se evaluaron tres estadios foliares: roja joven, verde joven y verde madura, en 19 árboles establecidos en Zumpahuacán, Estado de México. De enero a diciembre de 2024, se emplearon hojas verdes maduras de cinco árboles presentando mayor altura. Posteriormente, se colectaron hojas de manera selectiva por su valor SPAD; para cada rango SPAD se determinó área, peso fresco, y contenido de clorofila (total, a y b). Las hojas verdes maduras presentaron mayores valores SPAD; mientras que las hojas verdes

jóvenes presentaron mayor área y peso fresco. En 2023, los valores SPAD de las hojas verdes maduras fluctuaron mensualmente, siendo los meses de junio y julio los de mayor intensidad de verdor foliar. Dichos valores SPAD, con la prueba de Pearson, mostraron correlación positiva, al 0.001, con horas luz (0.890), lluvia (0.859) y temperatura mínima (0.721). En 2024, la fluctuación en valores SPAD fue menor, no existiendo correlación con los factores ambientales. Los valores SPAD se asociaron linealmente, regresión de primer grado, con el contenido de clorofila total (0.940), clorofila a (0.930) y clorofila b (0.900).

Palabras clave: árbol leguminoso, bosque tropical, clorofila, *Pithecellobium dulce*, SPAD

Abstract

Pithecellobium dulce is a Mexican native tree species well adapted to dry environments. Recently, it has been

¹Universidad Autónoma del Estado de México

² Jardín Botánico "JozLiz".

³ Universidad Autónoma del Estado de México

suggested as a good source to forest and reforest different areas types. Aim of present research was to determine the annual fluctuations in foliar SPAD values and the possible influence of some environmental factors, as well as the relationship between the SPAD values and chlorophyll content. From January to December, 2023, SPAD values were measured in three leaf ages: red young, green young, and green mature in 19 *P. dulce* trees growing in Zumpahuacán, Mexico. From January to December, 2024, only the green mature leaves of 5 trees were employed; sample reduction was determined by higher tree height. Thereafter, leaves were classified according their SPAD values; and it was determined their foliar area, fresh weight and chlorophyll (total, a, and b) content. The green mature leaves presented higher SPAD values but green young leaves had

the highest area and fresh weight. In 2023, the green mature leaves presented higher fluctuation on their SPAD values, having maximum values from June to July. Thereafter, in that year, SPAD values were correlated, Pearson test (0.001), with sun light hours (0.890), rain (0.850), and minimum temperature (0.721). Although in 2024, there was a SPAD maximum values on July and August, annual fluctuation was not so deeply, thus no correlation with environmental factors was observed. The SPAD values matched a simple linear regression with the content of total chlorophyll (0.940), chlorophyll a (0.930) and chlorophyll b (0.900).

Keywords: legume tree, tropical forest, chlorophyll, *Pithecellobium dulce*, SPAD

INTRODUCCIÓN

Pithecellobium dulce (Roxb.) Benth es un árbol leguminoso, perennifolio, con espinas y puede alcanzar hasta 20 m de altura (Monroy y Colín, 2004). Pertenece a la familia botánica Fabaceae y es nativo del continente americano, específicamente de México, Belice, Costa Rica, El Salvador, Nicaragua, Honduras, Panamá, Guyana, Colombia, Perú y Venezuela (Pennington y Sarukhán, 2005). En México, varias naciones originarias, entre ellas la cuicateca, maya, mixteca, náhuatl, totonaca y zapoteca, usaron esta especie y la nombraron en sus propias lenguas (Gobierno de México, 2022). Actualmente, entre sus nombres comunes se tiene guamúchil, huamúchil, pinzan y tamarindo Manila (Gobierno de México, 2022, 2023, Ortega-Álvarez *et al.*, 2022).

Pithecellobium dulce crece en casi todos los estados de la República Mexicana (Figura 1) (IBUNAM, 2025). Los porcentajes más altos de ejemplares de esta especie depositados en el herbario MEXU, corresponden a los estados de Oaxaca y Guerrero, 23 y 13%, respectivamente. Por otro lado, el mayor número de ejemplares depositados en el herbario HERBANWMEX fueron colectados en Sonora, seguido de Oaxaca, Sinaloa y Jalisco, con 15, 13, 11, y 11%, respectivamente (Red de Herbarios del Noroeste de México, 2025). Actualmente, *P. dulce* es una de las especies arbóreas dominantes en varios

bosques ubicados en los estados de Sinaloa y Oaxaca (Julian-Caballero, 2021, Sampayo-Maldonado *et al.*, 2021).

Los árboles de guamúchil crecen en los bosques tropicales caducifolios y perennifolios; mientras que en zonas habitadas es considerado una especie tolerada (Monroy y Colín, 2004). En la región de la Mixteca Oaxaqueña y la región del Balsas existe cierto manejo hortícola que incluye la poda y el manejo fitosanitario (Casas *et al.*, 1996). En el estado de Jalisco, árboles de esta especie crecen de manera intercalada con árboles de ciruela mexicana (*Spondias purpurea* L.) (Ramírez *et al.*, 2008). En el sur del Estado de México, *P. dulce* crece en los municipios de Malinalco, Temascaltepec, Tejupilco, Tenancingo, Tlatlaya, Tonatico y Zumpahuacán (Olivares-Pérez *et al.*, 2011, Aguilera *et al.*, 2012; Guadarrama *et al.*, 2020, IBUNAM, 2025, Red de Herbarios del Noroeste de México, 2025).

Las diversas partes que componen la planta de guamúchil han sido empleadas por las comunidades vecinas a su entorno, sirve como barrera rompe viento, alimento para ganado, especie ornamental y fuente de infusiones medicinales (Martínez-De la Cruz *et al.*, 2015). La madera se emplea para construcción y combustible y recientemente, se analiza su potencial como madera transparente, después de someterla a un proceso de des-lignificación (Piedra-Ambriz *et al.*, 2025).

