



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE ENSEÑANZA, INVESTIGACIÓN Y
SERVICIO EN SUELOS

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA EL
DESARROLLO SOSTENIBLE

IMPACTO DEL APROVECHAMIENTO EN LA PRODUCCIÓN Y FISIOLOGÍA DE *Bursera bipinnata* PARA SU MANEJO SOSTENIBLE

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA EL
DESARROLLO SOSTENIBLE**

Presenta:

FREDY MARTÍNEZ GALVÁN

Bajo la supervisión de:

JULIO CÉSAR BUENDÍA ESPINOZA, DR.



APROBADA



Chapingo, Estado de México, marzo 2025

**IMPACTO DEL APROVECHAMIENTO EN LA PRODUCCIÓN Y FISIOLOGÍA
DE *Bursera bipinnata* PARA SU MANEJO SOSTENIBLE**

Tesis realizada por el C. FREDY MARTÍNEZ GALVÁN bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA EL DESARROLLO
SOSTENIBLE**

DIRECTOR: 
DR. JULIO CÉSAR BUENDÍA ESPINOZA

ASESOR: 
MC. ROSA MARÍA GARCÍA NÚÑEZ

ASESOR: 
MC. ELISA DEL CARMEN MARTÍNEZ OCHOA

CONTENIDO

LISTA DE CUADROS	vi
LISTA DE FIGURAS	viii
DEDICATORIA.....	ix
AGRADECIMIENTOS.....	x
DATOS BIOGRÁFICOS	xi
RESUMEN GENERAL.....	xii
GENERAL ABSTRACT	xiii
1 INTRODUCCIÓN GENERAL.....	14
2 OBJETIVOS.....	16
2.1 Objetivo general	16
2.2 Objetivos específicos	16
3 REVISIÓN DE LITERATURA.....	17
3.1 <i>Bursera bipinnata</i> (Moc. & Sessé ex DC) Engl.....	17
3.1.1 Descripción taxonómica.....	17
3.1.2 Distribución y hábitat.....	18
3.2 El Copal.....	19
3.2.1 Definición y composición	19
3.3 Canales resiníferos	19
3.4 Extracción del copal	20
3.4.1 Importancia socio económica	20
3.4.2 El impacto de la extracción de resina	21
3.5 Factores de estrés en entornos forestales	22
3.5.1 Definición de estrés	22
3.5.2 Estrés biótico y estrés abiótico	23
3.5.3 Percepción remota del estrés	23
3.6 Estrés por daño tisular	25
3.6.1 Señalización y respuesta	25

3.6.2 Defensa inducida y defensa constitutiva	25
3.7 Resinas vegetales como mecanismo de defensa	26
3.7.1 Definición y composición	26
3.7.2 Estructuras secretoras	26
3.8 Compuestos bioactivos especializados	27
3.8.1 Compuestos fenólicos y terpenoides	28
3.9 Literatura citada.....	29
4 FACTORES DENDROMÉTRICOS, EDAFOCLIMÁTICOS, FISIOLÓGICOS Y DEL MÉTODO DE EXTRACCIÓN QUE INFLUYEN EN EL RENDIMIENTO DE COPAL	35
4.1 Resumen	35
4.2 Abstract	36
4.3 Introducción.....	36
4.4 Materiales y métodos	38
4.4.1 Área de estudio.....	38
4.4.2 Variable de respuesta	40
4.4.3 Variables Explicativas	40
4.4.4 Base de datos y medición de variables.....	45
4.4.5 Análisis de datos	48
4.5 Resultados	51
4.5.1 Base de datos y selección de variables	51
4.5.2 Coeficiente de correlación	53
4.5.3 Modelo de regresión lineal múltiple.....	55
4.6 Discusión.....	56
4.6.1 Coeficiente de correlación	56
4.6.2 Modelo de regresión lineal múltiple.....	61
4.7 Conclusiones.....	64
4.8 Literatura citada.....	65

5 IMPACTO FISIOLÓGICO DE LA EXTRACCIÓN DE RESINA EN <i>Bursera bipinnata</i>	74
5.1 Resumen	74
5.2 Abstract	75
5.3 Introducción	75
5.4 Materiales y métodos	78
5.4.1 Área de estudio	78
5.4.2 Variables de respuesta	79
5.4.3 Variables explicativas	80
5.4.4 Base de datos y medición de variables	84
5.4.5 Análisis de datos	86
5.5 Resultados	88
5.5.1 Base de datos y selección de variables	88
5.5.2 Coeficiente de correlación	90
5.5.3 Modelo de regresión lineal múltiple	92
5.6 Discusión	94
5.6.1 Coeficiente de correlación	94
5.6.2 Modelo de regresión lineal múltiple	97
5.7 Conclusiones	101
5.8 Literatura citada	102

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Variables explicativas para la producción de resina de copal.	40
Cuadro 2. Estadísticos descriptivos de los parámetros dendrométricos.	51
Cuadro 3. Estadísticos descriptivos de los parámetros edafoclimáticos.	51
Cuadro 5. Estadísticos descriptivos de los parámetros fisiológicos.	52
Cuadro 4. Estadísticos descriptivos del método de extracción.	52
Cuadro 6. Correlación entre los parámetros dendrométricos y el rendimiento de resina.	53
Cuadro 7. Correlación entre los parámetros edafoclimáticos y el rendimiento de resina.	54
Cuadro 9. Correlación entre los parámetros fisiológicos y el rendimiento de resina.	54
Cuadro 8. Correlación entre los parámetros productivos y el rendimiento de resina.	55
Cuadro 10. Primer modelo de regresión lineal para la producción de resina de copal.	55
Cuadro 11. Estadísticos descriptivos de los parámetros productivos.	89
Cuadro 12. Estadísticos descriptivos de los parámetros fisiológicos.	89
Cuadro 13. Correlación entre los parámetros productivos y el NDMI en agosto.	90
Cuadro 14. Correlación entre los parámetros productivos y el NDMI en octubre.	90
Cuadro 15. Correlación entre los parámetros productivos y el GCI en agosto.	91
Cuadro 16. Correlación entre los parámetros productivos y el GCI en octubre.	91
Cuadro 17. Modelo sobre los efectos de los parámetros productivos sobre NDMI en octubre.	92

Cuadro 18. Modelo sobre los efectos de los parámetros productivos sobre GCI en agosto.	93
Cuadro 19. Modelo sobre los efectos de los parámetros productivos sobre GCI en octubre.	93

