



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA
COORDINACIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

INFLUENCIA DE LA EDAD Y EXPOSICIÓN SOLAR SOBRE EL CONTENIDO DE METABOLITOS SECUNDARIOS EN HOJAS DE ZAPOTE BLANCO (*Casimiroa edulis*)

TESIS

Que como requisito parcial
para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

Presenta:

ELISAMA TALÍA PÉREZ MARTÍNEZ

Bajo la supervisión de la Dra. MARGARITA GISELA PEÑA ORTEGA



Chapingo, Estado de México, mayo de 2026



INFLUENCIA DE LA EDAD Y EXPOSICIÓN SOLAR SOBRE EL CONTENIDO
DE METABOLITOS SECUNDARIOS EN HOJAS DE ZAPOTE BLANCO
(*Casimiroa edulis*)

Tesis realizada por **ELISAMA TALÍA PÉREZ MARTÍNEZ** bajo la supervisión del
Comité Asesor indicado, aprobado por el mismo y aceptada como requisito
parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

DIRECTOR:


Dra. Margarita Gisela Peña Ortega

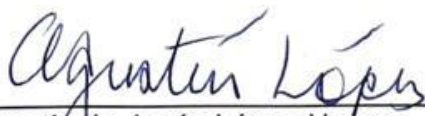
ASESOR:


Dr. Hector Lozoya Saldaña

ASESOR:


Dra. Ma Teresa Martínez Damián

ASESOR EXTERNO:


Dr. Agustín de Jesús López Herrera

Contenido

ÍNDICE DE FIGURAS	iv
INDICE DE CUADROS	v
AGRADECIMIENTOS	vi
DATOS BIOGRÁFICOS	vii
RESUMEN GENERAL	viii
ABSTRACT	ix
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1. Planteamiento del problema	2
1.2. Justificación	2
1.3. Hipótesis	3
1.4. Objetivo general.....	3
1.4.1. Objetivos específicos	4
1.5. Estructura de la tesis	4
CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA	6
2.1. Género <i>Casimiroa</i>	6
2.2. Zapote Blanco (<i>Casimiroa edulis</i>).....	6
2.2.1. Origen	7
2.2.2. Distribución geográfica	7
2.2.3. Descripción botánica de la especie	8
2.2.4. Importancia de <i>Casimiroa edulis</i>	9
2.3. Metabolismo Vegetal	9
2.4. Metabolitos Primarios	9
2.5. Metabolitos Secundarios	10
2.5.1. Clasificación de metabolitos secundarios.....	10
2.6. Actividad biológica de los metabolitos: Capacidad antioxidante.....	12
2.7. Metabolitos primarios presentes en <i>Casimiroa edulis</i>	15
2.8. Metabolitos secundarios presentes en el género <i>Casimiroa</i>	15

2.9. Metabolitos secundarios en <i>Casimiroa edulis</i>	15
2.9.1. Metabolitos secundarios en las hojas de <i>Casimiroa edulis</i>	16
2.10. Factores que afectan la producción de MS en plantas medicinales	17
2.10.1. Estacionalidad y ritmo circadiano	17
2.10.2. Desarrollo y órgano de la planta	17
2.10.3. Radiación	18
2.11. Literatura citada	18
CAPÍTULO 3. INFLUENCIA DE LA EDAD Y EXPOSICIÓN SOLAR SOBRE EL CONTENIDO DE METABOLITOS SECUNDARIOS EN HOJAS DE ZAPOTE BLANCO (<i>Casimiroa edulis</i>)¹	25
Resumen	25
Abstract	26
3.1. Introducción	27
3.2. Materiales y Métodos	28
3.2.1. Localización del sitio de muestreo y análisis	28
3.2.2. Diseño experimental	28
3.2.3. Material vegetal	29
3.2.4. Preparación de muestras	30
3.2.5. Obtención de extractos	31
3.2.6. Análisis fitoquímico	32
3.2.6.1. Fenoles totales	32
3.2.6.2. Flavonoides totales	32
3.2.6.3. Vitamina C	33
3.2.6.4. Clorofilas y Carotenos	33
3.2.6.5. Capacidad Antioxidante	34
3.2.7. Análisis Estadístico	34
3.3. Resultados y Discusión	35
3.3.1. Fenoles totales	36

3.3.2. Flavonoides	38
3.3.3. Vitamina C	40
3.3.4. Clorofilas y Carotenoides	42
3.3.5. Capacidad antioxidante.....	45
3.4. Conclusiones	48
3.5. Referencias.....	51
ANEXO 1. Matriz de correlación de Pearson entre capacidad antioxidante y metabolitos foliares.....	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Árbol de <i>Casimiroa edulis</i>	28
Figura 2. A. Hojas jóvenes con exposición directa al sol. B. Hojas jóvenes bajo sombra	30
Figura 3. A. hojas maduras con exposición directa al sol. B. Hojas maduras bajo sombra	30
Figura 4. Contenido foliar de fenoles totales en <i>Casimiroa edulis</i> según tratamiento y mes de muestreo.....	36
Figura 5. Contenido foliar de flavonoides en <i>Casimiroa edulis</i> según tratamiento y mes de muestreo	38
Figura 6. Contenido foliar de vitamina C en <i>Casimiroa edulis</i> según tratamiento y mes de muestreo	40
Figura 7. Contenido de clorofila total (izquierda), relación clorofila a/b (derecha) en hojas de <i>Casimiroa edulis</i> según tratamiento y mes de muestreo	42
Figura 8. Contenido foliar de carotenoides en hojas de <i>Casimiroa edulis</i> según tratamiento y mes de muestreo.....	43
Figura 9. Capacidad antioxidante total en hojas de <i>Casimiroa edulis</i> según tratamiento y mes de muestreo.....	46

Figura 10. Correlación entre fenoles totales y capacidad antioxidante	48
--	----

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Diseño de tratamientos.....	28
--	----

Cuadro 2. Condiciones de extracción para la determinación de metabolitos en tejido foliar de <i>Casimiroa edulis</i>	31
---	----

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo, a cuya comunidad académica se agradece el apoyo brindado durante el desarrollo de la maestría.

A la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo otorgado mediante la beca, la cual permitió la realización de los estudios de maestría.

Al Dr. Juan Martínez Solís[†] por su guía, confianza y apoyo brindados desde mi ingreso a la maestría, así como por su acompañamiento académico como asesor.

A la Dra. Margarita Gisela Peña Ortega por asumir la dirección de esta investigación, por la orientación académica, acompañamiento y observaciones realizadas a lo largo del trabajo.

A los integrantes del comité asesor: Dr. Héctor Lozoya Saldaña, Dr. Agustín de Jesús López Herrera y Dra. Ma Teresa Martínez Damián, por sus observaciones y aportes académicos.

A la Dra. María Teresa Beryl Colinas y León por sus aportes, orientación y apoyo académico brindados durante las etapas iniciales de este trabajo.

Al Q. A. Cecilio Bautista Bañuelos por su apoyo técnico y la valiosa información proporcionada durante el trabajo realizado en laboratorio.

DATOS BIOGRÁFICOS

Datos personales

Nombre: Elisama Talía Pérez Martínez

Fecha de nacimiento: 8 de septiembre de 2001

Lugar de nacimiento: Oaxaca

Profesión: Ingeniero Agrónomo Especialista en Fitotecnia

Cédula profesional: 14049977



Desarrollo académico

Preparatoria: 2016-2019: Departamento de Preparatoria Agrícola. Universidad Autónoma Chapingo

Licenciatura: 2019-2023: Departamento de Investigación y Servicio en Fitotecnia. Universidad Autónoma Chapingo

RESUMEN GENERAL

INFLUENCIA DE LA EDAD Y EXPOSICIÓN SOLAR SOBRE EL CONTENIDO DE METABOLITOS SECUNDARIOS EN HOJAS DE ZAPOTE BLANCO (*Casimiroa edulis*)¹

El zapote blanco (*Casimiroa edulis* La Llave & Lex.) es una especie de interés fitoquímico debido a la presencia de compuestos bioactivos en sus diferentes órganos; sin embargo, existe poca información sobre la variación de metabolitos en hojas considerando la edad foliar y la exposición solar. El objetivo de este estudio fue comparar el contenido de fenoles totales, flavonoides, vitamina C, pigmentos fotosintéticos y capacidad antioxidante en hojas jóvenes y maduras de *C. edulis* bajo condiciones de exposición directa al sol y sombra. El material vegetal se recolectó durante agosto, septiembre y octubre de 2025, estableciendo cuatro tratamientos según edad foliar y condición de luz. Las determinaciones fitoquímicas se realizaron mediante métodos espectrofotométricos y los resultados se analizaron mediante análisis de varianza (ANOVA), prueba de medias de Tukey y correlación de Pearson. Los resultados mostraron que la edad foliar, la exposición solar y el mes de muestreo influyeron en las variables evaluadas. Las hojas jóvenes expuestas al sol presentaron mayor acumulación de fenoles totales y capacidad antioxidante, mientras que los flavonoides y la vitamina C mostraron respuestas variables entre tratamientos y meses. Por su parte, los pigmentos fotosintéticos se asociaron principalmente con hojas maduras. La correlación positiva entre fenoles totales y capacidad antioxidante sugiere que estos compuestos contribuyeron de manera importante a la actividad antioxidante de los extractos. En conclusión, la acumulación de metabolitos en hojas de *C. edulis* depende de la interacción entre edad foliar, exposición solar y mes de muestreo.

Palabras clave: Fenoles totales, flavonoides, vitamina C, pigmentos fotosintéticos, capacidad antioxidante.

¹Tesis de Maestría en Ciencias en Horticultura, Universidad Autónoma Chapingo
Autor: Elisama Talía Pérez Martínez
Directora: Dra. Margarita Gisela Peña Ortega

ABSTRACT

INFLUENCE OF LEAF AGE AND SOLAR EXPOSURE ON SECONDARY METABOLITE CONTENT IN LEAVES OF WHITE SAPOTE (*Casimiroa edulis*)²

White sapote (*Casimiroa edulis* La Llave & Lex.) is a species of phytochemical interest due to the presence of bioactive compounds in different plant organs; however, limited information is available regarding metabolite variation in leaves according to leaf age and sunlight exposure. The objective of this study was to compare the levels of total phenols, flavonoids, vitamin C, photosynthetic pigments, and antioxidant capacity in young and mature leaves of *C. edulis* under direct sunlight and shade conditions. Leaf samples were collected during August, September, and October 2025, and four treatments were established according to leaf age and light conditions. Metabolite determinations were performed using spectrophotometric methods, and data were analyzed by analysis of variance (ANOVA), Tukey's multiple comparison test, and Pearson correlation analysis. Results showed that leaf age, sunlight exposure, and sampling month influenced the evaluated variables. Young leaves exposed to direct sunlight showed the highest accumulation of total phenols and antioxidant capacity, whereas flavonoids and vitamin C displayed variable responses among treatments and sampling months. Photosynthetic pigments were mainly associated with mature leaves. A positive correlation between total phenols and antioxidant capacity suggests that phenolic compounds contributed significantly to the antioxidant activity of the leaf extracts. In conclusion, metabolite accumulation in *C. edulis* leaves depends on the interaction among leaf age, sunlight exposure, and sampling month.

Keywords: Total phenols, flavonoids, vitamin C, photosynthetic pigments, antioxidant capacity.

²Thesis of Master in Science in Horticulture, Universidad Autónoma Chapingo

Author: Elisama Talía Pérez Martínez

Advisor: Dra. Margarita Gisela Peña Ortega

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

El zapote blanco (*Casimiroa edulis* La Llave & Lex.) es una especie frutal originaria de México y regiones de Centroamérica, reconocida por sus frutos y por su uso tradicional con fines medicinales (Vidal-López et al., 2008; Lv et al., 2023). Hoy en día, su importancia fitoquímica está relacionada con la presencia de diversos metabolitos secundarios con actividad biológica, reportados en distintos órganos de la planta, incluyendo semillas, hojas, corteza, raíces y frutos (Tun et al., 2020; Narváez-Ortiz et al., 2025). Particularmente, en las hojas se han identificado compuestos fenólicos, flavonoides, furocumarinas y flavonas metoxiladas, varios de ellos asociados con actividad biológica y antioxidante (Awaad et al., 2006; Nagai et al., 2014; Domínguez-Delgado et al., 2026). La acumulación de metabolitos secundarios en las plantas puede modificarse por factores fisiológicos y ambientales, entre ellos el estado de desarrollo del tejido, la posición de la hoja, la época de recolección y la radiación solar (Zagoskina et al., 2023; Ma et al., 2024). En particular, los compuestos fenólicos y flavonoides que participan en mecanismos de defensa, fotoprotección y regulación del estrés oxidativo, por lo que su concentración puede variar en respuesta a la luz y al desarrollo foliar (Chomel et al., 2016; Salam et al., 2023). Asimismo, algunos metabolitos primarios, como la vitamina C, las clorofilas y los carotenoides, participan en procesos relacionados con la regulación redox, la fotosíntesis y la fotoprotección (Paciolla et al., 2019; Pérez-Gálvez et al., 2020), por lo que su evaluación complementa el análisis de metabolitos secundarios al incorporar indicadores relacionados con el estado fisiológico del tejido foliar asociados con dichos procesos. No obstante, en *C. edulis* aún es limitada la información sobre cómo la edad foliar y la exposición lumínica influyen en la variación de metabolitos en hojas. Considerando lo anterior, el presente estudio evaluó el contenido de fenoles totales, flavonoides, vitamina C, clorofilas, carotenoides y capacidad antioxidante en hojas jóvenes y maduras de *Casimiroa edulis* bajo condiciones de exposición directa al sol y sombra con lo cual se busca aportar información sobre la influencia de la edad foliar y el microambiente lumínico en la acumulación de metabolitos en esta especie.

1.1. Planteamiento del problema

El zapote blanco (*Casimiroa edulis*), es una especie con importancia alimenticia, medicinal, nutracéutica y fitoquímica, debido a la presencia de metabolitos secundarios asociados con actividad biológica, en particular en las hojas de esta especie se han reportado compuestos fenólicos, flavonoides, cumarinas, furocumarinas y otros metabolitos, así como actividad antioxidante (Awaad et al., 2012; Nagai et al., 2014; Domínguez-Delgado et al., 2026). Sin embargo, la mayoría de estos estudios no considera variables como la edad foliar ni la condición de exposición lumínica del material vegetal evaluado, esta ausencia de información representa una limitante para interpretar la variación metabólica de la especie así como la distribución real de los metabolitos en la planta ya que la concentración de metabolitos puede modificarse por factores internos, como el estado de desarrollo del tejido, y por factores externos, como la intensidad de luz recibida (Gobbo-Neto & Lopes, 2006; Ibarra-Cantún et al., 2018). Además, existe poca información sobre metabolitos primarios con función fisiológica o antioxidante en hojas de *C. edulis*, como vitamina C, clorofilas y carotenoides, lo cual dificulta comprender de manera integral la respuesta del tejido foliar frente a condiciones contrastantes de luz y desarrollo. En consecuencia, el problema de investigación se centró en determinar si la edad foliar y la exposición solar influyen en el contenido de metabolitos y en la capacidad antioxidante de hojas de *Casimiroa edulis*.

1.2. Justificación

Una limitante frecuente en los estudios fitoquímicos de tejido foliar es que el material vegetal suele analizarse sin precisar características como la edad de la hoja o su condición de exposición lumínica, en el caso de *Casimiroa edulis*, esta omisión es relevante, ya que ambos factores pueden modificar la concentración de metabolitos y, por lo tanto, influir en la interpretación de los resultados obtenidos, por ello, este estudio consideró la edad foliar y la exposición solar como criterios de diferenciación del material vegetal; con esta aproximación se

logró evaluar si las hojas jóvenes y maduras, así como las hojas expuestas al sol y bajo sombra, presentaron diferencias en el contenido de fenoles totales, flavonoides, vitamina C, pigmentos fotosintéticos y capacidad antioxidante. La importancia del trabajo radica en que no sólo aporta información sobre la composición foliar de *C. edulis*, sino que también contribuye a identificar si ciertos tipos de hojas presentan mayor acumulación de compuestos de interés, lo cual puede ser útil para establecer criterios más claros de recolección, selección y comparación del material vegetal en estudios posteriores, además la inclusión de vitamina C, clorofilas y carotenoides permite complementar la evaluación fitoquímica con indicadores relacionados con el estado fisiológico del tejido foliar, particularmente en procesos asociados con fotosíntesis, fotoprotección y regulación redox. En conjunto, este trabajo contribuye a reducir la falta de información sobre la variación metabólica foliar de *C. edulis* y aporta una base útil para futuros estudios fitoquímicos que empleen hojas de esta especie.