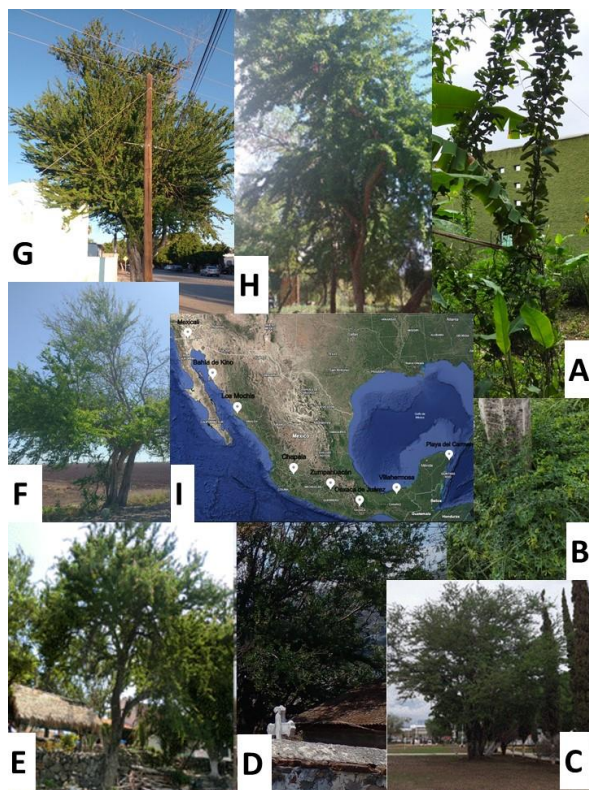
El arilo de la semilla es comestible y se ha consumido por siglos en México; su sabor es descrito como dulce (Pennington y Sarukhán, 2005). Además, en el estado de Colima se reporta su consumo tostado o mezclado con maíz, para preparar los tradicionales sopos (Ortega-Alvarez *et al.*, 2022). En localidades del estado de Morelos, el arilo se emplea para preparar atole y salsa (Monroy y Colín, 2004); y debido a que el fruto se cosecha en la época de secas, es muy apreciado en dicho estado (Sotelo-Barrera *et al.*, 2017). En el aceite de la semilla, el principal aminoácido presente es la arginina, seguido de glutamina, ambos aminoácidos benéficos a la salud humana (Flores-Jiménez *et al.*, 2025).

El uso de la planta de *P. dulce* en la herbolaria mexicana incluye tratamientos contra enfermedades y dolencias. La corteza se emplea para tratar la disentería, fiebre, dermatitis, dolor de ojos y de estómago. Las hojas se recomiendan para reducir el dolor de dientes y oídos, tratar la lepra, úlceras pépticas y la diabetes. Los frutos se reportan como antiinflamatorios (Monroy y Colín, 2004). Los Seris, grupo nativo que habita en el estado de Sonora, usan infusiones de corteza del árbol de guamúchil para tratar casos de diarrea y dolor de estómago (Moreno *et al.*, 2008). Las hojas de esta especie contienen compuestos con propiedades

bactericidas y anti fúngicas, por ejemplo, las antraquinonas, flavonoides, taninos, terpenoides, esteroides y alcaloides (Vanitha y Manikandan, 2016).

Figura 1.

Vista de ocho sitios en donde crece de manera natural el guamúchil (P. dulce) en la República Mexicana: A) Quintana Roo, B) Tabasco, C) Oaxaca, D) Estado de México, E) Jalisco, F) Sinaloa, G) Sonora y H) Baja California. I) Ubicación en la República Mexicana de los ocho sitios mencionados



Nota: Fotografías del archivo del autor. El mapa se elaboró en el software libre Google Earth

Particularmente, en el sur del estado de México el árbol de guamúchil se emplea para alimentar ganado; un árbol puede producir 44.5 kg de hojas secas por año, mientras que la producción de vaina seca es de 64 kg (Olivares-Pérez et al., 2011). Por el contenido foliar de kaempferol, quercitina, ácido cumárico, ácido ferúlico y luteolina, se recomienda para inhibir la eclosión de huevos de *Haemonchus contortus*, un nematodo gastrointestinal que puede parasitar animales de pastoreo libre (Olmedo-Juárez et al., 2022). Recientemente, Apáez-Barrios et al. (2023) recomendaron la incorporación de frutos de *P. dulce* a la dieta de conejos.

El valor alimenticio, ambiental y económico de *P. dulce* ha incrementado el interés de estudiar esta especie en países diferentes a México. Actualmente, se cultiva en India, donde se pretende obtener fibra de celulosa a partir de la corteza (Sathishkumar et al., 2023) e incorporar la pasta del arilo en alimentos de consumo humano (Saha et al., 2021). En México, extractos de guamúchil redujeron la presencia de hongos presentes en el periodo postcosecha de productos de interés hortícola como la fresa (Bautista-Baños et al., 2003).

Los árboles de esta especie prestan servicios ambientales, entre ellos, la fijación de nitrógeno y la estabilización de hábitats (Nguyen et al., 2025). Recientemente, varias ciudades mexicanas han elegido la plantación de árboles de guamúchil para reducir la contaminación ambiental (Vazquez et al., 2023); con la ventaja de ser una especie nativa de Mesoamérica y bien adaptada a las zonas áridas (Ortega et al., 2022). Al ser de crecimiento rápido y tolerar la sequía, calor y salinidad (Pennington y Sarukhán, 2005, El-Juhani, 2005), se recomienda para reforestar áreas donde se considera nativo, particularmente el bosque tropical caducifolio, incluyendo los estados de México, Guerrero y Puebla (Basave-Villalobos et al., 2022). Los trabajos sobre la fenología de esta especie no son extensos, pero se tienen algunos datos sobre su respuesta a la fertilización y la exposición a la luz (Basave-Villalobos et al., 2020). En Arabia Saudita, se determinó que la densidad de población modula el diámetro del tallo y el área foliar, pero no la altura del árbol (El-Juhani, 2005).

Los bosques tropicales, en donde habita originalmente el guamúchil, son el principal regulador de la dinámica del carbono tropical, pero son endebles al cambio climático y del uso de la tierra, incluyendo la conversión a la agricultura y la ganadería (Wang X. et al., 2023). Debido al riesgo de calentamiento global, se ha indicado la importancia de profundizar en el conocimiento del proceso de fotosíntesis, principal proceso de captura de carbono, particularmente en especies que se desarrollan, o son nativas de bosques tropicales, región en donde poco trabajo se ha desarrollado en este aspecto (Tiwari et al., 2025). Los bosques tropicales, y con ello sus componentes, son de suma importancia para reducir los efectos del cambio climático y mejorar las condiciones ambientales globales (Amankwah, 2019).

La clorofila es un pigmento verde con un papel único en el proceso de fotosíntesis, absorbe la luz solar y produce energía bioquímica; normalmente, su contenido refleja el estado fisiológico de la planta (Zhang et al., 2022). La cantidad de clorofila foliar presente en un ciclo de crecimiento es factible de ser modulada por factores edáfico ambientales, incluidos la temperatura, disponibilidad de agua y luz, así como la

presencia de plagas y enfermedades (Wang T. et al., 2023). Una alternativa para conocer el nivel de clorofila foliar es el uso del determinador SPAD (Soil Plant Analysis Development). Con los datos emanados de este instrumento, en varias especies forestales se ha encontrado una relación lineal entre el contenido de clorofila foliar y los valores SPAD (Zhang et al., 2022).