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización del sitio experimental en la microcuenca Los Sauces, Morelos, México.....	40
Figura 2. Esquema de las variables explicativas tomadas al árbol de <i>Bursera bipinnata</i> ..	41
Figura 3. Localización de las 70 unidades de muestreo (árboles de copal) en el sitio experimental, dentro del área de estudio microcuenca Los Sauces, Estado de Morelos, México.....	46
Figura 4. Localización del sitio experimental en la microcuenca Los Sauces..	79
Figura 5. Esquema de las variables explicativas y la variable de respuesta tomadas al árbol de <i>Bursera bipinnata</i> ..	84
Figura 6. Localización de las 70 unidades de muestreo (árboles de copal) en el sitio experimental, dentro del área de estudio microcuenca Los Sauces, Estado de Morelos.	85

DEDICATORIA

A Otilia Galván Cruz y Manuel Martínez Cosme, mis queridos padres, por su cariño, apoyo, dedicación, consejos, sacrificios y por ser el pilar fundamental de mis logros.

A mi gran hermano Jael Martínez Galván, por su cariño, apoyo, confianza y por ser un gran ejemplo de lucha y perseverancia.

A nosotros, los Mixes, que habitamos la tierra de los jamás conquistados, bajo el cobijo de nuestro padre el sol y nuestra madre la luna.

A todas las personas que viven, trabajan y luchan por el campo de México y que contribuyen a hacer de este país un lugar mejor.

Con cariño, respeto y admiración

AGRADECIMIENTOS

A la **Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación** (Secihti) por el apoyo brindado durante mi formación en el programa de maestría.

A la **Universidad Autónoma Chapingo** (UACH), mi Alma Mater.

A la **Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible** por las facilidades otorgadas para mi formación profesional y académica.

A mis asesores: Al Dr. **Julio César Buendía Espinoza**, a la Dra. **Elisa del Carmen Martínez Ochoa**, a la MC. **Selene del Carmen Arrazate Jiménez** y a la Dra. **Rosa María García Núñez**.

A la familia de Don **Joaquín** y Don **Margarito**, por el entusiasmo, interés y apoyo brindado en este proyecto de investigación.

DATOS BIOGRÁFICOS

Datos personales

Nombre: Fredy Martínez Galván.

Fecha de nacimiento: 20 de octubre de 1994.

Lugar de nacimiento: Oaxaca de Juárez, Oaxaca.

No. Cartilla militar: D – 3577989.

CURP: MAGF941020HOCRLR02.

Profesión: Ingeniero en Agroecología.

Cédula profesional: 12489145.



Desarrollo académico

Bachillerato: Instituto de Estudio de Bachillerato del Estado de Oaxaca No. 158 Villa Hidalgo Yalalag. Villa Hidalgo Yalalag, Villa Alta Oaxaca.

Licenciatura: Ingeniería en Agroecología. Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México.

Posgrado: Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México.

¹RESUMEN GENERAL

Impacto del aprovechamiento en la producción y fisiología de *Bursera bipinnata* para su manejo sostenible

El copal chino (*Bursera bipinnata*) es un árbol de alta relevancia socioeconómica y cultural en México debido a la extracción de su resina, un producto forestal no maderable. No obstante, su sobreexplotación ha reducido significativamente sus poblaciones naturales. Esta investigación se realizó con el objetivo de identificar los factores que influyen en el rendimiento de resina y en el estrés fisiológico de los árboles de copal durante su extracción. El experimento se realizó en la microcuenca Los Sauces, Morelos, México, donde se seleccionaron aleatoriamente 70 árboles. Para analizar el rendimiento, las variables explicativas incluyeron características dendrométricas, edafoclimáticas, fisiológicas y del método de extracción, mientras que la variable de respuesta fue el rendimiento de resina. Para evaluar el impacto fisiológico, las variables explicativas fueron las del método de extracción, mientras que las variables fisiológicas Índice de Humedad de Diferencia Normalizada (NDMI) e Índice de Clorofila Verde (GCI) se analizaron como variables de respuesta en los meses de agosto y octubre. Los datos fueron analizados mediante correlación y regresión lineal múltiple. Los resultados mostraron que el rendimiento de resina se correlaciona positivamente con variables dendrométricas como el diámetro de fuste, diámetro de copa y volumen de copa. El área total de resinación, la longitud de incisión y el NDMI en octubre fueron identificados como los factores más importantes para el rendimiento. Sin embargo, se observó una correlación negativa entre el rendimiento de resina y el NDMI en octubre. La profundidad de incisión se correlacionó negativamente con el GCI en agosto y octubre, indicando un impacto adverso en el estado fisiológico de los árboles. Para favorecer el rendimiento es necesario integrar factores dendrométricos, edafoclimáticos, fisiológicos y del método de extracción de resina en las estrategias de manejo. También se debe limitar la intensidad y profundidad de las incisiones, sobre todo bajo condiciones restrictivas.

Palabras clave: resina, producto forestal no maderable, rendimiento, estrés fisiológico, aprovechamiento sostenible.

¹ Tesis de Maestría en Ciencias, Programa de Maestría en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible, Universidad Autónoma Chapingo
Autor: Fredy Martínez Galván
Director de Tesis: Dr. Julio César Buendía Espinoza

²GENERAL ABSTRACT

Impact of harvesting on the production and physiology of *Bursera bipinnata* for its sustainable management

The copal chino tree (*Bursera bipinnata*) is a species of high socioeconomic and cultural importance in Mexico due to the extraction of its resin, a non-timber forest product. However, overexploitation has significantly reduced its natural populations. This study was conducted to identify the factors influencing resin yield and the physiological stress of copal trees during resin extraction. The experiment was carried out in the Los Sauces micro-watershed, Morelos, Mexico, where 70 trees were randomly selected. To analyze yield, explanatory variables included dendrometric, edaphoclimatic, physiological, and resin extraction method characteristics, while the response variable was resin yield. To assess physiological impact, the explanatory variables were related to the extraction method, while the physiological variables Normalized Difference Moisture Index (NDMI) and Green Chlorophyll Index (GCI) were analyzed as response variables in August and October. Data was analyzed using correlation and multiple linear regression. The results showed that resin yield is positively correlated with dendrometric variables such as stem diameter, crown diameter, and crown volume. The total resin extraction area, incision length, and NDMI in October were identified as the most important factors for yield. However, a negative correlation was observed between resin yield and NDMI in October. Incision depth was negatively correlated with GCI in August and October, indicating an adverse impact on the physiological state of the trees. To enhance yield, it is necessary to integrate dendrometric, edaphoclimatic, physiological, and resin extraction method factors into management strategies. Additionally, the intensity and depth of incisions should be limited, especially under restrictive conditions.