1.3. Hipótesis

En *Casimiroa edulis* las hojas maduras y aquellas expuestas a mayor incidencia de luz solar presentarán concentraciones más elevadas de fenoles totales, flavonoides y capacidad antioxidante en comparación con hojas jóvenes y sombreadas, en tanto al contenido de vitamina C, clorofilas y carotenoides se espera también presenten variación en función de la edad foliar y la exposición solar debido a la participación de estos compuestos en procesos de regulación redox, fotosíntesis y fotoprotección.

1.4. Objetivo general

Comparar el contenido de fenoles totales, flavonoides, vitamina C, pigmentos fotosintéticos y capacidad antioxidante en hojas jóvenes y maduras de *Casimiroa edulis* bajo condiciones de diferente incidencia de luz: exposición directa al sol y sombra.

1.4.1. Objetivos específicos

Cuantificar el contenido de fenoles totales y flavonoides en hojas jóvenes y maduras de *Casimiroa edulis* bajo condiciones de exposición directa al sol y sombra.

Determinar el contenido de vitamina C en hojas jóvenes y maduras de *C. edulis* en función de la condición de exposición solar.

Cuantificar el contenido de clorofila a, clorofila b, clorofila total y carotenoides en hojas de *C. edulis* considerando la edad foliar y la exposición solar.

Evaluar la capacidad antioxidante de los extractos foliares de *C. edulis* en los diferentes tratamientos.

Analizar la variación del contenido de metabolitos y capacidad antioxidante como respuesta combinada a la edad foliar, la exposición solar y el mes de muestreo.

1.5. Estructura de la tesis

La presente tesis se estructura en tres capítulos principales:

En el **Capítulo 1** se presenta la introducción general del estudio, en el cual se expone la importancia de *Casimiroa edulis*, los antecedentes generales del tema, el planteamiento del problema, la justificación, la hipótesis y los objetivos de la investigación.

En el **Capítulo 2** se desarrolla la revisión de literatura, donde se abordan aspectos generales del género *Casimiroa* y de la especie *C. edulis*, asimismo se describen conceptos relacionados con metabolismo vegetal, metabolitos primarios, metabolitos secundarios, capacidad antioxidante y factores que influyen en la acumulación de metabolitos en plantas.

En el **Capítulo 3** se describen los materiales y métodos utilizados para la recolección, preparación y análisis de las muestras foliares. Asimismo, se presentan los resultados y la discusión, sobre la variación del contenido de fenoles totales, flavonoides, vitamina C, clorofilas, carotenoides y capacidad antioxidante en función de la edad foliar, la exposición solar y el mes de muestreo.

CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Género *Casimiroa*

El género *Casimiroa* fue establecida por los botánicos mexicanos Pablo de la Llave y Juan Martínez de Lexarza en su obra titulada *Novorum Vegetabilium Descriptiones*, publicada en 1825.

Desde 1989 según los estudios que realizó Chiang-F. se reconocen diez especies que conforman el género *Casimiroa*:

1. *C. tetrameria* Millps
2. *C. pringlei* (Wats.) Engl
3. *C. watsoni* Engler
4. *C. edulis* Llave et Lex.
5. *C. pubescens* Ramírez
6. *C. sapota* Oerst
7. *C. emarginata* St. et Steyerl
8. *C. microcarpa* Lundell
9. *C. calderoniae* Chiang y Medrano
10. *C. greggii* (Wats.) Chiang

De estas especies, las que han sido empleadas para semicultivo debido al tamaño y calidad comestible de sus frutos son *Casimiroa edulis* y *Casimiroa sapota*, mientras que las demás se encuentran mayormente en estado silvestre (García-Argáez, 2003).

2.2. Zapote Blanco (*Casimiroa edulis*)

El zapote blanco, cuyo nombre científico es *Casimiroa edulis*, pertenece a la clase Magnoliopsida, orden Sapindales, familia Rutaceae, género *Casimiroa* y especie *C. edulis*.

El nombre del género *Casimiroa*, se otorgó en honor a Casimiro Gómez, indígena otomí que participó en la guerra de la independencia de México (De la Llave *et al.*, 1825). El epíteto específico *edulis*, proviene del latín *edulis-e*, que significa “comestible”, en alusión a sus frutos (CONAFOR, s. f.).

Nombres comunes

Zapote blanco, pera mexicana, cacchique (maya), ceax mixtea (otomí), chaah, chapote, cochitzapoti (nahuatl), Iztactzapoti, matasano, (CONAFOR, s. f) caqui blanco, fruta de pulpa fragante, o fruta helado (Lv et al., 2023).

2.2.1. Origen

El zapote blanco es considerado originario de México y regiones de Centroamérica, donde ha sido utilizado tradicionalmente por los pueblos prehispánicos tanto por su fruto comestible como por sus propiedades medicinales (Lozoya, 1981; Vidal-López et al., 2008).

2.2.2. Distribución geográfica

En su área de distribución natural habita principalmente en regiones cálidas y templadas de México (De la Llave et al., 1825), sin embargo, esta especie se adapta a todo tipo de suelos y llega a sobrevivir en alturas desde los 600-900 hasta los 2000-3000 msnm y en un rango de temperaturas de -4°C hasta 34°C, gracias a esto logra prosperar de manera silvestre y en cultivo en países como Guatemala, El Salvador, Costa Rica, así como en Las Bahamas y Las Antillas.

Además, ha sido introducido en otras regiones del mundo, como la Riviera del Mediterráneo, India, Nueva Zelanda, Sudáfrica (Vidal-López et al., 2008), California, Florida, Argentina, Brasil (Magos-Guerrero, 1999) y algunas zonas de Asia Oriental (Lv et al., 2023)

En México, la especie se encuentra ampliamente distribuida en la zona tropical y subtropical; sin embargo, su cultivo extensivo dificulta determinar con precisión su distribución natural. En vegetación natural se localiza principalmente en zonas de selva mediana y selva baja caducifolia, especialmente en la costa del Pacífico desde Sonora hasta Oaxaca, en cañadas protegidas de la Sierra Madre Occidental y en la cuenca del Río Balsas, así como en el centro del país en estados como Querétaro, Puebla e Hidalgo. Asimismo, se ha recolectado en el

centro y sur de Veracruz, la Selva Lacandona y la depresión central de Chiapas, donde probablemente también se encuentra cultivada (Pennington & Sarukhán 2005).

2.2.3. Descripción botánica de la especie

Casimiroa edulis fue descrita originalmente por La Llave y Lex. (1825); sin embargo, descripciones posteriores permiten una caracterización más detallada de la especie, como la presentada por Pennington y Sarukhan (2005), como se muestra a continuación:

El zapote blanco es un árbol perennifolio que alcanza entre 6 y 10 m de altura, con copa redondeada y ramas ascendentes, con un tronco cilíndrico ramificado desde cerca de la base, con corteza externa lisa y grisácea oscuro que se cuartea con los años y presenta bastantes lenticelas visibles, en tanto la corteza interna, ésta es de color crema pálido, textura granular y sabor amargo, sin exudados. Sus hojas son alternas, digitado-compuestas, de 15 a 25 cm de longitud incluyendo el peciolo tienen de (2-)3 a 5 folíolos elípticos, de margen entero, ápice agudo o acuminado y base aguda o cuneada, frecuentemente asimétricas: son verde oscuro y brillantes en la haz y verde opaco en el envés, y presentan abundantes puntos glandulares transparentes. Respecto a los peciolo estos llegan a medir entre 5 a 10 cm, finamente pubescentes y ligeramente pulvinados en la base, características similares en los peciolulos excepto la longitud de 1 a 2 cm. Las flores, propias de una especie monoica, se encuentran distribuidas en panículas axilares, son pequeñas (8-9 mm), pentámeras, actinomorfas y de color verde pálido a excepción de los estambres en tono crema verdoso, y por último, sus frutos son bayas solitarias que cuelgan de un pedúnculo (8 mm), estos tienen forma ovoide con ápice agudo y base redondeada, son verdes con textura lisa, con pocas lenticelas, al interior son suaves y carnosas, con pulpa dulce, blanca y cremosa, llegan a tener entre 2 a 5 semillas de hasta 3 cm de largo.

2.2.4. Importancia de *Casimiroa edulis*

Casimiroa edulis es una especie de relevancia por su valor etnobotánico, farmacológico y fitoquímico, particularmente en México, donde ha sido utilizada durante más de 500 años por sus efectos sedantes, ansiolíticos y cardiovasculares. Actualmente, esto se asocia a la diversidad de metabolitos secundarios presentes en los distintos órganos de la planta, en este sentido, el zapote blanco se posiciona como una especie de interés tanto en la medicina tradicional como en la investigación científica, debido a la amplitud de sus propiedades biológicas y al potencial aún no completamente explorado de su composición química como fuente de fitofármacos (Sánchez, 1893; Power & Callan, 1993; Narváez-Ortiz et al., 2025).

2.3. Metabolismo Vegetal

2.4. Metabolitos Primarios

Los metabolitos primarios son compuestos directamente implicados en el crecimiento, desarrollo y reproducción de los organismos vegetales (Taíz et al., 2015). Estos se pueden clasificar desde un punto de vista funcional, en metabolitos energéticos, estructurales y reguladores, de acuerdo con su participación en la producción de energía, la conformación de estructuras celulares y la regulación de procesos fisiológicos.

En el grupo de los metabolitos reguladores o funcionales encontramos a las vitaminas y pigmentos esenciales, como la vitamina C y pigmentos como las clorofilas y carotenoides, que son objeto de este trabajo (Buchanan et al., 2015). Los carotenoides son moléculas basadas en isopropenoides presentes en todos los organismos fotosintéticos, los carotenoides se caracterizan por sus colores brillantes, desde amarillo hasta rojo, y estos son esenciales en la fotosíntesis para el proceso de captación de luz y la protección contra el daño fotooxidativo (Pérez-Gálvez et al., 2020).

La vitamina C o ácido L-ascórbico, es un compuesto hidrosoluble del grupo de las vitaminas, químicamente clasificado como una lactona derivada de hexosas.

En tanto funciones, cumple dos principales: como antioxidante y como cofactor enzimático (Paciolla et al., 2019).

2.5. Metabolitos Secundarios

El concepto de metabolitos secundarios (MS) comenzó a emplearse por primera vez en el campo de la fisiología vegetal en la década de 1960, para referirse a compuestos orgánicos que no participan directamente en el crecimiento, desarrollo o reproducción de los organismos. Sin embargo, actualmente no se consideran sustancias insignificantes ni de menor importancia que los metabolitos primarios, ya que participan principalmente en mecanismos de defensa, adaptación y supervivencia del organismo frente al estrés biótico y abiótico (Cepoi, 2024). Según Teoh (2016) hasta el momento se han descubierto más de 50,000 MS en las plantas, esta enorme variedad existente es proporcional a la gran diversidad vegetal.

2.5.1. Clasificación de metabolitos secundarios

Existen distintas formas de clasificar los MS según su estructura, función y biosíntesis, según esto Adeyemi (2011) lo clasifica en tres clases químicas: terpenoides que son compuestos aromáticos y volátiles que dan aroma y sabor a las plantas, los alcaloides que son compuestos naturales para alejar a los organismos herbívoros y por último, fenólicos, compuestos que cumplen la función de protección frente a otros organismos, así como de generar colores atractivos para la polinización y dispersión de semillas.

2.5.1.1. Alcaloides

Los alcaloides se definen como compuestos básicos que contienen nitrógeno, de origen vegetal y con actividad farmacológica. Tienen un sabor característico amargo, generalmente, los alcaloides en las plantas actúan como disuasores de herbívoros, aleloquímicos y agentes de protección contra infecciones y además muestran una marcada actividad fisiológica en animales; por ejemplo, muchos poseen propiedades analgésicas o tóxicas, debido a estas propiedades, los

alcaloides han sido ampliamente estudiados en farmacología y utilizados tanto en la medicina tradicional como en la medicina moderna (Chomel et al., 2016).

2.5.1.2. Terpenoides

Los terpenos son uno de los grupos más diversos y extendidos de productos naturales. Son hidrocarburos derivados del isopreno y se clasifican según el número de unidades de cinco carbonos. En plantas cumplen funciones ecológicas y fisiológicas como alelopatía, actividad insecticida, atracción de polinizadores y regulación hormonal, por ejemplo: ácido abscísico y giberelinas (Tiwari & Rana, 2015).

2.5.1.3. Fenoles

Los compuestos fenólicos se caracterizan por la presencia de al menos un anillo aromático unido a uno o más grupos hidroxilo. En las plantas, pueden constituir desde el 1 % hasta más del 25 % de la masa seca de hojas verdes y cumplen funciones importantes como, defensa, interacción ecológica y respuesta a estrés (Chomel et al., 2016)

En este grupo se incluyen subgrupos como: taninos, cumarinas, estilbenos y flavonoides, de los cuales destacan los flavonoides.

2.5.1.4. Flavonoides

Los flavonoides constituyen el subgrupo más importante dentro de los compuestos fenólicos, con más de 4500 compuestos conocidos. Se caracterizan por presentar bajo peso molecular y un esqueleto estructural de difenilpirano, lo cual les permite presentar una multitud de sustituciones y variaciones dando lugar a una amplia diversidad estructural de subclases de flavonoides.

Al ser el grupo más amplio están presentes en la mayoría de los tejidos vegetales, comúnmente en vacuolas. Estos compuestos desempeñan diferentes funciones en las plantas, entre las que destaca: proporcionar color, aroma y sabor a frutos, flores y semillas, actúan como atrayentes o repelentes para la oviposición y

alimentación de insectos, además debido a su estructura química poseen una elevada capacidad antioxidante (Chomel et al., 2016)

2.6. Actividad biológica de los metabolitos: Capacidad antioxidante

El término “antioxidante”, desde una perspectiva biológica se refiere a cualquier sustancia natural o sintética capaz de prevenir o retrasar el daño celular oxidativo causado por oxidantes fisiológicos, incluyendo especies reactivas de oxígeno (ROS), especies de reacciones de nitrógeno (RNS) y radicales libres. Por otra parte, la capacidad antioxidante se define como la cantidad de especies radicales que una sustancia antioxidante elimina o neutraliza del entorno. Esta capacidad puede evaluarse en entornos homogéneos, principalmente mediante la capacidad de absorción de radicales de oxígeno (ORAC), protocolos relacionados con el parámetro antioxidante de captura total de radicales (TRAP), ensayos ABTS y pruebas DPPH (Pérez-Gálvez et al., 2020)

Los compuestos fenólicos son conocidos por su alta capacidad antioxidante, gracias a sus mecanismos antioxidantes, actuando como captadores de especies reactivas de oxígeno, donadores de electrones y agentes quelatantes de metales de transición como Fe^{2+} , Cu^{2+} (Salam et al., 2023). Su capacidad antioxidante depende de la estructura en particular del número y posiciones de los grupos hidroxilo, además de la naturaleza en los anillos aromáticos. Por otra parte, la acumulación de estos metabolitos en plantas está regulada por diversos factores genéticos, moleculares, ambientales y fisiológicos. En condiciones de estrés, como alta intensidad lumínica, radiación UV, temperaturas bajas o en presencia de metales pesados, se incrementa la biosíntesis de compuestos fenólicos. En contraste temperaturas elevadas por tiempo prolongado pueden inhibir su biosíntesis debido a la alteración en la regulación enzimática y genética. Por otra parte, los factores fisiológicos como el estado de desarrollo y el tipo de tejido vegetal influyen significativamente, observándose una mayor acumulación en etapas tempranas de crecimiento y en órganos fotosintéticamente activos, como

hojas jóvenes, donde la actividad metabólica es más intensa (Zagoskina et al., 2023).

De los compuesto fenólicos los más estudiados han sido los flavonoides, los cuales han demostrado tener una alta capacidad antioxidante frente a los radicales libres, los reportes indican que los flavonoides con sustituyentes dihidroxílicos en posiciones 3' y 4' en el anillo B se muestran más activos como antioxidantes y que este efecto es potenciado por la presencia de un doble enlace entre los carbonos 2 y 3, un grupo hidroxilo libre en la posición 3 y un grupo carbonilo en la posición 4 (Zheng et al., 2019) tal es el caso de la rutina y quercetina, los cuales son reconocidos como los secuestradores más fuertes de radicales libres (Pérez-Trueba, 2003; Zavaleta et al, 2005). En tanto su biosíntesis y acumulación están regulados por una interacción de factores internos y externos, empezando por la expresión génica, la afección de factores de transcripción y la influencia de fitohormonas. Asimismo, diversos factores ambientales como la radiación lumínica, especialmente la luz UV, así como condiciones de estrés abiótico (sequía, temperatura, salinidad) y biótico (ataque de patógenos), que inducen la síntesis de flavonoides como parte de los mecanismos de defensa vegetal (Mao et al., 2025). Adicionalmente, Ma et al., (2024) señalaron que su acumulación varía en función del órgano vegetal y la etapa de desarrollo, acumulándose principalmente en hojas y estructuras reproductivas, en particular, se ha observado mayor concentración en tejidos con crecimiento activo, como hojas jóvenes expuestas a la radiación solar (Treutter, 2005; Agati et al., 2020).