Esta investigación se realizó con el objetivo de determinar la fluctuación anual, 2023 y 2024, de los valores foliares SPAD, y la posible influencia de la temperatura, precipitación y luminosidad en dicho verdor en árboles de *P. dulce* establecidos en Zumpahuacán, Estado de México, México.

El presente estudio se desarrolla bajo un enfoque cualitativo, utilizando el método de estudio de casos, dado que este permite un análisis profundo y contextualizado del fenómeno investigado. Esta metodología resulta adecuada para la recolección, agrupación

MÉTODOS Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

Sitio de estudio

Todas las fases del trabajo de campo se realizaron en el Jardín Botánico Jozliz, ubicado en Zumpahuacán, Estado de México. La altitud del sitio es de 1934 m, con temperatura media anual de 17.35°C y 1359 mm de precipitación (Sistema Meteorológico Nacional, 2015; Weather Atlas, 2025). Los datos mensuales de temperaturas, precipitación y luminosidad se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1.

Condiciones climáticas de Zumpahuacán, Estado de México: Temperatura mínima (Tmin), temperatura media (Tmed), Temperatura máxima (Tmax), Humedad relativa (HR), Lluvia (LL), Horas luz (Hluz), Horas sol (HS) y Luminosidad (Lm).

Mes	Tmin (°C)	Tmed (°C)	Tmax (°C)	HR (%)	LL (mm)	Hluz (hr)	HS (hr)	Lm (lux)
Enero	8.30	14.70	21.10	55	10	11.1	9.7	99600
Febrero	9.60	16.45	23.30	50	14	11.5	9.8	101000
Marzo	11.20	18.15	25.10	45	16	12.1	9.7	105700

Abril	13.10	20.10	27.10	42	25	12.6	9.7	130000
Mayo	14.70	20.75	26.80	53	103	13.0	9.8	135000
Junio	13.60	18.70	23.80	73	242	13.2	9.7	117400
Julio	12.20	17.35	22.50	79	265	13.1	8.7	180000
Agosto	12.00	17.35	22.70	80	256	12.7	8.9	111500
Septiembre	12.30	16.90	21.50	83	239	12.2	8.8	130000
Octubre	11.70	16.80	21.90	75	145	11.7	9.1	114200
Noviembre	10.40	16.00	21.60	68	39	11.3	8.1	93100
Diciembre	8.80	14.95	21.10	60	5	11.0	9.2	95400
Promedio	x:	x:	x:	x:	T:	x:	x:	x:
(x)	11.41	17.35	23.21	63.6	1359	12.13	9.27	117741
o total (T)								

Nota. Datos de: Sistema Meteorológico Nacional (2015) y Weather Atlas (2025).

La luminosidad se midió como se describe en materiales y métodos

En junio de 2020, se sembraron semillas de guamúchil procedentes del municipio de Zumpahuacán. Las plántulas se desarrollaron en condiciones de maceta hasta enero de 2021. Al mes siguiente, aproximadamente 30 plantas se trasplantaron directamente al suelo.

Estudio foliar

Para este estudio, y de acuerdo a la fenología foliar, las hojas de guamúchil se clasificaron en hojas rojas jóvenes: primer estadio foliar visible, con 100% de su área el foliar en tonalidad roja y suficiente para manipularla en el SPAD; hojas verdes jóvenes: lámina foliar de color verde pálido; y hojas verdes maduras: de tonalidad verde oscuro (Figura 2).

De enero a diciembre de 2023 se emplearon 19 árboles de guamúchil; se determinó el índice de verdor con el determinador SPAD en las tres edades foliares descritas: roja joven, verde joven y verde madura. Al menos una determinación mensual, empleando 10 hojas de cada árbol y estadio foliar. Las hojas empleadas se encontraban expuestas a la luz solar, todas las determinaciones se realizaron entre las 12:00 y 14:00 h. Para cada mes, se realizó un análisis de varianza para los valores de los tres tipos de hoja y, cuando fue necesario, se compararon las medias con la prueba de Tukey al 0.05.

Durante el periodo de estudio, se determinó, con un luxómetro digital, que el promedio de luminosidad fue de 117000 luxes a pleno sol, y bajo condiciones de sombra del árbol se tenían 12200 luxes.

Figura 2.

Imagen de los tres tipos de hoja de *P. dulce* empleadas para determinar su índice de verdor con el medidor SPAD.



Nota: Fotografía obtenida del archivo de los autores

Posteriormente, con los datos mensuales de temperatura, precipitación y luminosidad de la base de datos del sistema Weather Atlas (Weather Atlas, 2025). Se calculó la correlación de Pearson entre los valores SPAD y los datos ambientales del mes de lectura, así como de la suma del mes de lectura y el mes previo. La suma de dos meses se realizó suponiendo la acumulación de estímulos ambientales o fisiológicos que pudieran ocurrir en la hoja.

Para el ciclo enero-diciembre de 2024, se determinó el índice de verdor en hojas verdes maduras de cinco árboles de guamúchil. Estos se seleccionaron debido a su mayor altura, pero la altura del árbol en donde se ubicaban las hojas de lectura fue la misma que del ciclo 2023. Estos valores no se compararon estadísticamente con los del año previo.

En julio de 2024, ya conociendo los datos 2023, y con el fin de coleccionar hojas con todos los rangos SPAD conocidos, se realizó un estudio foliar, clasificando las hojas por su valor SPAD. Se coleccionaron hojas con valores SPAD: 17, 25, 33, 38, 42, 50, 58, 63 y 68 unidades, para determinar su área foliar, con un determinador de área foliar LI-3000C; peso de cada hoja y calcular el índice peso fresco/área. Posteriormente, se determinó el contenido de clorofila foliar con el método reportado por Ruiz et al. (2019), extrayendo dicho pigmento en acetona. Con el contenido de clorofila se calculó su posible ecuación lineal con los valores SPAD, en el software SPSS 15.0.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En todos los meses de 2023, los valores SPAD fueron mayores ($P \leq 0.05$) en las hojas verdes maduras que en las verdes jóvenes y las rojas jóvenes. Mientras que, entre las hojas jóvenes, las verdes presentaron mayores valores que las rojas (Figura 3). Estos resultados confirman que en *P. dulce* se presentan, al menos, tres estadios foliares visualmente diferenciados. Este hecho no implica que no puedan existir otros estadios fisiológicos; sin embargo, visualmente serían difíciles de determinar; y para este trabajo, las láminas foliares de poca área pudieran dificultar su manipulación en el medidor SPAD. La determinación detallada de estadios foliares en especies arbóreas de interés farmacológico, i.e. *Greyia radlkoferi* Szyszyl., puede completarse analizando contenidos y perfil de metabolitos secundarios, pigmentos, etc. (Malele et al., 2025)