Keywords: resin, non-timber forest product, yield, physiological stress, sustainable harvesting.

² Thesis, Universidad Autónoma Chapingo
Author: Fredy Martínez Galván
Advisor: Dr. Julio César Buendía Espinoza

1 INTRODUCCIÓN GENERAL

Las selvas secas estacionales son comunidades dominadas por árboles de porte bajo con dosel más o menos continuo, que se desarrollan en sitios de lluvia con gran estacionalidad, menor a los 1600 mm al año, concentrada en pocos meses (Trejo, 2010). Se trata de uno de los ecosistemas más representativos de México (Dirzo & Ceballos, 2010). Estos biomas tropicales han tenido una estrecha asociación con comunidades humanas, lo que ha dado lugar a paisajes dominados por un mosaico de biomas tropicales secos secundarios en diferentes etapas de sucesión (Mesa-Sierra, 2022). En los cuales las especies más utilizadas son las de mayor importancia ecológica, de manera que dicha relación se ve afectada por el proceso cultural cambiante que ocurre en las comunidades rurales de México (Maldonado et al., 2013).

Entre los diferentes satisfactores que se obtienen de los bosques tropicales secos, destacan los Productos Forestales No Maderables (NTFPs). Esta categoría refiere a cualquier parte de especies vegetales o animales que proceden de los bosques (Wong et al., 2001). Los cuales son indispensables para el desarrollo de las comunidades rurales que habitan en o cerca de los bosques, al aprovecharse constantemente sus recursos (Jiménez-González et al., 2017). La resina es un producto forestal no maderable que se obtiene de diversas especies vegetales. Estas resinas son una mezcla heterogénea de ácidos resínicos ($C_{20}H_{30}O_2$) ácidos grasos, ésteres de estos ácidos, esteroides, alcoholes, ceras y resinas (Pallardy, 2008).

Entre las resinas presentes en el mercado, destacan las del género *Bursera*, especialmente *Bursera copallifera* y *Bursera bipinnata*, siendo este último el de mayor aprovechamiento. Esta resina se obtiene cuando a los árboles se le hacen incisiones (daño tisular) en el fuste o ramas, mediante una herramienta punzocortante. La resina, al ser un mecanismo de defensa constitutivo e inducido brota por la incisión y posteriormente se seca (Purata-Velarde y León-Martínez, 2008).

El copal ha sido utilizado desde la antigüedad por diversas culturas para la elaboración de diversos productos como barnices, repelentes, medicina, entre otros (Rüdiger et al., 2007). Además de su importancia cultural, destaca por sus aplicaciones potenciales, debido a que se han reportado 16 actividades biológicas, 104 metabolitos secundarios de los cuales, 5 son ácidos grasos, 60 terpenos y 29 compuestos fenólicos (Bustamante-Villalobos, 2022). La demanda de este producto presenta un constante aumento, tanto para abastecer al mercado nacional e internacional, ello ha generado un incremento en el precio, beneficiando a los copaleros y sus familias, por otro lado, ha promovido la sobre explotación de este recurso. De tal manera que, cuando se pica el árbol con demasiada frecuencia e intensidad producirá más resina, sin embargo, esto implica el uso de energía y nutrientes que debería asignar al crecimiento, reproducción y recuperación (Purata-Velarde y León-Martínez, 2008). Aunado a lo anterior, el conocimiento respecto a los factores que intervienen en el rendimiento, así como el impacto fisiológico de la extracción continua son extremadamente limitados, lo cual ha restringido el desarrollo de nuevos métodos de aprovechamiento, así como su inclusión en el diseño e implementación de sistemas sostenibles, como es el caso de los sistemas Agroforestales.

Los componentes de la resina se derivan de carbohidratos producidos fotosintéticamente que se descomponen para producir compuestos más simples (productos de piruvato); los compuestos terpenoides y fenólicos se sintetizan luego a través de diferentes vías metabólicas, que incluyen procesos como la metilación, la glicosilación y la hidroxilación (Dudareva et al., 2013; Langenheim, 2003; Twaij & Hasan, 2022). Por otro lado, la producción de resina debido al daño tisular y la afectación en los tejidos vasculares induce en los árboles a priorizar la defensa sobre el crecimiento, debido a la restricción de recursos, siendo ambos procesos esenciales para la supervivencia, la reproducción y la adaptación (Hout et al., 2014). De tal manera que la reducción en la actividad fotosintética y un incremento en la demanda fisiológica de protección en condiciones de estrés provocan el agotamiento de los Carbohidratos No Estructurales y es probable que se produzca la mortalidad de los árboles si la cantidad de estos compuestos

cae por debajo de ciertos umbrales específicos de cada especie (Barker-Plotkin et al, 2021; Wang et al., 2021).

Ante este panorama, esta investigación tuvo como objetivo analizar el rendimiento de resina y el impacto de su extracción en la fisiología de *Bursera bipinnata* a través de modelos explicativos para contribuir al conocimiento que permita su aprovechamiento sostenible y conservación en la selva baja caducifolia de la Sierra de Huautla, Morelos.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Analizar el rendimiento de resina y el impacto de su extracción en la fisiología de *Bursera bipinnata* a través de modelos explicativos para contribuir al conocimiento que permita su aprovechamiento sostenible y conservación en la selva baja caducifolia de la Sierra de Huautla, Morelos.

2.2 Objetivos específicos

1. Determinar las variables dendrométricas, edafoclimáticas, fisiológicas y del método de extracción que tienen mayor influencia en el rendimiento de resina de *Bursera bipinnata*, mediante análisis de correlación y regresión lineal múltiple, con el propósito de contribuir a su aprovechamiento sostenible.
2. Determinar las variables del método de extracción de resina que tienen mayor influencia en el contenido de humedad foliar y de clorofila en *Bursera bipinnata*, mediante análisis de correlación y regresión lineal múltiple, para determinar el impacto fisiológico de la extracción.