Aunque los metabolitos secundarios son los principales responsables de la actividad antioxidante en plantas, algunos metabolitos primarios como la vitamina C, las clorofilas y los carotenoides también participan en la regulación del estado redox celular, por lo que fueron incluidos en este estudio.

Los carotenoides y las clorofilas son pigmentos lipofílicos con capacidad antioxidante, aunque presentan diferencias en sus mecanismos de acción. En este sentido, la actividad antioxidante de los carotenoides se basa en su capacidad para desactivar especies reactivas mediante acciones como la transferencia de energía, la transferencia de electrones y la donación de hidrógeno, mientras que las clorofilas atribuyen su actividad antioxidante a su estructura tetrapirrólica con un sistema conjugado, capaz de participar en procesos de donación de electrones y neutralización de radicales. No obstante, se menciona que su eficacia y comportamiento no son fijos, sino que dependen del ambiente químico y biológico en el que actúan; por ejemplo, en ambientes lipofílicos y en presencia de luz, las clorofilas pueden presentar actividad pro-oxidante, al igual que los carotenoides que, bajo condiciones de altas tensiones de oxígeno, pueden pasar de actuar como antioxidantes a exhibir actividad pro-oxidante (Pérez-Gálvez et al., 2020; Salam et al., 2023).

En tanto la vitamina C, una de sus principales funciones reconocidas es su capacidad antioxidante, la cual se basa en su estructura química, que le permite donar electrones y así neutralizar especies reactivas de oxígeno (ROS), así como otros radicales libres. Además, participa en el ciclo ascorbato-glutation, donde interviene en la eliminación de peróxido de hidrógeno y en la regeneración del ascorbato a su forma reducida, lo que permite sostener su función antioxidante en el tiempo (Pérez-Gálvez et al., 2020)

La acumulación de vitamina C en plantas está determinada por múltiples factores interrelacionados que regulan su biosíntesis, reciclaje, degradación y distribución. Entre los factores ambientales, la luz es uno de los principales reguladores ya que su intensidad, calidad y duración pueden incrementar su contenido. Asimismo, el contenido de vitamina C varía significativamente entre órganos y etapas de desarrollo, presentándose generalmente en mayor concentración en tejidos fotosintéticamente activos, meristemas, flores y frutos en desarrollo. A nivel biológico, también existen diferencias entre especies y cultivares asociadas a la regulación genética de las rutas biosintéticas. Y por último, las condiciones

de estrés biótico y abiótico pueden inducir cambios en su acumulación, generalmente asociados con una mayor demanda antioxidante; sin embargo, esta respuesta depende del tipo de estrés, su intensidad, duración y del estado fisiológico del tejido vegetal (Paciolla et al., 2019).

2.7. Metabolitos primarios presentes en *Casimiroa edulis*

En *Casimiroa edulis*, así como en el género *Casimiroa*, los estudios fitoquímicos disponibles se han centrado principalmente en la identificación de metabolitos secundarios, por lo cual, no se han encontrado reportes que incluyan la cuantificación de pigmentos fotosintéticos como clorofilas y carotenoides en esta especie, particularmente en tejido foliar, lo que evidencia una ausencia de información en torno a estos metabolitos primarios.

Respecto a la vitamina C, la información cuantitativa reportada en la literatura se encuentra restringida principalmente al fruto de *Casimiroa edulis*, sin evidencia específica en hojas, diferentes autores, han determinado el contenido en frutos reportando valores de 29.7 mg y 27.9 mg por 100 g de pulpa fresca, reportados por Castañeda et al. (2020) y Vera-Sánchez (2023), respectivamente.

2.8. Metabolitos secundarios presentes en el género *Casimiroa*

Distintos estudios han informado la presencia de tipos de metabolitos secundarios, característicos del género tales como: cumarinas, alcaloides, flavonoides, limonoides y derivados de N-benzoyltyramida (Sánchez-Ruiz, 2009; Tun et al, 2020).

2.9. Metabolitos secundarios en *Casimiroa edulis*

La investigación de los compuestos químicos presentes en *Casimiroa edulis* inició a finales del siglo XIX en semillas, donde se reportó la presencia de alcaloides y otros compuestos como resinas, aceites y carbohidratos. Posteriormente, investigaciones más sistemáticas permitieron aislar y caracterizar diversos compuestos, principalmente alcaloides, sentando las bases para el estudio químico de la especie (Sánchez, 1893; Power & Callan, 1993).

En la actualidad, el número de estudios sobre los metabolitos secundarios de esta especie ha aumentado considerablemente, permitiendo establecer que su composición química varía en función del órgano vegetal. En este sentido, se han identificado alcaloides, terpenoides, cumarinas, limonoides y otros compuestos fenólicos en diferentes estructuras de la planta, incluyendo semillas, hojas, corteza, raíces y fruto (Sánchez, 1893; Sondheimer et al., 1959; Power & Callan, 1993; Magos-Guerrero, 1999; Awaad, 2006).

2.9.1. Metabolitos secundarios en las hojas de *Casimiroa edulis*

En las hojas de *Casimiroa edulis* se ha documentado la presencia de diversos metabolitos secundarios. Entre los compuestos nitrogenados, Romero *et al.* (1983) identificaron derivados imidazólicos, como histamina y compuestos relacionados, mientras que Rizvi et al. (1985) aislaron alcaloides como skimmianina, eduleína, casimiroína y 1-metil-2-fenil-4-quinolona a partir de partes aéreas de la especie. Khaleel (2002) reportó principalmente compuestos fenólicos, flavonoides y cumarinas. Asimismo, se han identificado compuestos fenólicos y flavonoides, entre ellos quercetina, rutina y flavonas, los cuales han sido asociados con actividad antioxidante en extractos foliares de la especie (Awaad et al., 2006). También se han aislado cumarinas, furocumarinas y polimetoxiflavonas, grupos de metabolitos con distintas actividades biológicas (Awaad et al., 2012; Nagai et al., 2014).

Estudios recientes han ampliado el conocimiento fitoquímico de las hojas de *C. edulis*. Haba et al. (2022) reportaron flavonas metoxiladas, incluyendo casedulonas A y B, mientras que Gamal et al. (2026) identificaron un perfil polifenólico rico mediante HPLC, con ácido gálico y daidzeína como compuestos predominantes. De manera más reciente, Domínguez-Delgado et al. (2026) realizaron un perfil fitoquímico no dirigido del extracto etanólico de hojas, en el que se reportaron compuestos fenólicos, flavonoides y otros metabolitos bioactivos relacionados con actividad antioxidante y antiinflamatoria.

En conjunto, estos estudios confirman que las hojas de *Casimiroa edulis* constituyen una fuente relevante de metabolitos secundarios, sin embargo, en la mayoría de los casos no se reportan variables como la edad de las hojas ni las condiciones de crecimiento del material vegetal, factores que pueden influir significativamente en la acumulación de estos compuestos.

2.10. Factores que afectan la producción de MS en plantas medicinales

Diversos estudios han demostrado que el contenido de metabolitos secundarios en plantas no es constante, ya que presenta variaciones en el tiempo y entre tejidos, siendo fuertemente influenciado por factores ambientales y del desarrollo (Gobbo & López, 2005).

2.10.1. Estacionalidad y ritmo circadiano

La época de recolección de la planta constituye uno de los factores de mayor importancia, ya que la cantidad, y en ocasiones, incluso la naturaleza de los constituyentes activos no permanece constante a lo largo del año, tal es el caso de *Ruta graveolens*, reportada por Reyes-Vaquero et al. (2021), donde la acumulación de metabolitos secundarios presenta una clara variación estacional; por ejemplo, los ácidos grasos predominan en invierno, mientras que los alcaloides alcanzan mayores concentraciones durante primavera y verano. Asimismo, se ha documentado que la composición de metabolitos puede fluctuar a lo largo del ciclo día/noche, aunque esta variación ha sido menos estudiada en esta familia.

2.10.2. Desarrollo y órgano de la planta

La edad y el desarrollo de la planta, así como el tipo de órgano, influyen significativamente en la acumulación de metabolitos secundarios. Estas variaciones pueden reflejarse tanto en la cantidad total como en la proporción de los compuestos presentes. Por ejemplo, en especies del género *Citrus* se ha observado una distribución diferencial de metabolitos entre tejidos del fruto, con acumulación específica de flavonoides en la cáscara y de limonoides en la

membrana segmentaria (Wang et al., 2016), lo que evidencia una especialización metabólica por órgano. Asimismo, durante el desarrollo del tejido de la cáscara se ha reportado una disminución en el contenido de compuestos como flavonoides del benavides y ácidos fenólicos conforme avanza la madurez (Liu et al., 2025).

2.10.3. Radiación

La intensidad de la radiación solar se correlaciona positivamente con la producción de compuestos fenólicos, como flavonoides, taninos y antocianinas, los cuales cumplen una función protectora al absorber y disipar la radiación UV-B, reduciendo el daño celular. En particular los flavonoides se acumulan en tejidos superficiales y actúan como filtro sube además de desempeñar funciones antioxidantes al neutralizar radicales libres (Gobbo-Neto et al., 2006). Gu et al. (2010) mencionaron que en hojas de *Morus alba* la radiación UV-B actúa como un factor de estrés que induce la biosíntesis de metabolitos secundarios, tales como flavonoides y alcaloides, los cuales cumplen funciones fotoprotectoras al absorber la radiación y proteger el material genético. De forma similar, Agati et al. (2011) reportaron que en *Ligustrum vulgare* los flavonoides aumentan en hojas bajo radiación UV como respuesta adaptativa al estrés lumínico.

2.11. Literatura citada

- Adeyemi, M. (2011). A review of secondary metabolites from plant materials for post harvest storage. *International Journal of Pure & Applied Sciences & Technology*, 6(2), 94–102.
- Agati, G., Brunetti, C., Fini, A., Gori, A., Guidi, L., Landi, M., Sebastiani, F., & Tattini, M. (2020). ¿Son los flavonoides antioxidantes eficaces en las plantas? Veinte años de nuestra investigación. *Antioxidants*, 9(11), Article 1098. <https://doi.org/10.3390/antiox9111098>
- Anwar, K., Rahmanto, B., Triyasmono, L., Rizki, M. I., Halwany, W., & Lestari, F. (2017). The influence of leaf age on total phenolic, flavonoids, and free radical scavenging capacity of *Aquilaria beccariana*. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*, 8(1S), 129–133.

- Awaad, A. S., Al-Jaber, N. A., Soliman, G. A., Al-Outhman, M. R., Zain, M. E., Moses, J. E., & El-Meligy, R. M. (2012). New biological activities of *Casimiroa edulis* leaf extract and isolated compounds. *Phytotherapy Research*, 26(3), 452–457. <https://doi.org/10.1002/ptr.3690>
- Awaad, A. S., El-Sayed, N. H., Maitland, D. J., & Mabry, T. J. (2006). Phenolic antioxidants from *Casimiroa edulis* leaves. *Pharmaceutical Biology*, 44(4), 258–262.
- Buchanan, B. B., Gruissem, W., & Jones, L. R. (2015). *Biochemistry and molecular biology of plants* (2nd edition). Wiley Blackwell.
- Castañeda, J., Arteaga, H., Siche, R., & Rodriguez, G. (2010). Estudio comparativo de la pérdida de vitamina C en chalarina (*Casimiroa edulis*) por cuatro métodos de deshidratación. *Scientia Agropecuaria*, 1(1), 75-80. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2010.01.07>
- Cepoi, L. (2024). Cyanobacteria: Metabolisms to molecules. In A. K. Mishra, & S. Singh (Eds.). *Secondary metabolites in cyanobacteria* (pp. 283-311). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-13231-5.00021-0>
- Chiang-F. (1989). *Casimiroa greggii*, formerly in sargentia (Rutaceae). *Taxa*, 38(1), 116-119. <https://doi.org/10.2307/1220909>
- Chomel, M., Guittonny-Larchevêque, M., Fernández, C., Gallet, C., DesRochers, A., Paré, D., Jackson, B. G., & Baldy, V. (2016). Metabolitos secundarios de las plantas: un factor clave en la descomposición de la hojarasca y el ciclo de nutrientes del suelo. *Revista de Ecología*, 104(6), 1527-1541. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12644>
- CONAFOR (s.f). *Casimiroa edulis* Llave. Consultado enero de 2026. <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/896Casimiroa%20edulis.pdf>
- De la Llave, P., Martínez, L. y Alday, J. J. (1825). *Novorum vegetabilium descriptiones. In lucem prodeunt opera / Paulli de la Llave et Ioannis Lexarza reip. Mexic. CIV. ; Fasciculus II. Sexaginta descriptiones complectens quarum tredecim totidem genera nova exhibent.* Apud Martinum Riveram. <https://bibdigital.rjb.csic.es/idurl/1/15615>
- Domínguez-Delgado, C. L., Guadarrama-López, M. M., Cruz-Narváez, Y., Puente-Lee, R. I., Ojeda-Piedra, S. A., & Zambrano-Zaragoza, M. L. (2026). Nanopartículas de PLGA cargadas con extracto de hoja de *Casimiroa edulis*: perfil fitoquímico no dirigido y caracterización antioxidante/oclusiva orientada a la cicatrización de heridas. *Pharmaceutics*, 18(2), Article 249. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics18020249>

- Gamal, M., Othman, S., Sabry, M. M., Hussein, M. A., & El Gizawy, H. A. (2026). Polyphenol profile of *Casimiroa edulis* Llave and evaluation of its hepatoprotective potential. *Current Bioactive Compounds*, 22(3), Article15734072368019. <https://doi.org/10.2174/0115734072368019250220042134>
- García-Argáez, A. N. (2003). Estudio Fitoquímico de apoyo taxonómico al género *Casimiroa* (Rutácea). [Tesis de doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio de la UNAM
- Gobbo-Neto, L., & P-Lopes, N. (2006). Plantas medicinais: factores de influência no conteúdo de metabólitos secundários. *Química Nova*, 30(2), 374-381.
- Gu, X. D., Sun, M. Y., Zhang, L., Fu, H. W., Cui, L., Chen, R. Z., Zhang, D. W., & Tian, J. K. (2010). UV-B induced changes in the secondary metabolites of *Morus alba* L. leaves. *Molecules*, 15(5), 2980–2993. <https://doi.org/10.3390/molecules15052980>
- Haba, M., Abe, N., Kamiya, T., Mizuno, N., Okubo, S., Yamaura, T., Hara, H., & Oyama, M. (2022). Dos nuevas flavonas metoxiladas aisladas de *Casimiroa edulis* La Llave y su actividad inhibidora de MMP-9. *Natural Product Research*, 36(23), 5959–5966. <https://doi.org/10.1080/14786419.2022.2048300>
- Ibarra-Cantún, D., Delgado-Alvarado, A., Herrera-Cabrera, B. E., & Salazar-Rojas, V. M. (2018). Efecto de la condición ambiental del cultivo de *Vanilla planifolia* Jacks. ex Andrews sobre la concentración de fitoquímicos. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 24(2), 151–165. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2017.08.031>
- Idris, A., Linatoc, A. C., Abu Bakar, M. F., Ibrahim, Z. T., & Audu, Y. (2018). Effect of light quality and quantity on the accumulation of flavonoid in plant species. *Journal of Science and Technology*, 10(3), 32.45.
- Khaleel, A. E. S. (2002). Chemical constituents of *Casimiroa edulis* leaves. *Monatshefte für Chemie*, 133, 183-187. <https://doi.org/10.1007/s706-002-8248-4>
- Lozoya, X. 1981. El zapote blanco. *Ciencia y Desarrollo*, 42, 19-35.
- Lv, W., Johnson, J. B., Zaman, Q. U., Zhu, M., Liu, H., Wang, Q., Huang, Y., & Wang, H. (2023). Artificial pollination can improve fruit set and quality in the ice cream tree (*Casimiroa edulis*). *Tropical Plants*, 2, Article 12. <https://doi.org/10.48130/TP-2023-0012>
- Ni, Y.-W., Lin, K.-H., Chen, K.-H., Wu, C.-W., & Chang, Y.-S. (2020). Flavonoid compounds and photosynthesis in *Passiflora* plant leaves under varying

light intensities. *Plants*, 9(5), Article 633.
<https://doi.org/10.3390/plants9050633>