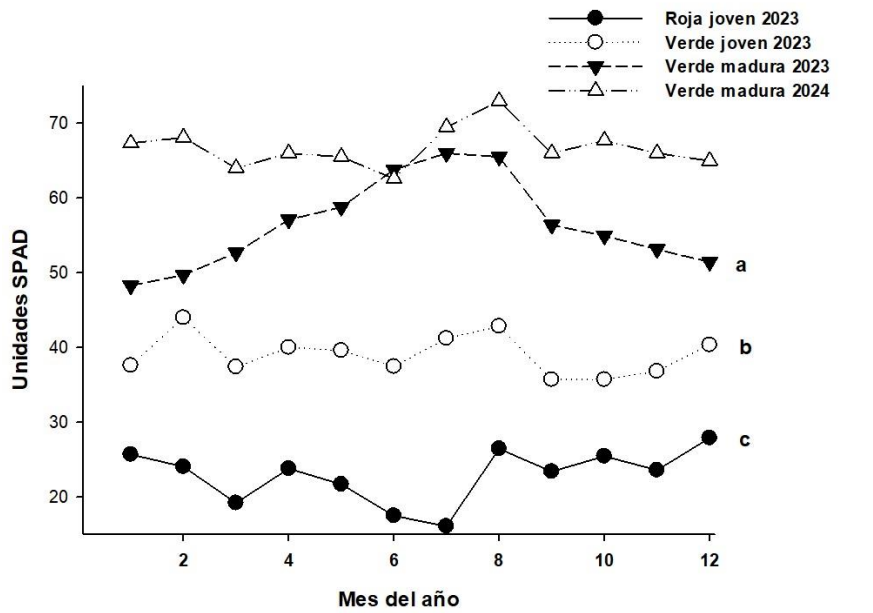
Como se observa en la Figura 3, en 2024, las hojas verdes maduras presentaron menor fluctuación anual que las hojas verdes maduras del año previo. Para estas hojas, en 2023, el mayor valor se registró en junio y julio; mientras que, en 2024, los valores más altos se registraron en agosto. Dicha diferencia en la intensidad de la fluctuación entre años, explica, al menos en parte, que los valores ambientales, horas luz, lluvia y temperatura mínima del mes de lectura, presentaran alta y positiva correlación de Pearson con los valores SPAD 2023 (Tabla 2); pero no se correlacionaron con los valores SPAD 2024.

En árboles de tejocote (*Crataegus mexicana* Moc. & Sessé ex DC.), creciendo en el Valle de Toluca, se reportó que el mayor valor SPAD foliar se registró en el mes de junio, atribuyendo este hecho, en parte, a la temperatura ambiental, aunque también se observó efecto por la dosis de fertilización empleada (Gómez et al., 2024). En cuanto a la temperatura ambiental, se sabe que acelera las reacciones químicas involucradas con el proceso fotosintético (Wang T. et al., 2023). Por otro lado, las diferencias

de los parámetros fotosintéticos estacionales se han explicado como adaptaciones al clima por parte de los vegetales, implicando posibles adecuaciones estructurales, o ajustes bioquímicos que se relacionan con el rango térmico óptimo de fotosíntesis (Tiwari *et al.*, 2025). En este caso, la menor fluctuación del índice SPAD observado en 2024 puede también deberse al cambio de población observada, menos individuos y con mayor desarrollo vegetal, particularmente, altura del árbol. Sin embargo, en ambos años se presentaron meses con mayor verdor en hojas verdes maduras.

Figura 3.

Cinética de los valores SPAD en tres edades de hojas de árbol de guamúchil (P. dulce) en 2023, y hojas verdes maduras en 2024. Los valores para edad de hoja en 2023 fueron estadísticamente diferentes, con la prueba de Tukey al 0.05, en cada mes, lo cual se indica con las letras minúsculas al final de la línea. Meses del año del uno al doce: enero a diciembre



Nota: Elaboración propia

En árboles de tejocote (*Crataegus mexicana* Moc. & Sessé ex DC.), creciendo en el Valle de Toluca, se reportó que el mayor valor SPAD foliar se registró en el mes de junio, atribuyendo este hecho, en parte, a la temperatura ambiental, aunque también se observó efecto por la dosis de fertilización empleada (Gómez *et al.*, 2024). En cuanto a la temperatura

ambiental, se sabe que acelera las reacciones químicas involucradas con el proceso fotosintético (Wang T. *et al.*, 2023). Por otro lado, las diferencias de los parámetros fotosintéticos estacionales se han explicado como adaptaciones al clima por parte de los vegetales, implicando posibles adecuaciones estructurales, o ajustes bioquímicos que se relacionan con el rango térmico óptimo de fotosíntesis (Tiwari *et al.*, 2025). En este caso, la menor fluctuación del índice SPAD observado en 2024 puede también deberse al cambio de población observada, menos individuos y con mayor desarrollo vegetal, particularmente, altura del árbol. Sin embargo, en ambos años se presentaron meses con mayor verdor en hojas verdes maduras.

Tabla 2.

Correlaciones, con la prueba de Pearson, entre los valores SPAD de hojas de guamúchil y factores ambientales en Zumpahuacán, Estado de México, México

Factor ambiental	Hoja verde madura 2023	Hoja roja joven 2023
Horas luz	0.890***	-0.682*
Lluvia	0.859***	ns
Temperatura mínima (sumatoria 2 meses)	0.831***	ns
Temperatura mínima	0.721 **	ns
Lluvia (sumatoria de 2 meses)	0.714 **	ns