3 REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 *Bursera bipinnata* (Moc. & Sessé ex DC) Engl.

3.1.1 Descripción taxonómica

3.1.1.1 Tronco

De acuerdo con Rzedowski et al. (2004) se trata de un árbol o arbusto dioico, hasta de 8 m de alto, muy resinoso y con aroma agradable al estrujarse, posee un tronco hasta de 35 cm de diámetro, con corteza gris, por lo general lisa, no exfoliante, con ramillas laterales cortas, agudas, a menudo semejando espinas; hojas fasciculadas en los extremos de las ramillas cortas, o bien, alternas sobre ramillas vigorosas de crecimiento nuevo, precedidas en su aparición por una roseta de catafilos anchamente triangulares a lanceolados, de 2 a 4 mm de largo, moreno-rojizos, pubescentes en ambas caras, sobre todo en el ápice, precozmente caducos.

3.1.1.2 Hojas

Las hojas suelen presentar una disposición imparipinnada, con peciolo de 1.5 a 3 cm de longitud. Las láminas foliares miden entre 2 a 7 cm de largo y 1.5 a 4.5 cm de ancho, cuya forma es ovada u obovada. El raquis es alado, con hasta 1 mm de ancho a cada lado. Los peciólulos alcanzan 1 mm de largo y los foliólos varían en número, es decir, de 5 a 7, cuyas dimensiones alcanzan de 0.5 a 2.5 cm de largo y 0.4 a 1.5 de ancho. El ápice varía de agudo a redondeado y el margen presenta doble crenado-serrado, tanto regular como irregular (Medina-Lemos, 2008).

3.1.1.3 Flores

La floración de esta especie ocurre en mayo y junio y produce frutos desde junio a octubre. Sus inflorescencias se organizan en forma de panícula, con brácteas subuladas; sus pedicelos miden entre 1 a 2 cm de longitud. Las flores masculinas son tetrámeras, con sépalos triangulares y pétalos blanquecinos, amarillentos o verdosos, de forma oblanceolada con el ápice curvo. Mientras que las flores femeninas, también son tetrámeras, con los pétalos ligeramente más cortos que los sépalos, presentan un ovario bilocular y glabro, coronado por dos estigmas (Medina-Lemus, 2008; Rzedowski et al., 2004).

3.1.1.4 Frutos

Los frutos se presentan en pedúnculos de hasta 6.0 cm de largo, de 6.0 a 8.0 mm de largo, bivalvos, de 6.0 a 8.0 mm de largo, obovoides, glabros; semillas de 5 a 6 mm de largo, 3 a 4 mm de ancho, ligeramente comprimidas, casi completamente cubiertas por un pseudo aro rojo, la porción expuesta, negra (Rzedowski et al., 2004).

3.1.2 Distribución y hábitat

Bursera bipinnata es una de las especies de mayor distribución del género, se puede encontrar en: Sinaloa, Chihuahua, Durango, Zacatecas, Aguascalientes, Guanajuato, Nayarit, Jalisco, Colima, Michoacán, México, Morelos, Puebla, Veracruz, Guerrero, Oaxaca, Chiapas y centro América (Rzedowski, 1992). Es una especie moderadamente frecuente de los bosques tropicales secos o estacionalmente secos, penetrando marginalmente a encinares y pinares adyacentes, en altitudes de 800 a 1600 m. (Rzedowski, 2004). En este sentido, las selvas secas estacionales secas son comunidades dominadas por árboles de porte bajo con dosel más o menos continuo, que se desarrollan en sitios de lluvia con gran estacionalidad, menor a los 1600 mm al año, concentrada en pocos meses y, al menos durante cinco meses, tienen lluvias menores a 100 mm (Dirzo & Ceballos, 2010).

3.2 El Copal

3.2.1 Definición y composición

Actualmente el término copal refiere a la resina sólida obtenida de varias especies del género *Bursera*, principalmente de *Bursera bipinnata* y *Bursera copallifera*. El copal en penca es el producto principal, pero también se extrae mirra, goma o copal negro, lágrima, tecopal o copal de piedra, estos productos poseen precios diferenciados en el mercado (Linares y Bye, 2008).

En el copal se han identificado 104 metabolitos secundarios de los cuales, 60 terpenos y 29 compuestos fenólicos y cinco son ácidos grasos, (Bustamante-Villalobos, 2022). Siendo los terpenos los fitoquímicos más representativos, seguido por los compuestos fenólicos. Al respecto Abat-Fitz et al. (2020) reportaron que los compuestos volátiles con mayor concentración en la resina fueron: β -amirina, α -felandreno y betulina, de un total de 20 compuestos volátiles identificados. De estos compuestos 16 aportan su aroma característico y los otros cuatro son responsables de su consistencia. La producción de metabolitos terpenoides por las plantas permiten efectuar una variedad de funciones básicas en el crecimiento y el desarrollo, pero principalmente los utilizan en interacciones químicas más especializadas y de protección en el ambiente abiótico y biótico (Thol, 2015). Mientras que los metabolitos fenólicos son conocidos por sus propiedades antioxidantes, apoptóticas, anticancerígenas, antiinflamatorias, antibacterianas, antivirales, antifúngicas y anti protozoarias (Marcotullio et al., 2018).

3.3 Canales resiníferos

Las especies de *Bursera* se caracterizan por la producción de resina que exudan del tronco y las hojas (Becerra et al., 2001). En el caso de *Bursera bipinnata*, las estructuras secretoras se ubican entre la peridermis (198 μ) y el cambium (39 μ), tanto en el floema conductor (351 μ) como en el floema no conductor. Estos canales están rodeados internamente por dos capas de células de paredes

delgadas rodeadas a su vez por células del parénquima vertical (García-Pineda, 1988; Serrano-Rosas, 2018). Las especies de *Bursera* presentan canales axiales, los cuales pasan del xilema al floema a través del cambium, también presentan canales radiales y tangenciales, siendo estos últimos conexiones entre canales axiales - radiales, los cuales son abundantes en la corteza secundaria, por lo que forman una sola red tridimensional en la corteza interna (Suárez-Ramos, & Engleman, 1982). Cuando estos conductos se rompen hay una disminución de la presión en el extremo abierto, lo que genera un gradiente de presión del conducto, lo que a su vez se relaciona con la presión del epitelio, ello impulsa la salida de la resina (Cabrita, 2019).