- Ma, D., Guo, Y., Ali, I., Lin, J., Xu, Y., & Yang, M. (2024). Characteristics of plant flavonoid accumulation and effects of cultivation measures on their biosynthesis: A review. *Plant Physiology and Biochemistry*, 215, Article 108960. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.108960>
- Mao, Y., Luo, J., & Cai, Z. (2025). Biosynthesis and regulatory mechanisms of plant flavonoids: A Review. *Plants*, 14(12), Article 1847. <https://doi.org/10.3390/plants14121847>
- Magos V. A., Vidrio H., & Enríquez R. (1991). Pharmacology of *Casimiroa edulis* IV. Hipotensive effects of compounds isolated from methanolic extracts in rats and guinea pigs. *Journal of Ethnopharmacology*, 64(1), 35-44. [https://doi.org/10.1016/s0378-8741\(98\)00101-9](https://doi.org/10.1016/s0378-8741(98)00101-9).
- Magos-Guerrero, G. A. (1999). Estudio farmacológico químico de los metabolitos secundarios de la semilla de *Casimiroa edulis* responsables de la actividad cardiovascular en roedores. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio de la UNAM
- Miller, S. L., Haber, W. A., & Setzer, W. N. (2009). Chemical composition of the leaf essential oil of *Casimiroa edulis* La Llave & Lex. (Rutaceae) from Monteverde, Costa Rica. *Natural Product Communications*, 4(3), 425–426. <https://doi.org/10.1177/1934578X0900400322>.
- Nagai, H., Tanaka, T., Goto, T., Kusudo, T., Takahashi, N., & Kawada. (2014). Phenolic compounds from leaves of *Casimiroa edulis* showed adipogenesis activity. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 78(2), 296-300. <https://doi.org/10.1080/09168451.2014.877821>
- Narváez-Ortiz, E. M., Almaguer-Vargas, G., & Montejano-Rodriguez, J. R. (2025). Revisión de los efectos farmacológicos de *Casimiroa edulis* (zapote blanco). *BioNatura Journal: Ibero-American Journal of Biotechnology and Life Sciences*, 2(3), Article 11. <https://doi.org/10.70099/BJ/2025.02.03.5>
- Nobossé, P., Fombang, E. N., & Mbofung, C. M. F. (2018). Effects of age and extraction solvent on phytochemical content and antioxidant activity of fresh *Moringa oleifera* L. leaves. *Food Science & Nutrition*, 6(8), 2188–2198. <https://doi.org/10.1002/fsn3.783>
- Niu, L., Han, D. (2020). *Chemical analysis of antioxidant capacity: mechanisms and techniques*. De Gruyter.
- Paciolla, C., Fortunato, S., Dipierro, N., Paradiso, A., De Leonardis, S., Mastropasqua, L., & de Pinto, M. C. (2019). Vitamin C in plants: From

- functions to biofortification. *Antioxidants*, 8(11), Article 519. <https://doi.org/10.3390/antiox8110519>
- Pérez-Gálvez, A., Viera, I., & Roca, M. (2020). Caroteins and chlorophylls as antioxidants. *Antioxidants*, 9(6), Article 505. <https://doi.org/10.3390/antiox9060505>
- Pérez Trueba, G. (2003). Los flavonoides: antioxidantes o prooxidantes. *Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas*, 22(1), 48-57.
- Pennington, D. T.; & Sarukhan, J. (2005). *Árboles tropicales de México, Manual para la identificación de las principales especies*. UNAM- Fondo de Cultura Económica.
- Power, B. F., & Callan, T. (1911). Los componentes de las semillas de *Casimiroa edulis*. *Journal of the Chemical Society, Transactions*, 99, 1993-2010. <https://doi.org/10.1039/CT9119901993>
- Reyes-Vaquero, L., Bueno, M., Ventura-Aguilar, R. I., Aguilar-Guadarrama, A. B., Robledo, N., Sepúlveda Jiménez, G., Vanegas Espinoza, P. E., Ibáñez, E., & Del Villar-Martínez, A. A. (2021). Seasonal variation in the chemical profile of *Ruta graveolens* extracts and biological activity against *Fusarium oxysporum*, *Fusarium proliferatum* and *Stemphylium vesicarium*. *Biochemical Systematics and Ecology*, 95, Article 104223. <https://doi.org/10.1016/j.bse.2021.104223>
- Rizvi, S. H., Kapil, R. S., & Shoeb, A. (1985). Alkaloids and coumarins of *Casimiroa edulis*. *Journal of Natural Products*, 48(1), 146. <https://doi.org/10.1021/np50037a032>
- Romero, M. L., Escobar, L.I., Lozoya, X., & Enríquez, R. G. (1983). High-performance liquid chromatographic study of *Casimiroa edulis*. *Journal of Chromatography*, 281(1983), 245-251. [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(01\)87882-1](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(01)87882-1)
- Salam, U., Ullah, S., Tang, Z.-H., Elateeq, A. A., Khan, Y., Khan, J., Khan, A., & Ali, S. (2023). Plant metabolomics: an overview of the role of primary and secondary metabolites against different environmental stress factors. *Life*, 13, Article 706; <https://doi.org/10.3390/life13030706>
- Sánchez-Ruiz, A. (2009). Fitoquímica y evaluación de la actividad citotóxica y anti-inflamatoria de extractos y compuestos aislados de semillas de *Casimiroa greggii* (watson) Chiang. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]
- Sánchez, J. (1893). Breve estudio sobre la almendra del fruto del zapote blanco. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Medicina]. Repositorio de la UNAM

- Sondheimer, F., Meisels, A., & Kincl, F. A. (1959). Constituents of *Casimiroa edulis* Llave et Lex. V. Identity of casimirolid and obacunone. *Journal of Organic Chemistry*, 23, 2413–2416.
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M. y Murphy, A. (2015). Plant physiology and development (6th ed.). Sinauer Associates.
- Teoh, E. S. (2016). Secondary metabolites of plants. In *Medicinal orchids of Asia* (pp. 59–73). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24274-3_5
- Tiwari, R., & Rana, C. S. (2015). Plant secondary metabolites: a review. *International Journal of Engineering Research and General Science*, 3(5), 661-670.
- Treutter, D. (2005). Significance of flavonoids in plant resistance and enhancement of their biosynthesis. *Plant Biology*, 7(6), 581–591. <https://doi.org/10.1055/s-2005-873009>
- Tun, K. N. W., Aminah, N. S., Kristanti, A. N., Aung, H. T., & Takaya, Y. (2020). Natural products isolated from *Casimiroa*. *Open Chemistry*, 18, 778–797. <https://doi.org/10.1515/chem-2020-0128>
- Vera-Sánchez, G. M. (2023). Capacidad antioxidante y contenido de polifenoles de la chalarina (*Casimiroa edulis*). [Tesis de maestría, Universidad Femenina del Sagrado Corazón]. Repositorio de la UNIFE
- Vidal-López, D. G., Schlie-Guzmán, M. A., González-Esquinca, A. R., & Luna-Cazares, L. M. (2008). El zapote blanco (*Casimiroa edulis* La Llave et Lex, Rutaceae): un recurso medicinal de México. <https://hdl.handle.net/20.500.12753/1779>
- Wang, S., Tu, H., Wan, J., Chen, W., Liu, X., Luo, J., Xu, J., & Zhang, H. (2016). Spatio-temporal distribution and natural variation of metabolites in citrus fruits. *Food Chemistry*, 199, 8–17. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.11.113>
- Wu, W., Wu, H., Liang, R., Huang, S., Meng, L., Zhang, M., Xie, F., & Zhu, H. (2025). Light regulates the synthesis and accumulation of plant secondary metabolites. *Frontiers in Plant Sciences*, 16, Article 1644472. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1644472>.
- Zagoskina, N. V., Zubova, M. Y., Nechaeva, T.L., Kazantseva, V. V., Goncharuk, E. A., Katanskaya, V. M., Baranova, E. N., & Aksenova, M. A. (2023). Polyphenols in plants: structure, biosynthesis, abiotic stress regulation, and practical applications (Review). *International Journal of Molecular Sciences*, 24(18), Article 13874. <https://doi.org/10.3390/ijms241813874>

- Zavaleta, J., Muñoz, AM, Blanco, T., Alvarado-Ortiz, C., & Loja, B. (2005). Capacidad antioxidante y principales ácidos fenólicos y flavonoides de algunos alimentos. *Horizonte Médico*, 5(2), 29-38.
- Zheng, Y.-Z., Deng, G., Chen, D.-F., Guo, R., y Lai, R.-C. (2019). Influence of the C2–C3 double bond on the antiradical activity of flavonoids: Analysis of different mechanisms. *Phytochemistry*, 157, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2018.10.015>

CAPÍTULO 3. INFLUENCIA DE LA EDAD Y EXPOSICIÓN SOLAR SOBRE EL CONTENIDO DE METABOLITOS SECUNDARIOS EN HOJAS DE ZAPOTE BLANCO (*Casimiroa edulis*)¹

Resumen

El zapote blanco (*Casimiroa edulis*) es una especie de interés fitoquímico debido a la presencia de compuestos bioactivos en sus diferentes órganos; sin embargo, existe poca información sobre la variación de metabolitos en hojas considerando la edad foliar y la exposición solar. El objetivo de este estudio fue comparar el contenido de fenoles totales, flavonoides, vitamina C, pigmentos fotosintéticos y capacidad antioxidante en hojas jóvenes y maduras de *C. edulis* bajo condiciones de exposición directa al sol y sombra. El material vegetal se recolectó durante agosto, septiembre y octubre de 2025, estableciendo cuatro tratamientos según edad foliar y condición de luz. Las determinaciones fitoquímicas se realizaron mediante métodos espectrofotométricos y los resultados se analizaron mediante ANOVA, prueba de medias de Tukey y correlación de Pearson. Los resultados mostraron que la edad foliar, la exposición solar y el mes de muestreo influyeron en las variables evaluadas. Las hojas jóvenes expuestas al sol presentaron mayor acumulación de fenoles totales y capacidad antioxidante, mientras que los flavonoides y la vitamina C mostraron respuestas variables entre tratamientos y meses. Por su parte, los pigmentos fotosintéticos se asociaron principalmente con hojas maduras. La correlación positiva entre fenoles totales y capacidad antioxidante sugiere que estos compuestos contribuyeron de manera importante a la actividad antioxidante de los extractos. En conclusión, la acumulación de metabolitos en hojas de *C. edulis* depende de la interacción entre edad foliar, exposición solar y mes de muestreo.

Palabras clave: *Casimiroa edulis*, fenoles totales, flavonoides, vitamina C, pigmentos fotosintéticos, capacidad antioxidante.

¹Tesis de Maestría en Ciencias en Horticultura, Universidad Autónoma Chapingo
Autor: Elisama Talía Pérez Martínez
Directora de tesis: Dra. Margarita Gisela Peña Ortega

INFLUENCE OF LEAF AGE AND SOLAR EXPOSURE ON SECONDARY METABOLITE CONTENT IN LEAVES OF WHITE SAPOTE (*Casimiroa edulis*)

Abstract

White sapote (*Casimiroa edulis*) is a species of phytochemical interest due to the presence of bioactive compounds in different plant organs; however, limited information is available regarding metabolite variation in leaves according to leaf age and sunlight exposure. The objective of this study was to compare the levels of total phenols, flavonoids, vitamin C, photosynthetic pigments, and antioxidant capacity in young and mature leaves of *C. edulis* under direct sunlight and shade conditions. Leaf samples were collected during August, September, and October 2025, and four treatments were established according to leaf age and light conditions. Metabolite determinations were performed using spectrophotometric methods, and data were analyzed by analysis of variance (ANOVA), Tukey's multiple comparison test, and Pearson correlation analysis. Results showed that leaf age, sunlight exposure, and sampling month influenced the evaluated variables. Young leaves exposed to direct sunlight showed the highest accumulation of total phenols and antioxidant capacity, whereas flavonoids and vitamin C displayed variable responses among treatments and sampling months. Photosynthetic pigments were mainly associated with mature leaves. A positive correlation between total phenols and antioxidant capacity suggests that phenolic compounds contributed significantly to the antioxidant activity of the leaf extracts. In conclusion, metabolite accumulation in *C. edulis* leaves depends on the interaction among leaf age, sunlight exposure, and sampling month.

Keywords: Total phenols, flavonoids, vitamin C, photosynthetic pigments, antioxidant capacity.

3.1. Introducción

El zapote blanco (*Casimiroa edulis*) es una especie originaria de México y Centroamérica, valorada por sus frutos comestibles y por su uso en la medicina tradicional (Vidal-López et al., 2008). Su importancia fitoquímica se relaciona con la presencia de metabolitos secundarios con actividad biológica, particularmente en las hojas, donde se han reportado flavonoles como rutina (Romero *et al.*, 1983), alcaloides tipo 4-quinolinona (Khaleel, 2002), distintas cumarinas (Awaad et al., 2012), así como flavonas metoxiladas y otros compuestos fenólicos en estudios más recientes (Haba et al., 2022; Gamal et al., 2026). La acumulación de metabolitos en las plantas depende de factores propios del tejido y de las condiciones ambientales, entre los que destacan el estado de desarrollo, la época de recolección y la radiación solar (Gobbo-Neto & Lopes, 2006; Zagorskina et al., 2023). En hojas, la edad foliar puede modificar el contenido de fenoles, flavonoides y capacidad antioxidante (Ma et al., 2024), mientras que la exposición a la luz puede inducir la biosíntesis de metabolitos secundarios con funciones de defensa y fotoprotección, principalmente flavonoides, taninos y otros compuestos fenólicos (Agati et al., 2020; Wu et al., 2025). La evaluación de metabolitos secundarios puede complementarse con el análisis de compuestos primarios como vitamina C, clorofilas y carotenoides, debido a sus funciones fotosintéticas y antioxidantes (Paciolla et al., 2019; Pérez-Gálvez et al., 2020). A pesar de los antecedentes fitoquímicos disponibles sobre las hojas de *C. edulis*, la mayoría se ha centrado en la identificación de compuestos o en la evaluación de actividades biológicas, sin precisar características del material vegetal empleado, como la edad foliar o la condición de exposición lumínica, por tanto, aún es limitada la información sobre la variación de metabolitos en hojas de esta especie asociada con la edad foliar y la exposición a la luz. Por ello, el objetivo de este estudio fue comparar el contenido de fenoles totales, flavonoides, vitamina C, clorofilas, carotenoides y capacidad antioxidante en hojas jóvenes y maduras de *C. edulis* bajo condiciones de exposición directa al sol y de sombra, durante diferentes meses de muestreo.

3.2. Materiales y Métodos

3.2.1. Localización del sitio de muestreo y análisis

El material vegetal fue recolectado en Texcoco, Estado de México, en las coordenadas geográficas 19°30'21" N y 98°51'42" O, a una altitud aproximada de 2250 m s. n. m. Las muestras fueron procesadas y analizadas en el laboratorio de usos múltiples, perteneciente al Departamento de Fitotecnia de la Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México.

Figura 1. Árbol de *Casimiroa edulis*



3.2.2. Diseño experimental

Se estableció un diseño experimental basado en un arreglo factorial 2x2, considerando dos factores: edad de las hojas (joven y madura) y condición de luz (sol directo y sombra), a partir de esta combinación se definieron cuatro tratamientos como se muestra en la Tabla 1.

Cuadro 1. Diseño de tratamientos

Tratamiento	Factor edad de las hojas	Factor condición de luz
T1	Jóvenes	Sol directo
T2	Jóvenes	Sombra
T3	Maduras	Sol directo
T4	Maduras	Sombra

Por cada tratamiento se recolectaron cuatro repeticiones biológicas independientes, consistentes en aproximadamente 30 gramos de material vegetal cada una. Las muestras se obtuvieron de distintos puntos del dosel de un mismo individuo de *Casimiroa edulis*. El muestreo se llevó a cabo en tres momentos distintos: agosto, septiembre y octubre del 2025.

La clasificación de las hojas según su edad se realizó con base en características morfológicas. Se consideraron hojas jóvenes aquellas localizadas en posiciones apicales de las ramas con coloración que varía de amarillo-naranja a rojiza y textura suave, por otro lado las hojas maduras correspondieron a hojas completamente desarrolladas, de mayor tamaño, con color verde oscuro y textura más firme.

La condición de luz se definió en función de la posición dentro de la copa del árbol, las hojas expuestas a sol directo fueron aquellas ubicadas en la parte externa de la copa, mientras que las hojas en condición de sombra correspondieron a las localizadas en el interior de la copa.