***: significativo a 0.001; *: significativo a 0.05; ns: no significativo.

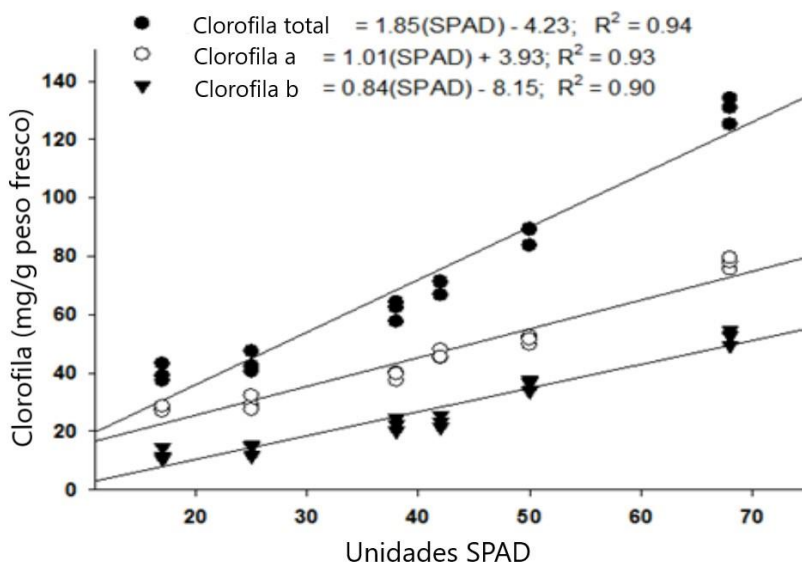
Nota: Elaboración propia

Para este trabajo, los valores SPAD se correlacionaron linealmente con los contenidos de clorofila total (0.940), clorofila a (0.930) y clorofila b (0.900) (Figura 4). Por lo que, se puede inferir que las hojas verdes maduras, en junio y julio de 2023 y julio y agosto de 2024 presentaron mayor tasa fotosintética (Zhang *et al.*, 2022). En este sentido, la edad de la hoja y la estación del año han sido indicados como factores que modulan la capacidad fotosintética (Hébert *et al.*, 2011; Turner *et al.*, 2020). Además, la variación fotosintética estacional, está modulada por interacciones complejas de los diversos factores ambientales: temperatura del aire, disponibilidad de agua, niveles de luminosidad y duración del día (Liu *et al.*, 2004; Yu *et al.*, 2014; Tiwari *et al.*, 2025). También se encuentran mecanismos bioquímicos involucrados, entre ellos ajustes enzimáticos y de procesos fotosintéticos, transporte de electrones fotosintéticos, respiración mitocondrial, entre otros (Tiwari *et al.*, 2025).

Turner *et al.* (2020) reportó que, en un bosque siempre verde de California, Estados Unidos de mérica, la mayor tasa fotosintética ocurrió en el mes de junio. Mientras que, en un bosque tropical caducifolio, en la India, se reportó que la tasa de fotosíntesis, y con ello la captura de carbono atmosférico es mayor en la temporada de lluvias y menor en la temporada previa a la misma y en el invierno (Burman *et al.*, 2020).

Figura 4.

Curva de regresión lineal simple entre los valores foliares SPAD y el contenido de clorofila en una población de *P. dulce* creciendo en Zumpahuacán, Estado de México.



Nota: Elaboración propia

Por otro lado, el valor SPAD de las hojas verdes jóvenes no se relacionó con los factores ambientales analizados, mientras que las hojas rojas jóvenes se correlacionaron de manera negativa con las horas luz. En diferentes especies forestales se ha sugerido que los pigmentos foliares rojos posiblemente sean antocianinas que protegen de la luz solar, mientras las hojas jóvenes desarrollan su sistema fotosintético (Zhu *et al.*, 2016). Otras hipótesis sugieren que el pigmento rojo reduce el ataque de insectos (Chen y Huang, 2012). La correlación negativa encontrada en este trabajo, sugiere cierta relación con la primera hipótesis, pero es necesario realizar más investigación para determinar el papel evolutivo o fisiológico de dichas hojas jóvenes rojas.

Las hojas verdes jóvenes presentaron mayor área y peso fresco en comparación con las hojas jóvenes rojas y las hojas verdes maduras. Además, el índice peso fresco sobre área foliar fue similar entre hojas rojas jóvenes y verdes jóvenes (Tabla 3). De manera general, en las plantas superiores, la mayor expansión foliar concuerda con el término del desarrollo de la hoja, y coincide con la mayor actividad fotosintética, incluso a este periodo, donde la hoja es funcional, se le ha denominado duración de la vida foliar (Garnier *et al.* 2024). Sin embargo, la reducción en área foliar y peso fresco observados en guamúchil, del estadio de hojas verdes jóvenes a hojas verdes maduras, primero, debe estar controlado genéticamente, y posiblemente deberse a la evolución adaptativa que le permita a esta especie tener ventajas de crecimiento en su ambiente nativo. En otras especies vegetales, se ha señalado que la menor área de hoja, si bien limita la productividad fotosintética, reduce la pérdida de agua por transpiración (Volkenburgh, 1999). Este hecho, podría estar relacionado con la adaptación de *P. dulce* a ambientes áridos, en donde la evapotranspiración potencial anual puede superar la cantidad de lluvia presente (Aguilar-Campos *et al.*, 2025). El comportamiento foliar de esta especie hace interesante su estudio para, en un inicio, determinar qué factores se involucran con la disminución de área foliar; entre otros, la cinética de los espacios entre las células del mesófilo, la presencia y actividad de giberelinas endógenas, cambios de pH en la pared celular, densidad de la savia, presencia de tejidos de almacenamiento, etc., así como la modulación que ejercen los factores exógenos (Volkenburgh, 1999; Aguilar-Campos *et al.*, 2025).

Tabla 3.

Características de los folíolos de P. dulce en función de su clasificación por valores SPAD.

Tip o de hoja	SPAD (unidades)	Área (cm ²)	DE	Peso fresc o (mg)	S D	Índice peso fresco /área	S D
RJ	17	1.24	± 0.18	b	12 ± 1	f	± 0.4
RJ	25	1.90	± 0.35	b	18 ± 4	ef	± 0.2
VJ	33	4.68	± 1.31	a	39 ± 1	ab c	± 0.2

VJ	38	5.89	± 0.45	a	46	± 4	ab	7.8	± 0.2	c
VJ	42	6.09	± 0.29	a	53	± 4	a	8.6	± 0.4	c
VM	50	2.74	± 1.11	b	20	± 10	def	7.3	± 1.9	c
VM	58	2.38	± 0.39	b	29	± 6	cd e	12.0	± 0.8	a b
VM	63	2.39	± 0.18	b	34	± 1	bc d	14.2	± 1.2	a
VM	68	2.13	± 0.23	b	21	± 3	def	9.7	± 1.6	b c

Nota: RJ: roja joven; VJ: verde joven; VM: verde madura. Los valores son la media de 10 repeticiones, una hoja por repetición, ± DE: desviación estándar. Valores con letras iguales no son estadísticamente diferentes con la prueba de Tukey a 0.05.