3.4 Extracción del copal

La extracción de resina de *Bursera bipinnata* se realiza únicamente en el periodo agosto – octubre, puesto que son los meses de mayor precipitación en la selva baja caducifolia. Esta actividad comienza con la selección de los individuos a aprovechar, para ello los copaleros consideran aspectos morfológicos, sanitarios y fisiológicos (Abad-Fitz, 2019). Los cuales son determinados visualmente, basados en su experiencia y conocimiento transmitido por generaciones. Una vez seleccionados los árboles, se procede a generar una incisión con una cuña metálica afilada (quixala) ya sea en el fuste o las ramas, esto permite colocar una hoja de encino o un pedazo de plástico el cual permite canalizar el flujo de resina hacia las pencas de maguey o botellas de PET. Posteriormente, cada tercer día se realizan incisiones, para mantener un flujo constante de resina, conforme se deposita el copal en el recipiente se retiran los restos foliares que se han acumulado (Mena-Jiménez, 2018; Montúfar, 2016).

3.4.1 Importancia socio económica

El copal ha sido utilizado desde la antigüedad por diversas culturas para la elaboración de diversos productos como barnices, repelentes, medicinas, así como para usos rituales, ceremoniales o festivos. Por lo que era muy apreciado y formaba parte de las redes de intercambio y comercio (Purata, 2008; Rüdiger

et al., 2007). En la actualidad, estas resinas son de gran interés, debido a las aplicaciones potenciales de sus compuestos bioactivos especializados en diferentes sectores industriales. Por otro lado, en las localidades campesinas y urbanas se usan principalmente en el marco de las fiestas tradicionales, los cuales han trascendido en el tiempo (Montafúr-López, 2016).

Esta resina generalmente se comercializa a través de intermediarios que acuden a comprarlas hasta las localidades, o estas son vendidas directamente en los mercados de ciudades más grandes (García-Martínez, 2012). Por lo que representa una importante fuente de ingresos para las localidades que lo extraen, por lo que los hogares dependen de su venta para cubrir sus necesidades básicas (Mena-Jiménez, 2018).

3.4.2 El impacto de la extracción de resina

Los biomas tropicales secos en nuestro país sustentan altos niveles de diversidad biológica a pesar de tener una historia de sustentación de comunidades humanas basadas en una gestión agrícola de tala y quema. Esta estrecha asociación con comunidades humanas ha dado lugar a paisajes dominados por un mosaico de biomas tropicales secos secundarios en diferentes etapas de sucesión (Mesa-Sierra, 2022). Donde dicha relación se ve afectada por el proceso cultural cambiante que ocurre en las comunidades rurales de México (Maldonado et al., 2013). Como ha ocurrido con el copal, donde las redes comerciales que han ejercido una creciente presión para aumentar la disponibilidad de resina de *Bursera* y la falta de especificaciones técnicas de extracción, el sobrepastoreo, así como la falta de actividades de manejo forestal (como en los estados de Morelos, Puebla y Guerrero) ha derivado en una disminución de las poblaciones de *Bursera bipinnata* y *Bursera excelsa*, en consecuencia en la alteración de la estructura de la selva baja caducifolia (Mena, 2018; Montafúr-López, 2016).

Lo anterior puede atribuirse a que en las plantas en general, las compensaciones entre crecimiento y defensa ocurren debido a restricciones de recursos, esta dicotomía exige priorizar el crecimiento o la defensa, siendo ambos procesos

esenciales para la supervivencia, la reproducción y la adaptación (Hout et al., 2014). Cuando se prioriza la defensa, como lo es la producción de resina y sus compuestos bioactivos especializados, puede ocurrir una reducción de componentes esenciales para la recolección de luz y fijación de carbono, debido a la reasignación de recursos, como el nitrógeno de la ribulosa-1,5-bifosfato carboxilasa/oxigenasa (Guo et al., 2012; Ullmann-Zeunert et al., 2013). De tal manera que la reducción en la actividad fotosintética y un incremento en la demanda fisiológica de protección en condiciones de estrés provocan el agotamiento de los Carbohidratos No Estructurales y es probable que se produzca la mortalidad de los árboles si la cantidad de estos compuestos cae por debajo de ciertos umbrales específicos de cada especie (Barker-Plotkin et al., 2021; Wang et al., 2021). Esto debido a que los NSC son esenciales para el transporte de recursos, el metabolismo energético, la osmorregulación celular, así como la síntesis de compuestos de defensa contra el estrés biótico, abiótico y para restaurar su crecimiento y recuperación post estrés (Piper & Paula, 2020).

Ante este panorama, la gestión sostenible de este Producto Forestal No Maderable de gran importancia económica y social es fundamental para el desarrollo sostenible a largo plazo, donde la población local se beneficia al mismo tiempo conserva los servicios ecosistémicos de la biodiversidad forestal (Hernández-Barrios, 2015; De-Benathar et al., 2021).

3.5 Factores de estrés en entornos forestales

3.5.1 Definición de estrés

El estrés vegetal refiere a la desviación sostenida de cualquier condición ambiental más allá del rango óptimo, que reduce la productividad potencial (Niinemets, 2010). Debido a que afecta o bloquea el metabolismo, el crecimiento o el desarrollo de una planta (Lichtenthaler (1996). Las plantas expuestas a condiciones estresantes pasan de un estado óptimo (no estresado) a un estado subóptimo, hasta que alcanzan un nuevo equilibrio con las condiciones ambientales cambiadas, a través de las vías fisiológicas, bioquímicas y genéticas

(Bussotti & Pollastrini, 2021). Esta capacidad de restaurar el equilibrio ecológico y fisiológico después de una perturbación se conoce como resiliencia (Körner, 2018).

3.5.2 Estrés biótico y estrés abiótico

Los factores de estrés biótico incluyen patógenos, plagas, antagonismo, que causan daño a la planta a través de infecciones, herbivoría, así como competencia por recursos. Lo cual tiene efectos perjudiciales sobre el crecimiento y desarrollo de las plantas, como la disminución de la biomasa vegetal, la alteración de la fotosíntesis y la alteración de la morfología de las plantas (Georgieva & Vassileva, 2023). Por otro lado, los factores abióticos estresantes abarcan una amplia gama de factores ambientales, incluido el estrés hídrico, las fluctuaciones de temperatura, los niveles desequilibrados de nutrientes y minerales y la exposición a diversas formas de radiación (Mittler, 2005).

Los eventos de estrés biótico y abiótico como olas de calor, periodos de sequía, brotes de plagas (introducidas) y perturbaciones humanas, a menudo ocurren simultáneamente e interactúan entre sí, lo cual se ha relacionado con la mortalidad de los árboles en muchas regiones y debido al cambio climático se esperan eventos de mortalidad más extensos, graves y frecuentes (Allen et al., 2010; Fini et al., 2017). Puesto que exposición prolongada a condiciones de estrés abiótico debilita las defensas de las plantas, incrementa la susceptibilidad a plagas o patógenos latentes, así como la muerte por defoliación (Muilenburg & Herms, 2012).