3.2.3. Material vegetal

Se recolectaron ramas de alrededor de 30 cm de longitud provenientes de un árbol adulto de *Casimiroa edulis*. La selección de material vegetal se realizó considerando únicamente ramas sanas, es decir que no mostraran evidencias de plagas o enfermedades.

Figura 2. A. Hojas jóvenes con exposición directa al sol. B. Hojas jóvenes bajo sombra

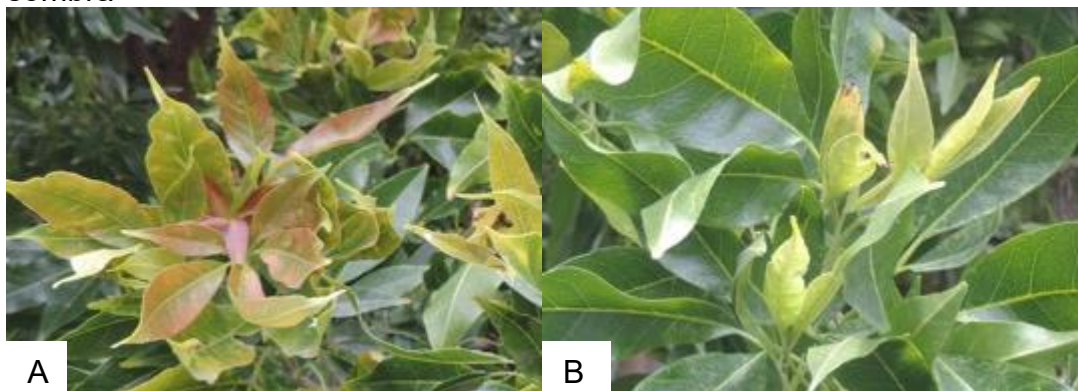


Figura 3. A. Hojas maduras con exposición directa al sol. B. Hojas maduras bajo sombra



3.2.4. Preparación de muestras

Las hojas fueron transportadas al laboratorio en bolsas herméticas tipo ziploc, debidamente etiquetadas dentro de una hielera para mantenerlas en buen estado. Posteriormente, el material se almacenó en un congelador a -20 °C hasta su análisis.

Para el procesamiento, se seleccionaron entre 10 y 12 hojas por bolsa de muestra, de acuerdo con las características de cada tratamiento, las hojas se limpiaron con servilletas para eliminar impurezas superficiales, se retiraron el pecíolo y la nervadura central, y el tejido foliar se picó finamente con el fin de homogenizar la muestra previo a su análisis.

3.2.5. Obtención de extractos

Para la obtención de extractos se utilizó el tejido foliar fresco previamente preparado y se llevó a cabo en viales utilizando distintos solventes seleccionados en función del tipo de metabolito a determinar. Las condiciones específicas de extracción, incluyendo la masa de tejido vegetal, el solvente usado y número de réplicas de extracción para cada determinación se describe en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Condiciones de extracción para la determinación de metabolitos en tejido foliar de *Casimiroa edulis*

Metabolito	Muestra (g)	Solvente	Solvente (mL)	Réplicas de extracción
Clorofilas	0.1	Acetona	5	2
Carotenoides	0.1	Acetona	5	2
Fenoles totales	0.1	Alcohol etílico al 70 %	5	4
Flavonoides	0.1	Alcohol etílico absoluto	5	4
Vitamina C	0.5	Á. tricloroacético al 20 %	5	3
Capacidad Antioxidante	0.1	Alcohol etílico al 70 %	5	4

Nota: En los primeros meses de colecta las condiciones de extracción fueron las establecidas en la Tabla 1, sin embargo, en la colecta correspondiente al mes de octubre debido a la disponibilidad limitada de hojas jóvenes expuestas al sol la masa de tejido utilizada se ajustó a 0.05 g para todas las determinaciones excepto la de vitamina C. Este ajuste se realizó conservando el tipo de solvente y las condiciones de extracción con el objetivo de mantener la comparabilidad entre muestras.

En todas las extracciones, excepto la correspondiente a vitamina C, tras añadir el solvente al material vegetal, la mezcla se dejó reposar durante 24 horas en refrigeración a 4 °C y posteriormente se homogeneizó con un homogeneizador IKA T25 previo al análisis. En el caso de la vitamina C, inmediatamente después de agregar la solución de ácido tricloroacético, la muestra se homogeneizó en frío con un homogeneizador IKA T25, luego se centrifugó a 17000 rpm durante 20 minutos a 5 °C.

3.2.6. Análisis fitoquímico

Las determinaciones de metabolitos y la evaluación de la capacidad antioxidante se llevaron a cabo mediante métodos espectrofotométricos, haciendo uso de un espectrofotómetro. Cada análisis se basó en la formación de complejos coloreados para cada compuesto, cuya absorbancia se midió a longitudes de onda específicas a cada metabolito.

3.2.6.1. Fenoles totales

El contenido de compuestos fenólicos totales se determinó por el método de Folin-Ciocalteu, basado en la reacción de oxidación-reducción entre los compuestos fenólicos y el reactivo de Folin, lo cual da lugar a la formación de un complejo coloreado de tonalidad azul (Waterman & Mole, 1994). Para ello, se tomó una alícuota de 100 μ L del extracto, la cual se aforó a 4 mL con agua destilada; posteriormente se adicionaron 250 μ L del reactivo de Folin-Ciocalteu. La mezcla se agitó y se dejó reposar durante 9 min, tras lo cual se añadieron 750 μ L de carbonato de sodio al 20 %. La mezcla se agitó nuevamente y se dejó reposar durante 2 horas en oscuridad para el desarrollo de color. La absorbancia se midió a 760 nm en un espectrofotómetro UV-Vis y la cuantificación se realizó mediante una curva de calibración utilizando ácido tánico como estándar. Los resultados se expresaron como mg de equivalentes de ácido tánico por gramo de peso fresco de muestra (mgEAT/g).

3.2.6.2. Flavonoides totales

El contenido de flavonoides totales se determinó mediante un método colorimétrico basado en la formación de complejos entre flavonoides y cloruro de aluminio los cuales generan una coloración amarillenta medible espectrofotométricamente, basado en Liu et al. (2002), con modificaciones. Para ello se mezclaron 2 mL del extracto con 2 mL de solución de AlCl_3 al 2 %, la mezcla se dejó reposar durante 15 min a temperatura ambiente y posteriormente se midió la absorbancia a 415 nm en un espectrofotómetro UV-Vis.

La cuantificación se realizó mediante una curva de calibración usando quercetina como estándar y los resultados se expresaron como mg de equivalentes de quercetina por gramo de peso fresco de muestra (mgEQ/g).

3.2.6.3. Vitamina C

El contenido de vitamina C se determinó mediante el método espectrofotométrico basado en su capacidad reductora, usando el reactivo Folin-Cicalteu según lo descrito por Jagota y Dani (1982) con modificaciones. A partir del sobrenadante del extracto obtenido con ácido tricloroacético, se tomó una alícuota de 400 µL, a la cual se adicionaron 3.2 mL de agua bidestilada y 400 µL del reactivo de Folin-Ciocalteu previamente diluido (1:10). La mezcla se agitó y se dejó reposar por 10 minutos para el desarrollo de color. La absorbancia se midió a 760 nm en un espectrofotómetro UV-Vis.

La cuantificación se realizó mediante una curva de calibración usando ácido ascórbico como estándar. Finalmente, los resultados se expresaron en mg de ácido ascórbico por muestra (mg AA/g).

3.2.6.4. Clorofilas y Carotenos

El contenido de clorofilas y carotenoides se determinó mediante espectrofotometría UV-Vis a partir de los extractos obtenidos en acetona, para ello se tomó una alícuota de 4 mL del extracto y se realizó la lectura de absorbancia a 661 y 645 nm para la determinación de clorofila a y clorofila b, respectivamente, y a 470 nm para carotenoides, en un espectrofotómetro UV-Vis.

La concentración de los pigmentos se calculó mediante las siguientes ecuaciones:

$$C_a = \frac{[11.24(A_{661}) - 2.04(A_{645})] \times V}{1000 \times W}$$

$$C_b = \frac{[20.13(A_{645}) - 4.19(A_{661})] \times V}{1000 \times W}$$

$$Cx + c = \frac{[1000(A_{470}) - 1.90(C_a) - 63.14(C_b)]}{214}$$

Donde A corresponde a la absorbancia a la longitud de onda indicada, V es el volumen del extracto (mL) y W es la masa de la muestra (g). Los resultados se expresaron en mg/g de peso fresco (mg/g PF).

3.2.6.5. Capacidad Antioxidante

La capacidad antioxidante se determinó mediante el método del radical ABTS, basado en la capacidad de los compuestos antioxidantes presentes en el extracto para neutralizar el radical ABTS•+, provocando una disminución en la absorbancia. Para ello, se tomó una alícuota de 100 µL del extracto, a la cual se adicionaron 3.9 mL de la solución de ABTS•+. La mezcla se agitó y se dejó reposar durante 2 horas en oscuridad para su reacción. Posteriormente, se midió la absorbancia a 734 nm en un espectrofotómetro UV-Vis.

La cuantificación se realizó mediante una curva de calibración usando ácido ascórbico como estándar. Los resultados se expresaron como mg equivalentes de ácido ascórbico por gramo de peso fresco (mg EAA/g PF)

3.2.7. Análisis Estadístico

Los datos obtenidos se analizaron estadísticamente con el software RStudio versión 2026.04.0 y R versión 4.6.0. En primer lugar, se verificó el cumplimiento de los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas mediante las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene, respectivamente. Posteriormente, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) factorial considerando como factores el mes de muestreo, la edad foliar y la condición de luz, con el fin de evaluar el efecto individual y la interacción entre dichos factores sobre las variables analizadas, posterior a ello, se realizaron análisis independientes por mes de muestreo. Para agosto y septiembre se aplicó un ANOVA de dos vías, considerando como factores la edad foliar y la condición de luz. En el caso del mes de octubre, debido a la ausencia de muestras correspondientes al tratamiento de hojas jóvenes en

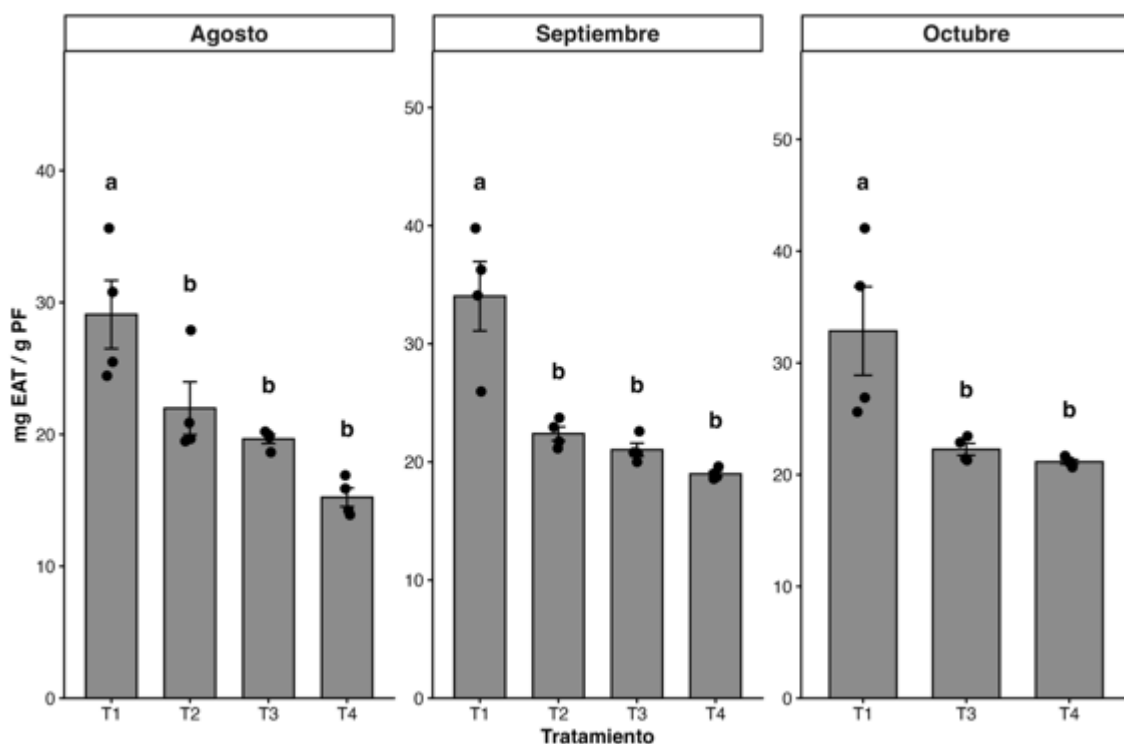
condición de sombra, se realizó un ANOVA de una vía. Por último, cuando se detectaron diferencias significativas entre tratamientos, se aplicó la prueba de comparación múltiple de Tukey con un nivel de significancia de $p \leq 0.05$.

Como análisis complementario, se evaluó la relación entre la capacidad antioxidante y los metabolitos cuantificados mediante el coeficiente de correlación de Pearson. Este análisis permitió identificar posibles asociaciones lineales entre las concentraciones de los metabolitos y los valores obtenidos en los ensayos de capacidad antioxidante. La significancia estadística se estableció con un valor de $p < 0.05$.

3.3. Resultados y Discusión

Del análisis factorial, los resultados mostraron que la interacción triple mes x edad x exposición solar fue significativa para la capacidad antioxidante y vitamina C, con valores de $p = 0.0065$ y $p = 0.0042$, respectivamente; esto indica que el efecto conjunto de la edad foliar y la exposición solar sobre estas variables dependió del mes de evaluación. Asimismo, el efecto del mes fue significativo para fenoles totales ($p = 0.0116$), flavonoides ($p = 0.0212$), vitamina C ($p < 0.001$), clorofila a ($p = 0.0076$), clorofila b ($p = 0.0194$), carotenos ($p = 0.0069$) y clorofila total ($p = 0.0078$), lo que sugiere que estas variables presentaron variación entre los meses evaluados. Además, se observaron interacciones dobles significativas con el mes en la capacidad antioxidante ($p = 0.0203$), flavonoides ($p = 0.0281$), vitamina C ($p = 0.0208$), lo que indica que la respuesta de estas variables frente a la edad foliar o la exposición solar no fue constante entre meses. Debido a la presencia de efectos significativos del mes y de interacciones con este factor, los análisis posteriores se realizaron por separado para cada mes, con la finalidad de interpretar de forma específica las diferencias entre tratamientos.