La tasa de fotosíntesis que ocurre en los bosques tropicales es globalmente importante ya que favorece la captura de carbono atmosférico. Su comprensión puede impulsar la toma de decisiones que reduzcan los riesgos asociados al cambio climático (Wang Y. *et al.*, 2023). Uno de los métodos más eficientes para promover la captura de carbono es la forestación, ya que se ha determinado que los bosques capturan, a través de la fotosíntesis, 14.1 peta gramos (Pg) de carbono al año; mientras que expulsan 11.6 Pg de carbono al año, principalmente por el proceso de respiración y la quema de bosques; dando con ello un balance positivo en la dinámica del carbono ambiental (Nunes *et al.*, 2020). Además, en el caso de la madera de guamúchil, su uso en forma de cercas (Martínez-de la Cruz *et al.*, 2025), y su potencial como madera de alta calidad (Piedra-Ambriz *et al.*, 2025), permite almacenar por mayor tiempo el carbono capturado (Nunes *et al.*, 2020). Es importante señalar que, en ciudades mexicanas, como Guadalajara, la tercera ciudad más grande del país, se incluye al guamúchil en su programa de reforestación urbana (JaliscoNoticias, 2024); especie que además puede capturar plomo (Pb) (Rahul y Saraswathi, 2023). De tal manera que el uso del guamúchil para forestar y reforestar y con ello disminuir problemas de contaminación ambiental, al tiempo de

aumentar la captura de carbono, debe acompañarse de programas que permitan el uso sostenible de su madera.

CONCLUSIONES

La tipología foliar propuesta, en un inicio, de manera visual para los árboles de guamúchil (*Pithecellobium dulce*), se confirmó al determinarse que las hojas verdes maduras presentaron, en todos los meses del año, mayores valores SPAD, color verde, que las hojas verdes jóvenes y las hojas rojas jóvenes. Con una regresión de primer grado se asociaron los valores SPAD de las hojas de guamúchil con su contenido de clorofila total (0.940), clorofila a (0.930) y clorofila b (0.900). En 2023, en los meses de julio y agosto se presentaron los mayores valores SPAD en hojas verdes maduras; mientras que, en 2024, los valores máximos se registraron en el mes de agosto.

LITERATURA CITADA

- Aguilar-Campos, N., W. Edwards y S.W.G. Laurence. 2025. Tropical forest transpiration estimates are geographically and methodologically biased: a systematic review of sap flow research. *Agricultural and Forest Meteorology*. 373, art110738. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2025.110738>
- Aguilera, G.L.I., E.J. López P., A.S. Beltrán R. y J.A. López S. 2012. Composición de la flora arbórea en el área natural protegida Tenancingo-Malinalco-Zumpahuacán, Estado de México, México. *Polibotánica*. 34, 51-98.
- Amankwah, E. 2019. Tropical forest: a potential resource for climate change mitigation in Ghana. *International Journal of Environment and Climate Change*. 9(8), 435-442. <https://doi.org/10.9734/ijec/2019/v9i830128>
- Apaez-Barrios, J., J. Ocampo-López, S. Soto-Simentel, V.G. Aguilar-Raymundo y M. Ayala-Martínez. 2023. Dietary supplementation with *Pithecellobium dulce* (Roxb) Benth fruits to fattening rabbits. *Animals*. 13(20), art.3249. <https://doi.org/10.3390/ani13203249>
- Basave-Villalobos, E., B.M. Cetina-Alcalá, M.A. López-López, C. Trejo et al. 2022. Light management in tree nurseries to produce *Pithecellobium dulce* for the reforestation of degraded lands in Southern Mexico's tropical dry forest. *Bois et Forest Des Tropiques*. 351, 3-13. <https://doi.org/10.19182/bft2022.351.a31919>
- Basave-Villalobos, E., B.M. Cetina-Alcalá, M.A. López-López, M.A., C. Trejo et al. 2020. Nursery fertilization of *Pithecellobium dulce* (Roxb.)

- Benth: effects of seedling quality. *Madera y Bosques*. 26(3), e2632059. <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2632059>
- Bautista-Baños, S., E. García-Domínguez, L.L. Barrera-Necha, R. Reyes-Chipa y C.L. Wilson. 2003. Seasonal evaluation of the postharvest fungicidal activity of powders of huamuchil (*Pithecellobium dulce*): action against *Botrytis cinerea*, *Penicillium digitatum* and *Rhizopus stolonifera* of strawberry fruit. *Postharvest Biology & Technology*, 29(1), 81-92. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(02\)00244-2](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(02)00244-2)
- Burman, P.K.D., D. Sarma, S. Chakraborty, A. Karipot y A.K. Jain. 2020. The effect of Indian summer monsoon on the seasonal variation of carbon sequestration by a forest ecosystem over North-East India. *SN Applied Sciences*. 2, art.154. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1934-x>
- Casas, A., M.C. Vázquez, J.L. Viveros y J. Caballero. 1996. Plant management among the Nahuatl and the Mixtec from the Balsas River Basin: an ethnobotanical approach to the study of plant domestication. *Human Ecology*. 24, 455-478. <https://doi.org/10.1007/BF02168862>
- Chen, Y.Z. y S.Q. Huang. 2012. Red young leaves have less mechanical defense than green young leaves. *Oikos*. 122(7), 1035-1041. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2012.20852.x>
- El-Juhani, L.I. 2005. Effects of early thinning and allocation of dry matter in *Pithecellobium dulce* and *Albizia lebbek* trees grown in Riyadh, Saudi Arabia. *Alexandria Science Exchange*. 26(2), 98-105.
- Flores-Jiménez, N.T., J.A. Ulloa y J.E. Urías-Silvas. 2025. Protein quality assessment of the deoiled guamuchil seed (*Pithecellobium dulce* (Roxb.) Benth). *Future Postharvest and Foods*. 2(1), 94-104. <https://doi.org/10.1002/fpf2.70001>
- Garnier, E., K. Barkaoui, F. Alexandre, S. Lochon-Menseau *et al.* 2025. Leaf longevity and structure, fruit mass and phenology in 52 cultivated varieties and wild accessions of olive. *Functional Ecology*. 00, 1-14. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.70012>
- Gobierno de México. 2022. Pinzan o guamúchil, ¿Cómo los conoces tú? Disponible en: <https://www.gob.mx/agricultura/michoacan/articulos/pinzan-o-guamuchil-como-los-conoces-tu?idiom=es#:~:text=El%20Pithecellobium%2C%20popularmente%20conocido%20como,da%2C%20en%20lugares%20calurosos%20de> (verificado el 20 de diciembre de 2024).
- Gobierno de México. 2023. *Pithecellobium dulce*. Disponible en: http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info_especies/arboles/docs/45-legum38m.pdf (verificado el 20 de diciembre de 2024).