3.5.3 Percepción remota del estrés

Para el estudio de sequías principalmente y la respuesta al estrés de las especies forestales se ha implementado la tecnología de teledetección, el cual mediante imágenes satelitales permite la estimación de diversos Índices de Vegetación (IV) y de esta forma medir múltiples indicadores de estrés hídrico, como el contenido de agua, los pigmentos de las hojas, la temperatura del dosel y la fluorescencia

de la clorofila. Esto permite obtener un panorama completo de la salud del bosque, el uso del agua, entre otras aplicaciones (Le et al., 2023; Xue & Su, 2017).

Entre los más utilizados se encuentran el Índice de Humedad de Diferencia Normalizada (NDMI) y el Índice de Clorofila Verde (GCI). El NDMI mide la reflectancia de la banda del infra rojo cercano, NIR (banda 8), la cual muestra la estructura interna de la hoja y el contenido de materia seca de la misma, mientras que la reflectancia del infra rojo de onda corta, SWIR (banda 11) refleja cambios en el contenido de agua de la vegetación y en la estructura esponjosa del mesófilo en las cubiertas de vegetación (Gao, 1996). Se calcula con la siguiente fórmula: $NDMI = \frac{NIR - SWIR1}{NIR + SWIR1}$, donde NIR son los valores de píxel de la banda infrarroja cercana, en micrometros (μm), y SWIR1 son los valores de píxel de la banda infrarroja de onda corta, en micrometros (μm). Este índice devuelve resultados entre -1 y 1. Los valores negativos cercanos a -1 corresponden a suelos estériles, sin cobertura, valores cercanos a 0 (-0.2 a 0.4) generalmente corresponden a estrés hídrico, los valores altos y positivos representan un dosel alto sin estrés hídrico (0.4 a 1; EOS Data Analytics, 2024; Sentinelhub, 2024). Por otro lado, El GCI es útil para monitorear el impacto de la estacionalidad y el estrés ambiental. Son estimadores precisos y lineales de la clorofila del dosel, contenido de N en las hojas y del área foliar verde fotosintéticamente activa. (Gitelson et al., 2005; Nguy-Robertson et al., 2014). Se calcula con la siguiente fórmula: $GCI = \frac{NIR}{Green} - 1$, donde el NIR son valores de píxel de la banda infrarroja cercana (banda 8), en micrometros (μm), y el Green es la reflectancia de la banda verde (banda 3), en micrometros (μm). Este índice devuelve resultados entre 0 y 10, un alto valor de GCI indica un alto contenido de clorofila.

3.6 Estrés por daño tisular

3.6.1 Señalización y respuesta

Las plantas están continuamente expuestas a agentes como los herbívoros y a tensiones mecánicas ambientales que provocan heridas y abren el camino a la invasión de patógenos microbianos. (Savatin et al., 2014). Cuando ocurre el daño tisular, las especies reactivas de oxígeno (ROS), el Ca^{2+} y la señalización eléctrica ("señalización en trío") forman una red que apoya la transmisión rápida de señales en las especies vegetales. (Choi et al., 2017). En término temporales, inmediatamente después del daño (segundos) ocurre un cambio en el potencial transmembrana, cambios en la concentración de Ca^{2+} , esto estimula la liberación de especies reactivas de oxígeno (ROS) y ácidos grasos poliinsaturados (PUFA) inducida por lesiones en plantas y animales, especialmente la generación de H_2O_2 . Minutos después las hormonas como JA son detectables y finalmente después una hora se observa la activación genética seguida de cambios metabólicos (Fürstenberg-Hägg et al., 2013; Koo, 2018; Niethammer, 2016). El estrés oxidativo generado mediante la producción de ROS daña la capa lipídica insaturada y la membrana relacionada, lo que afecta a los sistemas de transporte activo y pasivo a través de los tejidos celulares, además expone el sistema celular al estrés exógeno (León et al., 2001; Al-Harrasi et al., 2019).

3.6.2 Defensa inducida y defensa constitutiva

La herbivoría de los insectos es la principal causa de las lesiones naturales en los tejidos de las plantas, debido a que son su principal fuente de alimentación, esto ha obligado a las plantas a desarrollar estrategias de defensa (Koo, 2018). De tal manera que se pueden diferenciar como inducidos o constitutivos. Los mecanismos de defensa inducidos son energéticamente costosos, debido a que implica la generación, translocación, percepción y transducción de señales de la herida para activar la expresión de genes inducibles por heridas (León et al., 2001). La respuesta sistémica implica la mediación por hormonas, especialmente el ácido jasmónico (JA), etileno, ácido salicílico y el ácido abscísico (ABA) (Koo,

2018; Savatin et al., 2014). Por otro lado, las plantas también han desarrollado mecanismos de defensa constitutivos, lo cuales refieren a películas epicuticulares y cristales de cera, conductos secretores de látex o resinas, los cuales restringen el acceso de microorganismos oportunistas al tejido (Fürstenberg-Hägg et al., 2013).

3.7 Resinas vegetales como mecanismo de defensa

3.7.1 Definición y composición

Las resinas son una mezcla heterogénea de ácidos resínicos ($C_{20}H_{30}O_2$), ácidos grasos, ésteres de estos ácidos, esteroides, alcoholes, ceras y resinas (mezclas de ácidos neutros) que contienen carbono, hidrógeno y oxígeno (Pallardy, 2008). Son una mezcla soluble en lípidos de compuestos bioactivos especializados terpenoides o fenólicos volátiles y no volátiles, los cuales se secretan en estructuras especializadas, las cuales se ubican internamente o en la superficie y que son de importancia potencial en las interacciones ecológicas (Langenheim, 2003). Cuando las resinas han sido recién secretadas, son líquidos translúcidos, pero con el tiempo y la pérdida de la fracción de aceite esencial, se convierten en sólidos marrones, amarillos o blancos que, por polimerización y oxidación, se fosilizan en ámbar (Case et al., 2003).

Las resinas, por su composición tiene una función protectora contra herbívoros, hongos, patógenos y otros microorganismos (De-Carlo et al., 2019). Además de contener sustancias químicas tóxicas representan una amenaza mecánica para los insectos herbívoros, puesto que se solidifican al exponerse al aire y limitan la movilidad de estos (Dussourd & Denno, 1991).