3.3.1. Fenoles totales



Nota: Las barras representan la media $\pm$ error estándar; los puntos negros corresponden a las réplicas individuales. Letras diferentes sobre las barras indican diferencias significativas entre tratamientos dentro de cada mes, de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). EAT = equivalentes de ácido tánico; PF = peso fresco. T1 = hojas jóvenes expuestas al sol; T2 = hojas jóvenes sombreadas; T3 = hojas maduras expuestas al sol; T4 = hojas maduras sombreadas. En octubre no se incluye T2 debido a la exclusión de ese tratamiento en el análisis

Figura 4. Contenido foliar de fenoles totales en *Casimiroa edulis* según tratamiento y mes de muestreo

Como se observa en la Figura 4 el contenido de fenoles totales presentó diferencias entre tratamientos durante los meses evaluados. En agosto, T1 mostró el mayor contenido y fue significativamente superior a T2, T3 y T4, los cuales no difirieron estadísticamente entre sí. En septiembre se mantuvo el mismo patrón, con valores superiores en T1 y menores en el resto de los tratamientos. En octubre, aún cuando T2 no fue incluido en el análisis, T1 nuevamente presentó el mayor contenido de fenoles totales, mientras que T3 y T4 mostraron valores significativamente menores y similares entre sí. En conjunto, estos resultados indican que las hojas jóvenes expuestas al sol

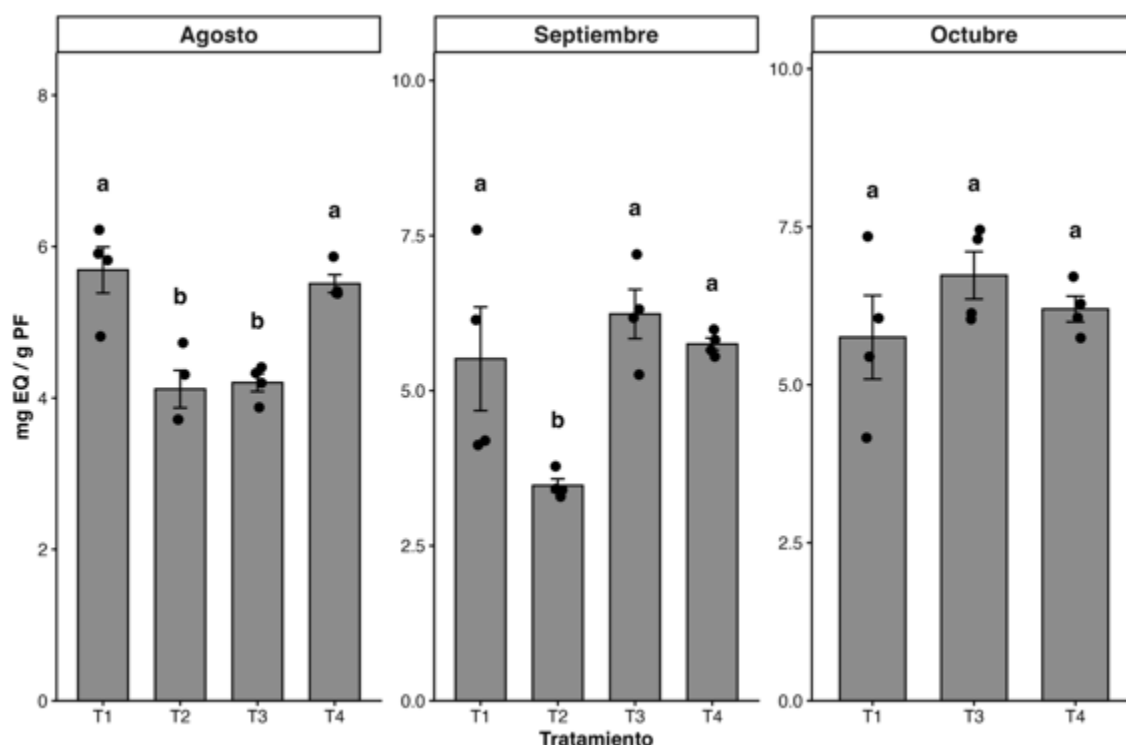
presentaron una mayor acumulación de fenoles totales durante todo el periodo evaluado.

La mayor acumulación de fenoles totales observada en T1 sugiere que las hojas jóvenes expuestas directamente al sol presentaron una mayor respuesta metabólica asociada con la protección frente a la radiación, ya que los compuestos fenólicos participan en la fotoprotección vegetal. Este comportamiento también permite considerar el papel de la edad foliar, debido a que las hojas jóvenes se encuentran en una etapa de desarrollo activo y pueden presentar una mayor demanda de compuestos protectores frente a la radiación, especialmente cuando están expuestas directamente al sol. Sin embargo, esta respuesta no parece depender únicamente de la edad, ya que la diferencia fue más evidente al comparar hojas jóvenes y maduras bajo exposición solar directa. En este sentido, Del Valle et al. (2020) reportaron que la exposición a radiación UV incrementó la concentración de compuestos fenólicos, lo que se interpretó como una respuesta fotoprotectora frente a la luz UV. De manera similar, Kang et al. (2022) observaron que la radiación UV-A modificó la concentración de fenoles totales hojas de *Ocimum basilicum*, respuesta que se relacionó con cambios en la ruta de biosíntesis de compuestos fenólicos y dependió de la intensidad y duración de la exposición. Por tanto, los valores superiores registrados en T1 podrían estar asociados con una mayor demanda de compuestos fenólicos como parte de la respuesta antioxidante y fotoprotectora de hojas jóvenes sometidas a exposición solar directa.

Aunque el patrón de mayor contenido en T1 fue consistente durante los tres meses, la magnitud de los valores cambió entre agosto, septiembre y octubre, lo cual coincide con el efecto significativo del mes reportado para fenoles totales en el análisis factorial general. Esta variación mensual sugiere que la acumulación de fenoles en *C. edulis* no dependió únicamente de la exposición solar o de la edad foliar, sino también de las condiciones ambientales y fisiológicas presentes en cada momento de muestreo. Bernal et al. (2013) reportaron que el contenido foliar de fenoles puede variar estacionalmente y señalaron que estos cambios pueden estar asociados no sólo con la radiación UV-B, sino también con factores

ontogénicos y ambientales, como temperatura, propiedades del suelo o disponibilidad de agua. En este sentido, los resultados obtenidos sugieren que la acumulación de fenoles totales en *C. edulis* respondió a la combinación entre edad foliar, exposición solar y mes de muestreo, con una acumulación particularmente alta en hojas jóvenes expuestas al sol.

3.3.2. Flavonoides



Nota: Las barras representan la media $\pm$ error estándar; los puntos negros corresponden a las réplicas individuales. Letras diferentes sobre las barras indican diferencias significativas entre tratamientos dentro de cada mes, de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). EQ = equivalentes de quercetina; PF= peso fresco. T1 = hojas jóvenes expuestas al sol; T2 = hojas jóvenes sombreadas; T3 = hojas maduras expuestas al sol; T4 = hojas maduras sombreadas. En octubre no se incluye T2 debido a la exclusión de ese tratamiento en el análisis.

Figura 5. Contenido foliar de flavonoides en *Casimiroa edulis* según tratamiento y mes de muestreo.

Como se observa en la Figura 5, el contenido de flavonoides presentó diferencias entre tratamientos que variaron según el mes de muestreo. En agosto, los valores más altos se observaron en T1 y T4, los cuales no difirieron estadísticamente

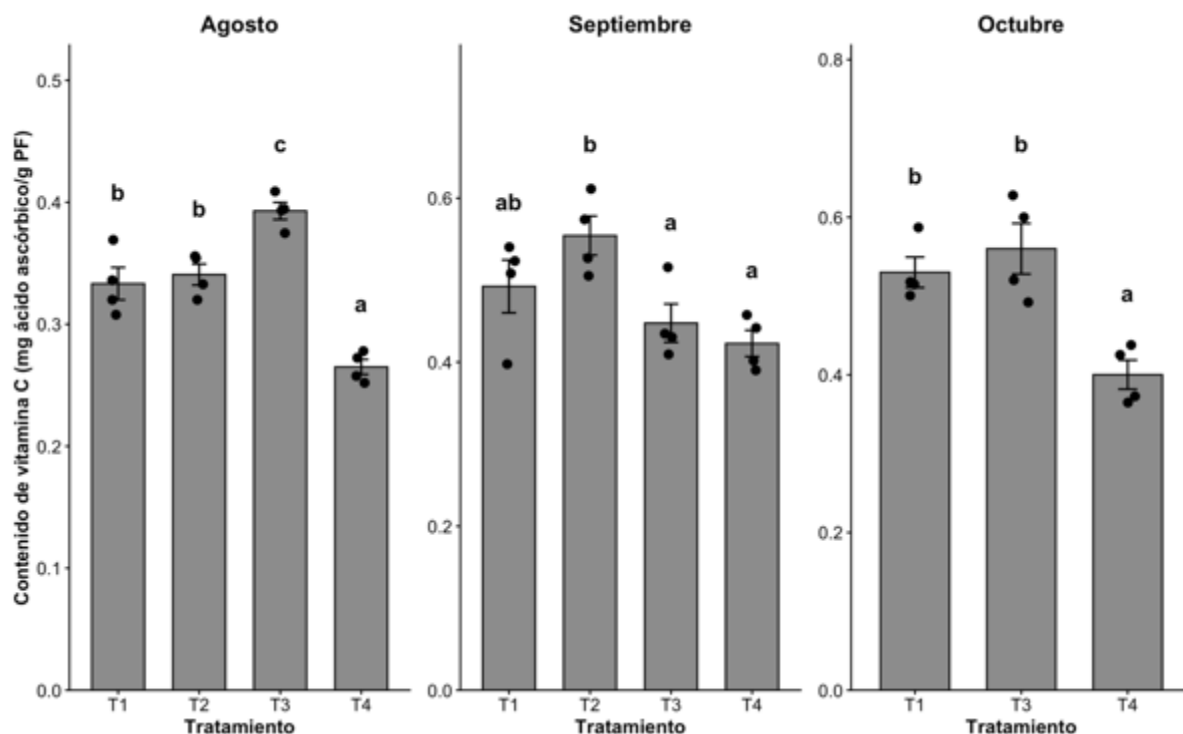
entre sí, mientras que T2 y T3 presentaron valores significativamente menores. En septiembre, T2 registró el contenido más bajo, en tanto que T1, T3 y T4 mostraron valores superiores y estadísticamente similares. En octubre, aunque T2 no fue incluido en el análisis, no se observaron diferencias significativas entre T1, T3 y T4. En conjunto, estos resultados indican que la acumulación de flavonoides no respondió a un solo factor de manera constante; sin embargo, T2, correspondiente a hojas jóvenes bajo sombra, tendió a presentar los valores más bajos durante los meses en los que fue evaluado.

La variación observada en el contenido de flavonoides sugiere que estos compuestos respondieron de manera diferencial a la combinación entre edad foliar, exposición solar y mes de muestreo. Los valores altos observados en T1 durante agosto y septiembre pueden asociarse con una mayor demanda de compuestos fotoprotectores en hojas jóvenes expuestas directamente al sol ya que los flavonoides se asocian a la fotoprotección vegetal, Agati et al. (2011) reportaron que la biosíntesis de flavonoides puede incrementarse bajo radiación UV y condiciones de exceso de luz, lo que respalda su papel en la respuesta frente a estrés lumínico. Sin embargo, el comportamiento de T4 en agosto y de T3 y T4 en septiembre indica que la acumulación de flavonoides no estuvo determinada únicamente por la exposición solar directa, lo cual sugiere que la edad foliar y el estado fisiológico del tejido también influyeron en la respuesta, ya que las hojas maduras, tanto expuestas como sombreadas, presentaron valores altos en algunos meses. En este sentido, Csepregi et al. (2017) mostraron que la edad de desarrollo de la hoja puede modular la respuesta a la radiación UV-B y afectar la acumulación de flavonoles y la actividad antioxidante; de forma similar, Valares-Masa et al. (2016) reportaron diferencias en la síntesis de flavonoides entre hojas jóvenes y maduras, además de una clara variación estacional.

Respecto al menor contenido observado en T2 durante agosto y septiembre sugiere que las hojas jóvenes bajo sombra presentaron una menor acumulación de flavonoides en comparación con los tratamientos expuestos al sol o con hojas maduras. Esto puede interpretarse como una menor demanda de compuestos fotoprotectores bajo condición de baja disponibilidad lumínica, aunque esta

explicación debe considerarse con cautela porque en octubre no se observaron diferencias entre los tratamientos analizados. Hartikainen et al. (2020) señalaron que la acumulación foliar de flavonoides y compuestos fenólicos relacionados con la absorción de UV puede presentar patrones estacionales variables y depender de la combinación de distintos factores ambientales. Por tanto, los resultados obtenidos en *C. edulis* sugieren que la acumulación de flavonoides dependió de la interacción entre las condiciones de luz, la edad foliar y el mes de muestreo, más que de un efecto aislado de la exposición solar o del desarrollo de la hoja.

3.3.3. Vitamina C



Nota: Las barras representan la media $\pm$ error estándar. Los puntos indican las repeticiones individuales. Letras diferentes sobre las barras indican diferencias significativas entre tratamientos dentro de cada mes, de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). PF = peso fresco. T1 = hojas jóvenes expuestas al sol; T2 = hojas jóvenes sombreadas; T3 = hojas maduras expuestas al sol; T4 = hojas maduras sombreadas. En octubre no se incluye T2 debido a la exclusión de ese tratamiento en el análisis.

Figura 6. Contenido foliar de vitamina C en *Casimiroa edulis* según tratamiento y mes de muestreo.

Como se puede apreciar en la Figura 6, el contenido de vitamina C mostró una respuesta variable entre tratamientos y meses de muestreo. De forma general, el tratamiento con mayor contenido no fue constante a lo largo del periodo evaluado, ya que en agosto el mayor valor se observó en T3, en septiembre en T2 y T1, aunque T1 se ubicó como un grupo intermedio al compartir letras con los demás tratamientos y en octubre en T1 y T3, mientras que T4 tendió a presentar los valores más bajos, particularmente en agosto y octubre. Este comportamiento coincide con el ANOVA factorial, donde la interacción triple Mes $\times$ Edad $\times$ Exposición solar fue significativa para vitamina C ($p = 0.0042$), lo que indica que la acumulación de este metabolito no dependió de un solo factor, sino de la combinación entre el mes de muestreo, la edad foliar y la condición de exposición solar.

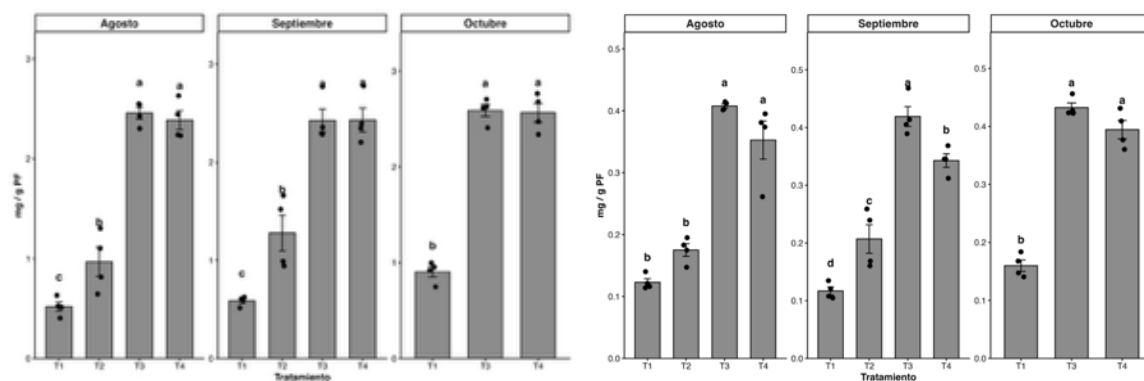
La variación observada puede explicarse a partir del papel del ácido ascórbico en el sistema antioxidante vegetal. Aunque en los antecedentes se ha señalado que su acumulación depende de factores como la luz, el desarrollo del tejido y las condiciones de estrés, los resultados obtenidos muestran que en *Casimiroa edulis* estos factores no actuaron de manera aislada, sino en conjunto. La exposición solar pudo favorecer cambios en la acumulación de vitamina C debido a la participación de este compuesto en la regulación redox y en la eliminación de especies reactivas de oxígeno bajo condiciones de estrés ambiental, como alta intensidad lumínica (Foyer & Noctor, 2011; Xiao et al., 2021), en este sentido los valores altos observados en T3 durante agosto y en T1 y T3 durante octubre pueden relacionarse con una mayor demanda antioxidante en hojas expuestas al sol, donde la radiación puede incrementar la generación de especies reactivas de oxígeno, lo cual concuerda con Yabuta et al. (2007), quienes reportaron que las hojas expuestas a luz pueden presentar mayores niveles de ácido ascórbico que las hojas en sombra.

Sin embargo, la respuesta observada no se explicó únicamente por la exposición solar, ya que el tratamiento con mayor contenido cambió entre meses, en septiembre el valor mayor fue T2, lo cual sugiere la participación de otros factores, como la edad foliar y el estado fisiológico del tejido. En este sentido, Li

et al. (2017) documentaron variaciones del ácido ascórbico durante el desarrollo foliar en *Camellia sinensis*, mientras que Kappel et al. (2025) reportaron mayores niveles de ascorbato en hojas jóvenes que en hojas maduras de *Arabidopsis thaliana*. Por lo tanto, los resultados obtenidos sugieren que el contenido de vitamina C en hojas de *C. edulis* respondió de manera integrada al mes de muestreo, la edad foliar y la exposición solar, más que a un efecto aislado de la luz o del desarrollo foliar.

3.3.4. Clorofilas y Carotenoides

Como se puede ver en la Figura 7 (izquierda) el contenido de clorofila total presentó diferencias entre tratamientos durante los meses evaluados. En general, T3 y T4 registraron los valores más altos, mientras que T1 presentó los menores contenidos. Este comportamiento también se observó en la figura 8 respecto a los carotenoides, donde los tratamientos con mayor contenido de clorofila total tendieron a presentar mayor acumulación de pigmentos accesorios (carotenoides).