- Gómez, A.G., M. Díaz T., O. Franco-Mora, A. Castañeda-Vildózola y J.R. Sánchez-Pale. 2024. Fertilización de tejocoteros de dos años de edad en Lerma, México. *Revista Latinoamericana el Ambiente y las Ciencias*. 15(36), 1-11
- Guadarrama, M.N., M.C. Chávez M., M. Rubí A. y L. White O. 2020. La diversidad biocultural de frutales en huertos familiares de San Andrés Nicolás Bravo, Malinalco. *Sociedad y Ambiente*. 22, 237-264. <https://doi.org/10.31840/sya.vi22.2107>
- Hébert, F., N. Thiffault y A.D. Munson, A.D. 2011. Field photosynthesis measurements on black spruce (*Picea mariana*): Does needle age matter? *Communication in Soil Science & Plant Analysis*. 42(22), 2738-2750. <https://doi.org/10.1080/00103624.2011.622821>
- IBUNAM (Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México). 2025. Herbario Nacional de México (MEXU) UNAM. <http://datosabiertos.unam.mx/biodiversidad/>
- JaliscoNoticias. 2024. DIF Guadalajara y Bosque Urbano reforestan el centro de desarrollo comunitario. Disponible en: <https://noticias.jaliscotv.com/dif-guadalajara-y-bosque-urbano-reforestan-el-centro-de-desarrollo-comunitario/> (verificado el 20 de diciembre de 2024).
- Julian-Caballero, C.C. 2021. Primer registro de la ardilla de roca *Otospermophilus variegatus* (Rodentia:Sciuridae) en el municipio de Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México. *Mammalogy Notes*. 7(2), art275. <https://doi.org/10.47603/mano.v7n2.275>
- Liu, L.X., S.M Xu y K.C. Woo. 2004. Deficit irrigation effects on photosynthesis and the xanthophyll cycle in the tropical tree species *Acacia auriculiformis* in North Australia. *New Zealand Journal of Botany*. 42(5), 949-957.
- Malele, J., R. Kleynhans, y B. Matsiliza-Mlathi. 2025. The phenological growth stages, heat units requirements and anty-tyrosinase activity of *Greyia radlkoferi* Szyszyl. *Annals of Applied Biology*. <https://doi.org/10.1111/aab.70067>
- Martínez-De la Cruz, I., M. Rubí-Arriaga, A. González-Huerta, A., D.J. Pérez-López et al. 2015. Frutos y semillas comestibles en estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 6(2), 331-346.
- Monroy, R. y H. Colín. 2004. El guamúchil, *Pithecellobium dulce* (Roxb.) Benth, un ejemplo de uso múltiple. *Madera y Bosques*. 10(1), 35-53.
- Moreno, S.S.F., A. Enríquez V., C. Cuamea L., E. Bolado M. et al. 2008. Activity of medicinal plants, used by native populations from Sonora, Mexico, against enteropathogenic bacteria. *Pharmaceutical Biology*. 46(10-11), 732-737. <https://doi.org/10.1080/13880200802215800>

- Nguyen, H.D., N.H. Vu, H.D.K. Do y M.T. Vu. 2025. Comparative chloroplast genomic analysis of *Pithecellobium dulce* (Roxb.) Benth 1844 and related species within Caesalpinioideae. *Genetica*. 159, art19. <https://doi.org/10.1007/s10709-025-00234-7>
- Nunes, L.J.R., C.I.R. Meireles, C.J.P. Gomes y N.M.C.A. Ribeiro. 2020. Forest contribution to climate change mitigation: management oriented to carbon capture and storage. *Climate*. 8, art21. <http://dx.doi.org/10.3390/cli8020021>
- Olivares-Pérez, J., F. Avilés-Nova, B. Albarrán-Portilla, B., S. Rojas-Hernández y O.A. Castelán-Ortega. 2011. Identificación, usos y mediciones de leguminosas arbóreas y forrajeras en ranchos ganaderos del sur del Estado de México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 14, 739-748.
- Olmedo-Juárez, A., A. L., Jiménez-Chino, A. Bugarin, A. Zamilpa, A. et al. 2022. Phenolic acids and flavonoids from *Pithecellobium dulce* (Robx.) Benth leaves exhibit ovicidal activity against *Haemonchus contortus*. *Plants*. 11(19), art2555. <https://doi.org/10.3390/plants11192555>
- Ortega-Álvarez, R., A. Pacheco-Flores, y A. Casas. 2022. The “guamúchil” cultivation in a Mexican cultural landscape: A wild food source for people and bird. *Frontiers Forest Global Change*. 5, art1020207. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.1020207>
- Ortega, R.C.I., Martínez, S.J., Sánchez, D.N.E. and Morales, R.D. 2022. Cobertura y composición arbórea en las áreas verdes de Hermosillo, Sonora: aportaciones al urbanismo sustentable. *Región y Sociedad*. 34, art1610. <https://doi.org/10.22198/rys2022/34/1610>
- Pennington, T.D. y J. Sarukhán. 2005. *Árboles tropicales de México*. Fondo de Cultura Económica. México.
- Piedra-Ambríz, B.K., S.R. Vazquez-García, N. Flores-Ramirez, M. Ortiz-Gutiérrez et al. 2025. Guamuchil wood (*Pithecellobium dulce*) subjected to oxidation processes to increase transparency. *European Journal of Wood and Wood Products* 83, art136. <https://doi.org/10.1007/s00107-025-02287-z>
- Rahul, M.M.C. y R. Saraswathi. 2023. Airborne dust and associated metals: a link between its impact and sink rate within different roadside plants. *Global Best Journal*. 4, 23-33. <https://doi.org/10.30955/gnj.004656>
- Ramírez, H.B.C., E. Pimienta B., J.Z. Castellanos R., A. Muñoz U. et al. 2008. Sistemas de producción de *Spondias purpurea* (Anacardiaceae) en el centro occidente de México. *Revista de Biología Tropical*. 56(2), 675-687.