3.7.2 Estructuras secretoras

En términos generales se puede decir que la resina fluye de los conductos resinosos, los cuales son espacios intercelulares abiertos y largos en forma de tubo revestidos por una capa de células parenquimatosas especializadas, llamadas epitelio, que secretan resina en el lumen del conducto (Cabrita, 2018). Estos

conductos se clasifican en axiales, radiales y tangenciales, los cuales permiten el transporte de resina a larga distancia, por el contrario, las bolsas de resina tienen un potencial limitado para el transporte de resina (Langenheim, 2003; Tulik & Jura-Morawiec, 2023). El lumen entre las células epiteliales puede formarse por separación celular (esquizógeno), lisis celular (lisígeno) o mediante un proceso de desarrollo que involucra vías esquizógenas y lisígenas, conocido como esquizolisígeno (Tulik & Jura-Morawiec, 2023).

De acuerdo con Cabrita (2018) cuando ocurre un aumento en el contenido de resina en el conducto genera una acumulación de presión, esto comprime las células epiteliales, esta reducción en su tamaño provoca la disminución del potencial osmótico, lo cual genera que el agua sea atraída desde las células subsidiarias vecinas, esto permite un incremento en el tamaño de las células epiteliales y que ejerza presión sobre la resina en el conducto. Cuando se rompe el conducto hay una disminución de la presión en el extremo abierto, lo que genera un gradiente de presión del conducto, esto genera un aumento en el flujo hacia el extremo abierto que se ve favorecido por la geometría del conducto, la viscosidad y la permeabilidad de la pared del conducto de resina. Cuando se alcanza el equilibrio entre la presión del epitelio y el conducto, la resina ya no se cargará en el conducto y el flujo se detendrá, coincidiendo con el cierre total de la herida (Cabrita, 2018; Cabrita, 2019).

3.8 Compuestos bioactivos especializados

Los componentes de la resina se derivan de carbohidratos producidos fotosintéticamente que se descomponen para producir compuestos más simples (productos de piruvato); los compuestos terpenoides y fenólicos se sintetizan luego a través de diferentes vías metabólicas, que incluyen procesos como la metilación, la glicosilación y la hidroxilación (Dudareva et al., 2013; Langenheim, 2003; Twaij & Hasan, 2022). Estos compuestos bioactivos especializados están dirigidos contra sistemas biológicos exclusivos de los herbívoros (Fürstenberg-Hägg et al., 2013).

3.8.1 Compuestos fenólicos y terpenoides

Los compuestos fenólicos, son aquellos que incluyen un anillo aromático (benceno; C₆) más al menos un grupo hidroxilo (OH). Estos compuestos derivan de las vías del ácido shikímico y del ácido malónico que tienen lugar en los tejidos de la superficie, estas vías producen una desconcertante variedad de estructuras monoméricas y poliméricas que cumplen una amplia gama de funciones en las plantas (Cheynier et al., 2013; Fürstenberg-Hägg et al., 2013; Langenheilm, 2003). La vía del shikimato resalta sobre la vía del ácido malónico, debido a que participa en la biosíntesis de la mayoría de los compuestos fenólicos. Esta vía, que consiste en una secuencia de siete pasos enzimáticos, convierte precursores de carbohidratos, derivados de la glucólisis y de la vía de las pentosas fosfato, en corismato, el precursor de los aminoácidos aromáticos (Marchiosis et al., 2020).

Los terpenoides constituyen la clase más grande y diversa de compuestos bioactivos especializados con muchos constituyentes volátiles, que se derivan de dos precursores de cinco carbonos, el difosfato de isopentenilo (IPP) y su isómero alílico, el difosfato de dimetilalilo (DMAPP; McGarvey & Croteau, 1995). Pueden sintetizarse mediante dos vías diferentes: La vía del mevalonato (MVA) y la vía del 2-C-metil-D-eritritol-4-fosfato o también conocida como la vía de la 1-desoxi-D-xilulosa-5-fosfato, que ocurren dentro del citoplasma y el cloroplasto, respectivamente (MEP/DXP; Dudareva et al., 2013; Zhao et al., 2019). Por un lado, la ruta MVA inicia con Acetyl CoA (que deriva del piruvato), se obtiene difosfato de isopentilo (IPP), parte de este compuesto se cataliza para formar difosfato de dimetilalilo (DMAPP; Xiao & Zhong, 2016). Por otro lado, en la ruta MEP/DXP, el IPP y DMAPP se sintetizan a través de la condensación de gliceraldehído 3-fosfato (GA-3P) y piruvato, para formar monoterpenos, diterpenos y tetraterpenos en plantas (Lange & Croteau, 1999).

3.9 Literatura citada

- Abad-Fitz, I. (2019). *Manejo de los copales y consecuencias fisiológicas de la selección humana en poblaciones de Bursera bipinnata (DC.) Engl., en el sureste de Morelos, México* [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma del Estado de Morelos]. Colección Tesis Postgrado. <http://riaa.uaem.mx/handle/20.500.12055/914>
- García-Pineda, M. O. (1988). Descripción anatómica de la corteza de seis especies del género *Bursera*. [Tesis Profesional, Universidad Autónoma de México]. Repositorio Institucional de la UNAM. <https://repositorio.unam.mx/>
- Abad-Fitz, I., Maldonado-Almanza, B., Aguilar-Dorantes, K. M., Sánchez-Méndez, L., Gómez-Caudillo, L., Casas, A., Blancas, J., García-Rodríguez, Y.M., Beltrán-Rodríguez, L., Sierra-Huelsz, J. A., Cristians, S., Moreno-Calles, A. I., Torres-García, I., y Espinosa-García, F. J. (2020) Consequences of traditional management in the production and quality of copal resin (*Bursera bipinnata* (Moc. & Sessé ex DC.) Engl.) in Mexico. *Forests* 11(9), 1-24. <https://doi.org/10.3390/f11090991>
- Al-Harrasi, A., Khan, A. L., Asaf, S., & Al-Rawahi, A. (2019). Biology of genus *Boswellia*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-16725-7>
- Allen, C. D., Macalady, A. K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., Kitzberger, T., Rigling, A., Breshears, D. D., Hogg E.H., Gonzáles, P., Fensham, R., Zhang, Z., Castro, J., Deminova, N., Lim, J. H., Allard, G., Running, S. T., Semerci, A., y Cobb, N. (2010). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management* 259, 660–684. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.001>
- Barker-Plotkin, A., Blumstein, M., Laflower, D., Pasquarella, V. J., Chandler, J. L., Elkinton, J. S., & Thompson, J. R. (2021). Defoliated trees die below a critical threshold of stored carbon. *Functional Ecology*, 35(10), 2156-2167. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13891>
- Becerra, J. X., Venable, D. L, Evans, P. H., & Bowers, W. S. (2001). Interactions between chemical and mechanical defenses in the plant genus *Bursera* and their implications for herbivores. *American Zoologist*, 41(4), 865–876. <https://doi.org/10.1093/icb/41.4.865>
- Bussotti, F., y Pollastrini, M. (2021). Revisiting the concept of stress in forest trees at the time of global change and issues for stress monitoring. *Plant Stress*, 2, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2021.100013>
- Bustamante-Villalobos, I. (2022). *Copales mexicanos del género Bursera: Revisión bibliográfica y quimioinformática* (Tesis de Licenciatura). Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Morelos.
- Cabrita, P. (2018). Resin flow in conifers. *Journal of Theoretical Biology*, 453, 48-57. <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2018.05.020>
- Cabrita, P. (2019). A Model for Resin Flow. En: Ramawat, K., Ekiert, H., Goyal, S. (Eds.) *Plant Cell and Tissue Differentiation and Secondary Metabolites*. Reference