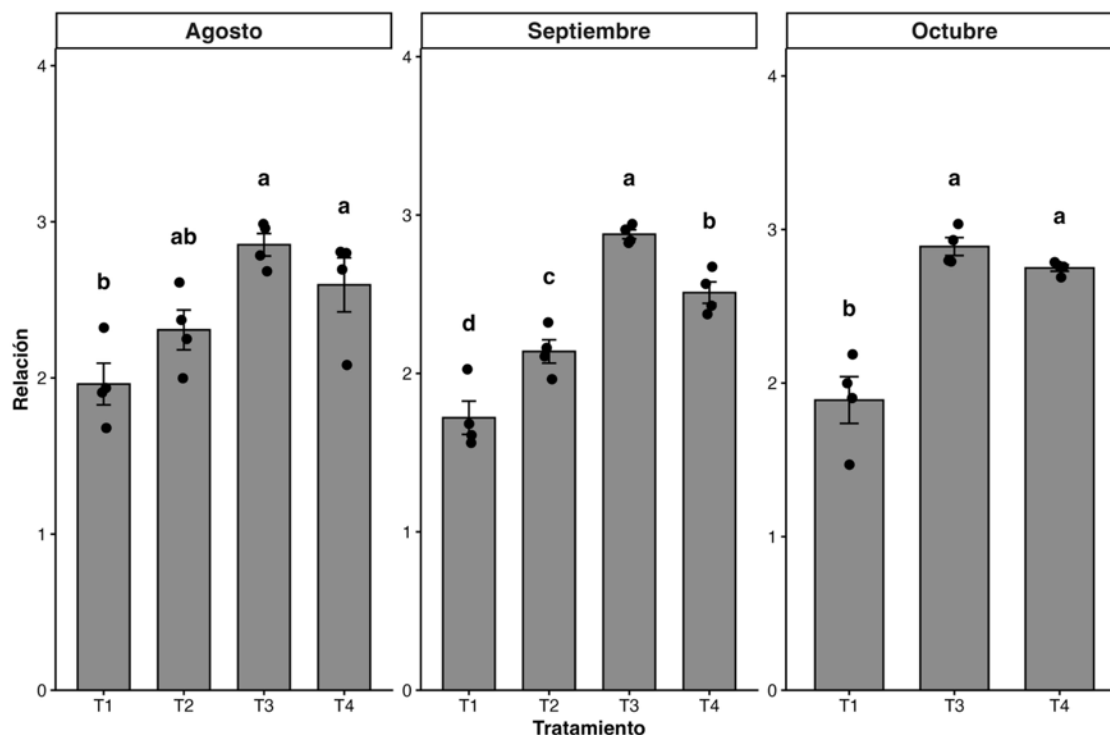


Nota: Las barras representan la media $\pm$ error estándar. Los puntos indican las repeticiones individuales. Letras diferentes sobre las barras indican diferencias significativas entre tratamientos dentro de cada mes, de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). PF = peso fresco. T1 = hojas jóvenes expuestas al sol; T2 = hojas jóvenes sombreadas; T3 = hojas maduras expuestas al sol; T4 = hojas maduras sombreadas. En octubre no se incluyó el tratamiento T2 en el análisis.

Figura 7. Contenido de clorofila total (izquierda), carotenoides (derecha) en hojas de *Casimiroa edulis* según tratamiento y mes de muestreo.

En tanto la relación clorofila a/b según la Figura 8 mostró variaciones entre tratamientos, con valores generalmente superiores en T3 y T4, lo que indica

cambios en la proporción relativa entre clorofila a y clorofila b. En conjunto, estos resultados muestran que los tratamientos asociados con hojas maduras presentaron mayor acumulación de pigmentos fotosintéticos y accesorios, mientras que las hojas jóvenes, especialmente en T1, mantuvieron los valores más bajos.



Nota: Las barras representan la media $\pm$ error estándar. Los puntos indican las repeticiones individuales. Letras diferentes sobre las barras indican diferencias significativas entre tratamientos dentro de cada mes, de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). PF = peso fresco. T1 = hojas jóvenes expuestas al sol; T2 = hojas jóvenes sombreadas; T3 = hojas maduras expuestas al sol; T4 = hojas maduras sombreadas. En octubre no se incluyó el tratamiento T2 en el análisis.

Figura 8. Contenido foliar de carotenoides en hojas de *Casimiroa edulis* según tratamiento y mes de muestreo.

La variación observada en los pigmentos sugiere que la edad foliar tuvo un papel importante en la acumulación de clorofilas y carotenos, ya que los tratamientos con hojas maduras (T3 y T4) presentaron los valores más altos de clorofila total y carotenoides, este patrón indica que las hojas maduras pudieron tener un aparato fotosintético más desarrollado en comparación con las hojas jóvenes, lo

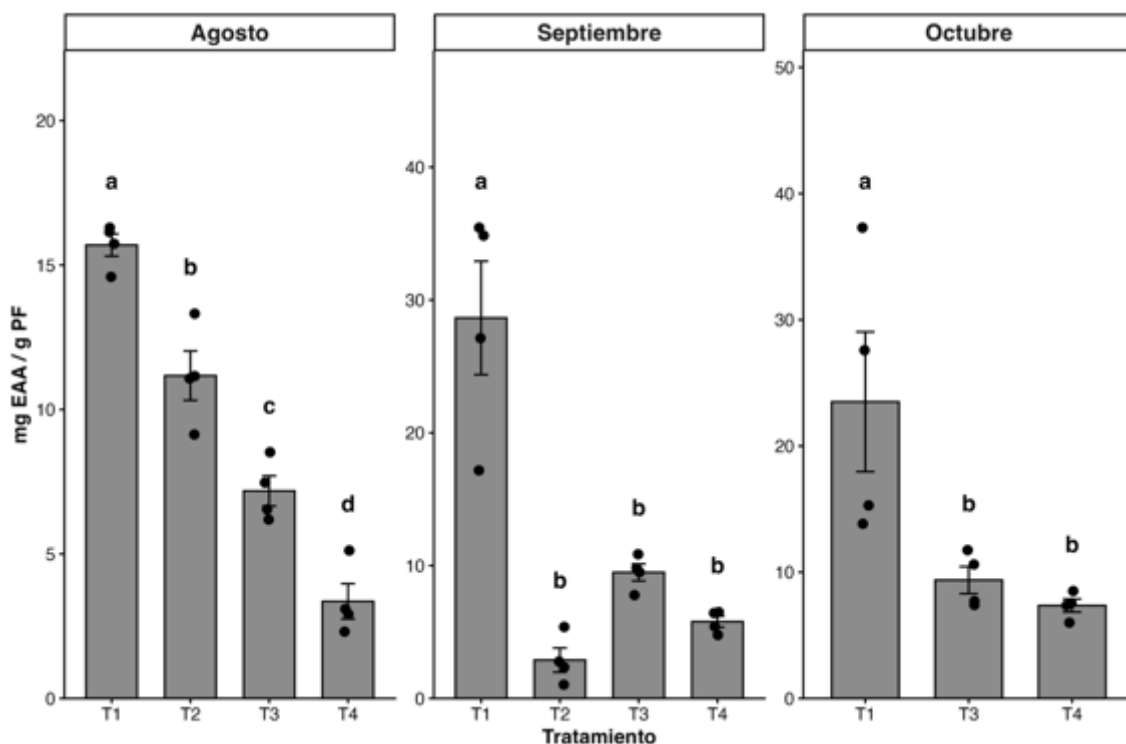
cual se reflejó en una mayor acumulación de pigmentos fotosintéticos. Sin embargo, también se observaron diferencias asociadas con la exposición lumínica. En las hojas jóvenes, el tratamiento bajo sombra (T2) tendió a presentar mayores contenidos de clorofila total que el tratamiento expuesto al sol (T1), especialmente en agosto y septiembre, lo que coincide con lo reportado por Gonçalves et al. (2001) quienes señalaron que las hojas desarrolladas bajo sombra pueden incrementar la concentración de clorofila a, clorofila b y clorofila total como una estrategia para aumentar la captación de luz en ambientes de baja disponibilidad lumínica. Estos autores también explican que, bajo alta irradiancia, la clorofila puede degradarse por fotooxidación a una velocidad mayor que su síntesis, lo que puede reducir su concentración en hojas expuestas al sol.

En tanto la relación clorofila a/b permitió observar cambios en la proporción relativa entre ambos pigmentos. En general, los tratamientos con hojas maduras presentaron relaciones a/b más altas, principalmente T3, lo que sugiere una mayor proporción relativa de clorofila a respecto a clorofila b. En septiembre, la relación a/b fue menor en T4 que en T3, lo cual puede interpretarse como una respuesta parcial de aclimatación a la sombra, ya que el incremento relativo de clorofila b permite ampliar la captación de luz en longitudes de onda aprovechables por los complejos antena. Esta respuesta ha sido descrita en hojas bajo sombra, donde la relación clorofila a/b suele disminuir debido a una mayor inversión relativa en clorofila b (Gonçalves et al., 2001). No obstante, en el presente estudio esta tendencia no fue uniforme en todos los meses ni en ambas edades foliares, por lo que la relación a/b parece estar influida no sólo por la exposición solar, sino también por el estado de desarrollo de la hoja y el mes de muestreo. Lichtenthaler (2021) también señaló que las hojas bajo sol suelen presentar valores más altos de la relación clorofila a/b que las hojas de sombra, lo que apoya la interpretación de que esta relación responde a cambios en la aclimatación lumínica.

Por último, en el caso de los carotenoides los mayores valores se registraron principalmente en hojas maduras, con una tendencia a valores superiores en T3 respecto a T4, especialmente en septiembre. Esto sugiere que las hojas maduras expuestas al sol pudieron incrementar la acumulación de carotenoides como parte de una respuesta fotoprotectora frente a la alta radiación (Demmig-Adams, 1996). Asimismo, Gonçalves et al. (2001) observaron que en *Swietenia macrophylla* los carotenoides fueron mayores en hojas de sol, lo que fue interpretado como un mecanismo de protección frente a alta irradiancia; sin embargo, en *Dipteryx odorata* la respuesta fue diferente, indicando que la acumulación de carotenoides puede depender de la especie y de otros mecanismos de aclimatación. En este sentido, los resultados de *Casimiroa edulis* sugieren que la acumulación de pigmentos estuvo determinada por la interacción entre edad foliar, exposición solar y mes de evaluación, más que por un solo factor aislado.

3.3.5. Capacidad antioxidante

Como se observa en la Figura 9, la capacidad antioxidante (CaT) presentó diferencias entre tratamientos y meses de muestreo. En agosto se observó una separación clara entre los cuatro tratamientos, con el siguiente orden: $T1 > T2 > T3 > T4$. Esto indica que, en este mes, las hojas jóvenes presentaron mayor capacidad antioxidante que las hojas maduras, y que dentro de cada edad foliar los tratamientos expuestos al sol mostraron valores superiores a los tratamientos bajo sombra. En septiembre, T1 mantuvo el valor más alto y se diferenció significativamente de T2, T3 y T4, los cuales no presentaron diferencias estadísticas entre sí. En octubre, aún cuando T2 no fue incluido en el análisis, T1 nuevamente mostró la mayor capacidad antioxidante, mientras que T3 y T4 presentaron valores significativamente menores y similares entre sí. En conjunto, los resultados muestran una tendencia consistente hacia una mayor capacidad antioxidante en hojas jóvenes expuestas al sol; sin embargo, la magnitud de las diferencias cambió entre meses, lo cual concuerda con la interacción significativa Mes $\times$ Edad $\times$ Exposición solar reportada para esta variable ($p = 0.0065$).



Nota: Las barras representan la media $\pm$ error estándar. Los puntos indican las repeticiones individuales. Letras diferentes sobre las barras indican diferencias significativas entre tratamientos dentro de cada mes, de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). EQ = equivalentes de Ácido Ascórbico; PF = peso fresco. T1 = hojas jóvenes expuestas al sol; T2 = hojas jóvenes sombreadas; T3 = hojas maduras expuestas al sol; T4 = hojas maduras sombreadas. En octubre no se incluye T2 debido a la exclusión de ese tratamiento en el análisis.

Figura 9. Capacidad antioxidante total en hojas de *Casimiroa edulis* según tratamiento y mes de muestreo.

La mayor capacidad antioxidante observada en T1 sugiere que las hojas jóvenes con exposición directa al sol presentaron una mayor respuesta antioxidante frente a la radiación directa, lo cual puede explicarse porque las hojas jóvenes aún se encuentran en desarrollo y pueden ser más susceptibles al desequilibrio entre la captura de energía luminosa y su uso fotosintético, lo que favorece la acumulación de compuestos con función fotoprotectora. Zhang et al. (2018) evaluaron hojas jóvenes y maduras bajo condiciones contrastantes de luz y reportaron que la capacidad antioxidante total se correlacionó positivamente con flavonoides y fenoles totales; además, señalaron que en hojas jóvenes puede incrementarse la biosíntesis de compuestos fenólicos como respuesta al desequilibrio entre el suministro y la demanda de electrones fotosintéticos. De

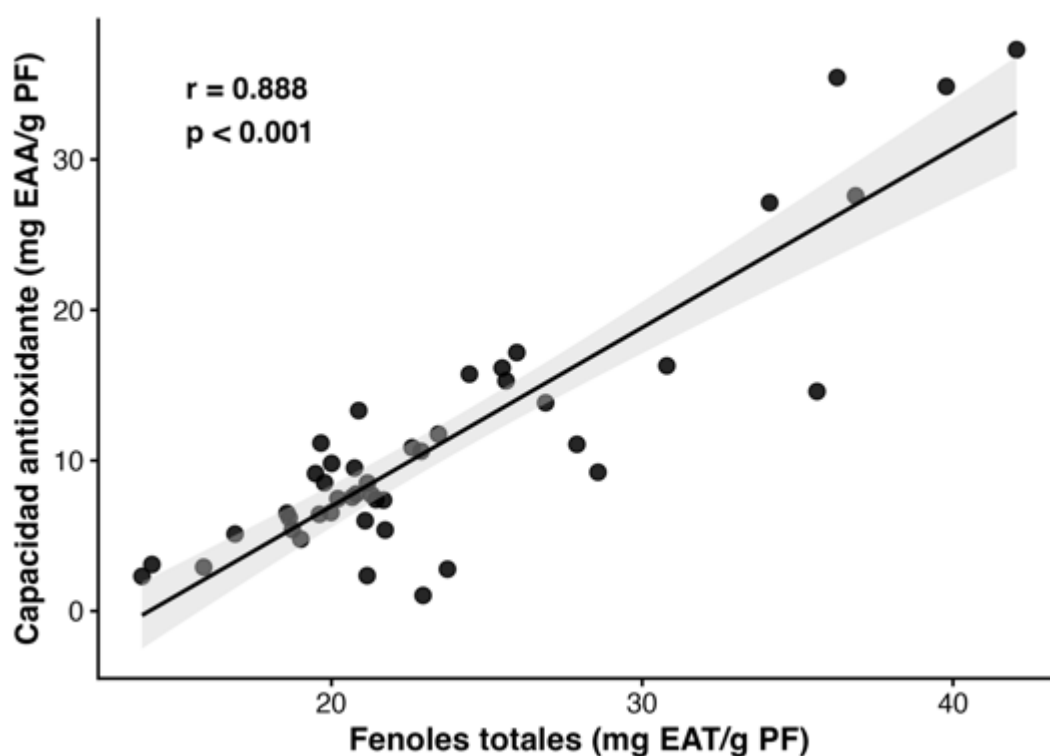
forma similar, Ghasemzadeh et al. (2010) indicaron que la intensidad lumínica puede incrementar componentes medicinales y actividades antioxidantes en hojas y rizomas jóvenes de *Zingiber officinale*, lo que respalda la relación entre luz y acumulación de metabolitos antioxidantes. Estas interpretaciones son consistentes con Zagoskina et al. (2023), quienes señalaron que los polifenoles participan en la respuesta antioxidante de las plantas y que su biosíntesis puede variar en función de factores ambientales y fisiológicos, como el estrés abiótico, el estado de desarrollo y el tipo de tejido vegetal.

En este contexto, el análisis de correlación complementario mostró una asociación positiva fuerte entre fenoles totales y capacidad antioxidante ($r = 0.90$; $p < 0.05$; Figura 10), lo que sugiere que estos compuestos pudieron contribuir de manera importante a la actividad antioxidante observada en los extractos foliares. Aunque los flavonoides y la vitamina C también son metabolitos con actividad antioxidante, en este estudio sólo mostraron una tendencia positiva con la capacidad antioxidante, sin alcanzar significancia estadística. No obstante, esta interpretación debe considerarse con cautela, ya que la correlación no implica causalidad y los datos integran diferentes meses, edades foliares y condiciones de exposición solar. Además, la capacidad antioxidante no debe atribuirse únicamente a un solo grupo de metabolitos, sino a la acción conjunta de distintos compuestos antioxidantes, incluyendo fenoles, flavonoides, vitamina C y carotenoides.