- Red de Herbarios del Noroeste de México (HERBANWMEX). 2025. <https://herbanwmex.net/portal/>
- Ruíz, S.F.L., J.A. Ruíz V., J.A: Hernández B., R. García J. y A. Valadez V. 2019. Extracción y cuantificación de clorofila en hojas comestibles del estado de Tabasco. *Investigación, Desarrollo y Ciencia en Tecnología de Alimentos*. 4, 891-896.
- Saha, P., M.K. Reddy, C.H. Ramya, Y. Pavithra *et al.* G. 2021. Development and incorporation of *Pithecellobium dulce* (camachile) fruit powder in multi grain pasta. *The Pharma Innovation Journal*. 10(6), 635-641.
- Sampayo-Maldonado, S., Moreno-Aldaco, J.D., Lara-Ponce, E. and Piña-Ruiz, H.H. 2021. Diversity and structure of the gallery forest of the Fuerte River, Sinaloa, Mexico. *Ecosistemas & Recursos Agropecuarios*. 8(2), e3046.
- Sathishkumar, T.P., P. Navaneethakrishnan, S.V. Shivaram, S.S: Kana *et al.* 2023. Characterization of new cellulose fiber extracted from *Pithecellobium dulce* tree. *Applied Science and Engineering Progress*. 16(3), 68-45. <https://doi.org/10.14416/j.asep.2023.05.002>
- Sistema Meteorológico Nacional. 2015. Normales climatológicas de la estación Zumpahuacán. Disponible en: <https://smn.conagua.gob.mx/es/> (verificado el 10 de diciembre de 2023).
- Sotelo-Barrera, M., E. García-Mora, A. Romero-Manzanares, R. Monroy y M. Luna-Cavazos. 2017. Arboreal structure and cultural importance of traditional fruit homegardens of Coatetelco, Morelos, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 23(1), 137-153. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2016.01.002>
- Tiwari, R., B. Hegde, S. Hegde, P. Bandaru *et al.* 2025. Contrasting seasonal variation of photosynthesis in evergreen and deciduous tree species from a tropical forest. *Physiologia Plantarum*. 177, art71410. <https://doi.org/10.1111/ppl.70410>
- Turner, A.J., P. Köhler, T.S. Magney, C. Frankenber *et al.* 2020. A double peak in the seasonality of California's photosynthesis as observed from space. *Biogeoscience*. 17, 405-422. <https://doi.org/10.5194/bg-17-405-2020>
- Vanitha, V. y K. Manikandan. 2016. Bio-activity guided determination of active compounds in the leaves of *Pithecellobium dulce*. *Rasayan Journal of Chemistry*. 9(3), 471-477.
- Vázquez, A.S.E., M.P. Ramírez R., S. Arceo D. y J.J. Solís E. 2023. Eliminación de la contaminación por el bosque urbano en las Palmas, Colima, México. *Madera y Bosques*. 29(1), art2912460. <https://doi.org/10.21829/myb.2023.2912460>

- Volkenburgh, E.V. 1999. Leaf expansion – an integrating plant behavior. *Plant, Cell and Environment*. 22, 1463-1473.
- Wang, T., L. Li, Y. Qin, B. Lu *et al.* 2023. Effects of seasonal changes on chlorophyll fluorescence and physiological characteristics in the two *Taxus* species. *Plants*. 12(14), art2636. <https://doi.org/10.3390/plants12142636>
- Wang, X., P.D. Blanken, J.D. Wood, Y. Nouvellon *et al.* 2023. Solar-induced chlorophyll fluorescence detects photosynthesis variations and drought effects in tropical rubber plantation and natural deciduous forests. *Agricultural and Forest Meteorology*. 339, art109591. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109591>
- Wang, Y., J. Liu, P.O. Wennberg, L. He *et al.* 2023. Elucidating climatic drivers on photosynthesis by tropical forest. *Global Change Biology*. 29(17), 4811-4825. <https://doi.org/10.1111/gcb.16837>
- Weather Atlas. 2025. Weather forecast for today Zumpahuacán, Mexico. Disponible en: <https://www.weather-atlas.com/en/mexico/zumpahuacan> (verificado 2 de septiembre de 2025).
- Yu, D.J., J.I. Lee, S.W. Chung, J.Y. Hwang *et al.* 2014. Photosynthetic acclimatisation of leaves in response to a shade-to-sun transition following summer pruning in peach (*Prunus persica* cv. Chanhoweonhwangdo) trees. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*. 89(3), 279-286. <https://doi.org/10.1080/14620316.2014.11513080>
- Zhang, R., P. Yang, S. Liu, C. Wang y J. Liu. 2022. Evaluation of the methods for estimating leaf chlorophyll content with SPAD chlorophyll meters. *Remote Sensing*. 14(20), art5144. <https://doi.org/10.3390/rs14205144>
- Zhu, H., T.J. Zhang, P. Zhang y C.L. Peng. 2016. Pigment patterns and photoprotection of anthocyanins in the young leaves of four dominant subtropical forest tree species in two successional stages under contrasting light conditions. *Tree Physiology*. 36(9), 1092-1104. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpw047>

AGRADECIMIENTOS

A Nelly Arellanes Juárez (Oaxaca, Oaxaca) y Daniel Reyes Becerril (Los Mochis, Sinaloa) por la donación de fotos. A los propietarios del Jardín Botánico “JozLiz”.

SÍNTESIS CURRICULAR

Omar Franco Mora

Profesor de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMEX). Ingeniero Agrónomo Fitotecnista por la UAEMEX; Maestro en Ciencias en Recursos Genéticos y Productividad por el Colegio de Postgraduados, y Doctor en Ciencias Agrícolas por la Universidad de Tottori, Japón. Nivel II del SNII, miembro de la Academia Mexicana de Ciencias y de la Academia Mexicana de Ciencias Forestales. Su área de interés es la fruticultura, actualmente particulariza el estudio de frutales y frutillas nativos del Centro de México, con énfasis en el Valle del Matlatzincó, estado de México. Correo electrónico: ofrancom@uaemex.mx, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8993-8454>

Sara Aguirre Ortega

Ingeniera Agrónoma Industrial y Maestra en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales por la UAEMEX. Labora de manera independiente en el manejo de jardines de biodiversidad en el estado de México. Correo electrónico: sara-ao@hotmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4370-6576>

Álvaro Castañeda Vildózola

Ingeniero Agrónomo Parasitólogo por la Universidad Autónoma Chapingo. Estudió la Maestría en Ciencias y el Doctorado en Ciencias en Entomología en el Colegio de Postgraduados. Nivel II del SNII. Es profesor de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMEX). Su área de investigación involucra el manejo sustentable de plagas agrícolas, particularmente en cultivos hortícolas. Correo electrónico: acastanedav@uaemex.mx, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8164-7647>