Por otra parte, la matriz de correlación mostró asociaciones negativas entre la capacidad antioxidante y la clorofila total, así como entre la capacidad antioxidante y los carotenos (Anexo 1). Esto no indica que dichos pigmentos reduzcan la capacidad antioxidante, sino que, en este estudio, los tratamientos con mayor acumulación de pigmentos fotosintéticos correspondieron principalmente a hojas maduras (T3 y T4), mientras que la mayor respuesta antioxidante se observó en hojas jóvenes expuestas al sol (T1). Por tanto, la mayor capacidad antioxidante observada en T1 podría reflejar principalmente la acumulación de metabolitos fenólicos y otros compuestos antioxidantes capaces

de neutralizar especies reactivas de oxígeno o reducir el daño oxidativo asociado con la radiación solar.

Finalmente, debido a que las diferencias entre tratamientos no fueron idénticas en todos los meses, la respuesta antioxidante en *C. edulis* no puede atribuirse únicamente a la exposición solar ni a la edad de las hojas de manera aislada, sino más bien, los resultados indican que la capacidad antioxidante dependió de la combinación entre edad foliar, exposición solar y mes de muestreo, con una respuesta particularmente alta en hojas jóvenes expuestas al sol.



Nota: Los puntos corresponden a datos individuales; la línea representa la tendencia lineal y el área gris el intervalo de confianza al 95 %. Se muestra el coeficiente de correlación de Pearson (r) y su valor de significancia (p).

Figura 10. Correlación entre fenoles totales y capacidad antioxidante.

3.4. Conclusiones

Los resultados obtenidos permiten concluir que la edad foliar, la exposición solar y el mes de muestreo influyeron en el contenido de metabolitos y en la capacidad antioxidante de hojas de *Casimiroa edulis*. Sin embargo, la respuesta no fue

uniforme para todas las variables evaluadas, por lo que el comportamiento metabólico de la especie no puede atribuirse únicamente a un solo factor, sino a la combinación entre el estado de desarrollo de la hoja, la condición de luz y el momento de recolección.

Las hojas jóvenes expuestas directamente al sol presentaron una mayor acumulación de fenoles totales durante los meses evaluados, así como una mayor capacidad antioxidante. Esto sugiere que este tipo de hoja presentó una respuesta metabólica más marcada frente a la exposición solar, posiblemente asociada con la acumulación de compuestos fenólicos con función protectora. Además, la correlación positiva observada entre fenoles totales y capacidad antioxidante indica que estos compuestos pudieron contribuir de manera importante a la actividad antioxidante de los extractos foliares.

El contenido de flavonoides y vitamina C mostró una respuesta más variable entre tratamientos y meses de muestreo. En el caso de los flavonoides, su acumulación no dependió exclusivamente de la exposición solar ni de la edad foliar, mientras que la vitamina C presentó cambios asociados con la interacción entre edad, exposición solar y mes. Estos resultados indican que ambos metabolitos responden de manera dinámica a las condiciones fisiológicas y ambientales del tejido foliar.

En relación con los pigmentos fotosintéticos, las hojas maduras presentaron mayores contenidos de clorofilas y carotenoides, lo que sugiere una mayor acumulación de pigmentos asociada con el desarrollo foliar. No obstante, estos pigmentos no mostraron una relación positiva directa con la capacidad antioxidante medida, por lo que su importancia en este estudio se interpreta principalmente desde su papel fisiológico en la fotosíntesis y fotoprotección.

La hipótesis planteada se acepta parcialmente. Si bien la exposición solar favoreció la acumulación de algunos metabolitos y la capacidad antioxidante, los

valores más altos de fenoles totales y capacidad antioxidante se observaron principalmente en hojas jóvenes expuestas al sol, y no en hojas maduras como se esperaba inicialmente. Por tanto, los resultados evidencian que la acumulación de metabolitos en *Casimiroa edulis* depende de una interacción compleja entre edad foliar, exposición solar y mes de muestreo.

Finalmente, este trabajo aporta información sobre la variación metabólica foliar de *Casimiroa edulis* y contribuye a establecer criterios más precisos para la selección de material vegetal en estudios fitoquímicos posteriores.

Para futuras investigaciones se sugiere ampliar el número de individuos evaluados, con el fin de considerar la variabilidad entre árboles y fortalecer la interpretación de los resultados. Asimismo, se sugiere planear los meses de muestreo considerando la disponibilidad estacional de hojas jóvenes y maduras, especialmente en condiciones de sombra, para evitar la pérdida de tratamientos y permitir comparaciones más completas entre factores. También sería conveniente complementar este tipo de estudios con la identificación individual de compuestos fenólicos y flavonoides, así como con mediciones directas de radiación o variables microambientales dentro del dosel.

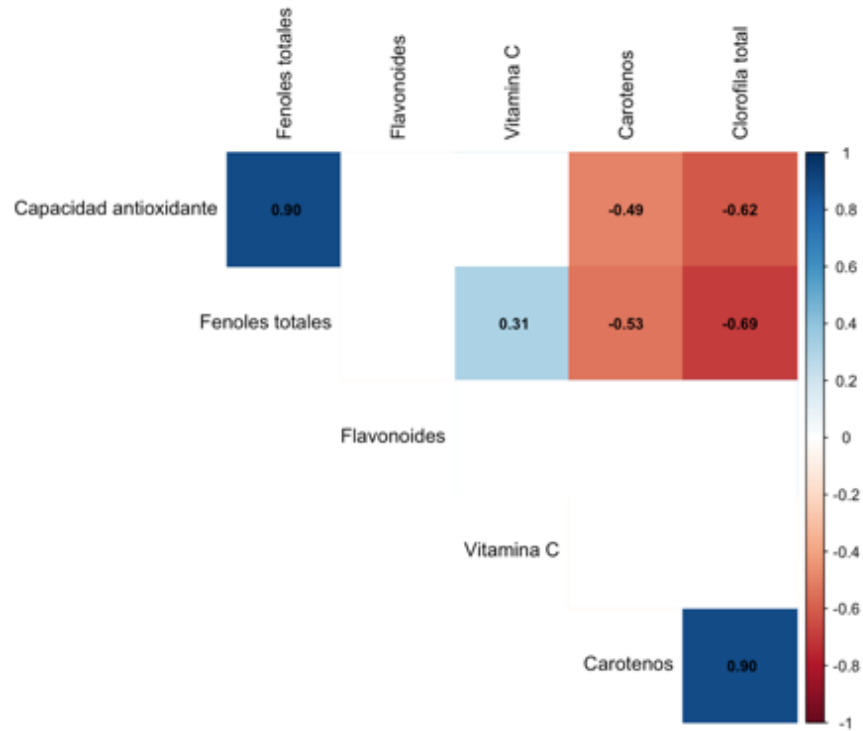
3.5. Literatura Citada

- Agati, G., Azzarello, E., Pollastri, S., & Tattini, M. (2011). The biosynthesis of flavonoids is enhanced similarly by UV radiation and root zone salinity in *Ligustrum vulgare* leaves. *Journal of Plant Physiology*, 168(3), 204–212. [https://doi:10.1016/j.jplph.2010.07.016](https://doi.org/10.1016/j.jplph.2010.07.016).
- Awaad, A. S., Al-Jaber, N. A., Soliman, G. A., Al-Outhman, M. R., Zain, M. E., Moses, J. E., & El-Meligy, R. M. (2012). New biological activities of *Casimiroa edulis* leaf extract and isolated compounds. *Phytotherapy Research*, 26(3), 452–457. <https://doi.org/10.1002/ptr.3690>
- Bernal, M., Llorens, L., Julkunen-Tiitto, R., Badosa, J., & Verdaguer, D. (2013). Altitudinal and seasonal changes of phenolic compounds in *Buxus sempervirens* leaves and cuticles. *Plant Physiology and Biochemistry*, 70, 471–482. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2013.06.012>
- Csepregi, K., Coffey, A., Cunningham, N., Prinsen, E., Hideg, É., & Jansen, M. A. K. (2017). Developmental age and UV-B exposure co-determine antioxidant capacity and flavonol accumulation in *Arabidopsis* leaves. *Environmental and Experimental Botany*, 140, 19–25. <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.envexpbot.2017.05.009>
- Del Valle, J. C., Buide, M. L., Casimiro-Soriguer, I., Whittall, J. B., & Narbona, E. (2020). UV radiation increases phenolic compound protection but decreases reproduction in *Silene littorea*. *PLOS ONE*, 15(6), Article e0231611.. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0231611>
- Demmig-Adams, B., & Adams, W. W. III. (1996). The role of xanthophyll cycle carotenoids in the protection of photosynthesis. *Trends in Plant Science*, 1(1), 21–26. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(96\)80019-7](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(96)80019-7)
- Foyer, C. H. y Noctor, G. (2011). Ascorbate and glutathione: the heart or the redox hub. *Plant Physiology*, 155(1), 2–18. <https://doi.org/10.1104/pp.110.167569>
- Gamal, M., Othman, S., Sabry, M. M., Hussein, M. A., & El Gizawy, H. A. (2026). Polyphenol profile of *Casimiroa edulis* Llave and evaluation of its hepatoprotective potential. *Current Bioactive Compounds*, 22(3), Article e15734072368019. <https://doi.org/10.2174/0115734072368019250220042134>
- Ghasemzadeh, A., Jaafar, H. Z. E., Rahmat, A., Wahab, P. E. M., & Halim, M. R. A. (2010). Effect of different light intensities on total phenolics and flavonoids synthesis and anti-oxidant activities in young ginger varieties (*Zingiber officinale* Roscoe). *International Journal of Molecular Sciences*, 11(10), 3885–3897. <https://doi.org/10.3390/ijms11103885>
- Gobbo-Neto, L., & P-Lopes, N. (2006). Plantas medicinais: factores de influência no conteúdo de metabólitos secundários. *Química Nova*, 30(2), 374-381.

- Gonçalves, J. F. C., Marenco, R. A., & Vieira, G. (2001). Concentration of photosynthetic pigments and chlorophyll fluorescence of mahogany and tonka bean under two light environments. *Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal*, 13(2), 149–157.
- Haba, M., Abe, N., Kamiya, T., Mizuno, N., Okubo, S., Yamaura, T., Hara, H., & Oyama, M. (2022). Dos nuevas flavonas metoxiladas aisladas de *Casimiroa edulis* La Llave y su actividad inhibidora de MMP-9. *Natural Product Research*, 36(23), 5959–5966. <https://doi.org/10.1080/14786419.2022.2048300>
- Hartikainen, S. M., Jach, A., Grané, A., & Robson, T. M. (2020). Seasonal patterns in spectral irradiance and leaf UV-A absorbance under forest canopies. *Frontiers in Plant Science*, 10, Article 1762. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01762>
- Jagota, S. K., & Dani, H. M. (1982). A new colorimetric technique for the estimation of vitamin C using Folin phenol reagent. *Analytical Biochemistry*, 127(1), 178–182. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(82\)90162-2](https://doi.org/10.1016/0003-2697(82)90162-2)
- Kang, S., Zhang, Y., Zhang, Y., Zou, J., Yang, Q., Li, T., & Zhang, Y. (2022). Mild-intensity UV-A radiation applied over a long duration can improve the growth and phenolic contents of sweet basil. *Frontiers in Plant Science*, 13, Article 858433. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.858433>
- Kappel, S., Frieboes, M. G., Yokoyama, R., Kappel, C., Tóth, S. Z., Fernie, A. R., Jahns, P., Smirnov, N., Aarabi, F., & Armbruster, U. (2025). Efectos ambientales y de desarrollo sobre la acumulación y funciones de ascorbato foliar dependiente de VTC2. *Journal of Experimental Botany*, 76(13), 3823–3833. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraf035>
- Khaleel, A. E. S. (2002). Chemical constituents of *Casimiroa edulis* leaves. *Monatshefte für Chemie*, 133, 183–187. <https://doi.org/10.1007/s706-002-8248-4>
- Lichtenthaler, H. K., & Babani, F. (2022). Contents of photosynthetic pigments and ratios of chlorophyll a/b and chlorophylls to carotenoids (a+b)/(x+c) in C4 plants as compared to C3 plants. *Photosynthetica*, 60(1), 3–9.
- Li, H., Huang, W., Wang, G. L., Wang, W. L., Cui, X., & Zhuang, J. (2017). Transcriptomic analysis of the biosynthesis, recycling, and distribution of ascorbic acid during leaf development in tea plant (*Camellia sinensis* L.) O. Kuntze). *Scientific Reports*, 7, Article 46212. <https://doi.org/10.1038/srep46212>
- Ma, D., Guo, Y., Ali, I., Lin, J., Xu, Y., & Yang, M. (2024). Characteristics of plant flavonoid accumulation and effects of cultivation measures on their biosynthesis: A review. *Plant Physiology and Biochemistry*, 215, Article 108960. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.108960>
- Paciolla, C., Fortunato, S., Dipierro, N., Paradiso, A., De Leonardis, S., Mastropasqua, L., & de Pinto, M. C. (2019). Vitamin C in plants: From functions to biofortification. *Antioxidants*, 8(11), Article 519. <https://doi.org/10.3390/antiox8110519>

- Pérez-Gálvez, A., Viera, I., & Roca, M. (2020). Caroteins and chlorophylls as antioxidants. *Antioxidants*, 9(6), Article 505. <https://doi.org/10.3390/antiox9060505>
- Romero, M. L., Escobar, L.I., Lozoya, X. y Enríquez, R. G. (1983). High-performance liquid chromatographic study of *Casimiroa edulis*. *Journal of Chromatography*, 281(1983), 245-251. [https://doi:10.1016/S0021-9673\(01\)87882-1](https://doi:10.1016/S0021-9673(01)87882-1)
- Valares-Masa, C., Sosa Díaz, T., Alías Gallego, J. C., & Chaves Lobón, N. (2016). Quantitative variation of flavonoids and diterpenes in leaves and stems of *Cistus ladanifer* L. at different ages. *Molecules*, 21(3), 275. <https://doi.org/10.3390/molecules21030275>
- Vidal-López, D. G., Schlie-Guzmán, M. A., González-Esquinca, A. R. y Luna-Cazares, L. M. (2008). El zapote blanco (*Casimiroa edulis* La Llave et Lex, Rutaceae): un recurso medicinal de México. <https://hdl.handle.net/20.500.12753/1779>
- Waterman, P. G., & Mole, S. (1994). *Analysis of phenolic plant metabolites*. Blackwell Scientific Publications.
- Wu, W., Wu, H., Liang, R., Huang, S., Meng, L., Zhang, M., Xie, F., & Zhu, H. (2025). Light regulates the synthesis and accumulation of plant secondary metabolites. *Frontiers in Plant Sciences*, 16, Article 1644472. <https://doi:10.3389/fpls.2025.1644472>.
- Xiao, M., Li, Z., Zhu, L., Wang, J., Zhang, B., Zheng, F., Zhao, B., Zhang, H., Wang, Y., & Zhang, Z. (2021). The multiple roles of ascorbate in the abiotic stress response of plants: antioxidant, cofactor, and regulator. *Frontiers in Plant Science*, 12, 598173. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.598173>
- Yabuta, Y., Mieda, T., Rapolu, M., Nakamura, A., Motoki, T., Maruta, T., Yoshimura, K., Ishikawa, T., & Shigeoka, S. (2007). Light regulation of ascorbate biosynthesis is dependent on the photosynthetic electron transport chain but independent of sugars in *Arabidopsis*. *Journal of Experimental Botany*, 58(10), 2661–2671. <https://doi.org/10.1093/jxb/erm124>
- Zagoskina, N. V., Zubova, M. Y., Nechaeva, T.L., Kazantseva, V. V., Goncharuk, E. A., Katanskaya, V. M., Baranova, E. N., & Aksenova, M. A. (2023). Polyphenols in plants: structure, biosynthesis, abiotic stress regulation, and practical applications (Review). *International Journal of Molecular Sciences*, 24(18), Article 13874. <https://doi.org/10.3390/ijms241813874>
- Zhang, T.-J., Zheng, J., Yu, Z.-C., Huang, X.-D., Zhang, Q.-L., Tian, X.-S., & Peng, C.-L. (2018). Functional characteristics of phenolic compounds accumulated in young leaves of two subtropical forest tree species of different successional stages. *Tree Physiology*, 38(10), 1486–1501. <https://doi:10.1093/treephys/tpy030>

ANEXO 1. Matriz de correlación de Pearson entre capacidad antioxidante y metabolitos foliares



Nota: Los valores indican el coeficiente de correlación de Pearson (r). Los colores azules representan correlaciones positivas y los rojos correlaciones negativas. Sólo se muestran correlaciones significativas ($p < 0.05$) por tanto los espacios en blanco son correlaciones no significativas.