- Series in Phytochemistry. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-11253-0_5-1
- Case, R. J., Tucker, A. O., Maciarello, M. J., y Wheeler, K. A. (2003). Chemistry and ethnobotany of commercial incense copals copal blanco, copal oro, and copal negro, of North America. *Economic Botany*, 57(2), 189-202. [https://doi.org/10.1663/0013-0001\(2003\)057\[0189:CAEOCI\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1663/0013-0001(2003)057[0189:CAEOCI]2.0.CO;2)
- Cheyrier, V., Comte, G., Davies, K. M., Lattanzio, V., & Martens, S. (2013). Plant phenolics: recent advances on their biosynthesis, genetics, and ecophysiology. *Plant physiology and biochemistry*, 72, 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2013.05.009>
- Choi, W. G., Miller, G., Wallace, I., Harper, J., Mittler, R. & Gilroy, S. (2017). Orchestrating rapid long-distance signaling in plants with Ca²⁺, ROS and electrical signals. *Plant J*, 90, 698-707. <https://doi.org/10.1111/tpj.13492>
- De-Benathar, ISC, Almeida, B.V., Rodrigues, M., Oliveira-Sousa, B., Costa-Machado, M. R. M., Ebling, A. A., y Lopes-Goulrt, S. (2021). Potential of *Copaifera* spp. oleoresin for sustainable extraction in the Eastern Amazon. *Environment, Development and Sustainability*, 23, 10275–10287. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-01056-7>
- De-Carlo, A., Dosoky, N. S., Satyal, P., Sorensen, A., y Setzer, W. N. (2019) The essential oils of the Burseraceae. En S. Malik (Ed.). *Essential Oil Research. Trends in Biosynthesis, Analytics, Industrial Applications and Biotechnological Production*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-16546-8_4
- Dirzo, R., & Ceballos, G. (2010). Las selvas secas de México: Un reservorio de biodiversidad y laboratorio viviente. En G. Ceballos, A. García, E. Espinoza, C. J. Bezaury & R. Dirzo (Eds.), *Diversidad, amenazas y áreas prioritarias para la conservación de las selvas del Pacífico de México* (pp. 13-20). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Dudareva, N., Klempien, A., Muhlemann, J. K., & Kaplan, I (2013). Biosynthesis, function and metabolic engineering of plant volatile organic compounds. *New Phytologist*, 198(1), 16-32. <https://doi.org/10.1111/nph.12145>
- Dussourd, D. E., y Denno, R. F. (1991). Deactivation of Plant Defense: Correspondence Between Insect Behavior and Secretory Canal Architecture. *Ecology* (72)4, 1383-1396. <https://doi.org/10.2307/1941110>
- EOS Data Analytics. (2024). NDMI: Índice De Humedad De Diferencia Normalizada. <https://eos.com/es/make-an-analysis/ndmi/#:~:text=El%20%C3%8Dndice%20de%20Humedad%20de,estr%C3%A9s%20h%C3%ADdrico%20en%20los%20cultivos>.
- EOS Data Analytics. (2024). NDMI: Índice De Humedad De Diferencia Normalizada. <https://eos.com/es/make-an-analysis/ndmi/#:~:text=El%20%C3%8Dndice%20de%20Humedad%20de,estr%C3%A9s%20h%C3%ADdrico%20en%20los%20cultivos>.

- Fini, A., Tattini, M., y Esteban, R. (2017). Plants' responses to novel environmental pressures. *Front. Plant Sci.*, 8(2000), 1-4. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.02000>
- Fürstenberg-Hägg, J., Zagrobelny, M., & Bak, S. (2013). Plant defense against insect herbivores. *International journal of molecular sciences*, 14(5), 10242-10297. <https://doi.org/10.3390/ijms140510242>
- Gao, B. C. (1996). NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote sensing of environment*, 58(3), 257-266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
- García-Martínez, L. E. (2012). *Aspectos socio-ecológicos para el manejo sustentable del copal en el Ejido de Acateyahualco, Gro.* [Tesis profesional, Universidad Nacional Autónoma de México]. TESIUNAM. https://tesiunam.dgb.unam.mx/F?func=find-b-0&local_base=TES01
- García-Pineda, M. O. (1988). Descripción anatómica de la corteza de seis especies del género *Bursera*. [Tesis Profesional, Universidad Autónoma de México]. Repositorio Institucional de la UNAM. <https://repositorio.unam.mx/>
- Georgieva, M., y Vassileva, V. (2023). Stress Management in Plants: Examining Provisional and Unique Dose-Dependent Responses. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(6), 5105. <https://doi.org/10.3390/ijms24065105>
- Gitelson, A. A., Viña, A., Ciganda, V., Rundquist, D. C., & Arkebauer, T. J. (2005). Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. *Geophysical research letters*, 32(8). <https://doi.org/10.1029/2005GL022688>
- Gitelson, A. A., Viña, A., Ciganda, V., Rundquist, D. C., & Arkebauer, T. J. (2005). Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. *Geophysical research letters*, 32(8). <https://doi.org/10.1029/2005GL022688>
- Guo, J., Pang, Q., Wang, L., Yu, P., Li, N., & Yan, X. (2012). Proteomic identification of MYC2-dependent jasmonate-regulated proteins in *Arabidopsis thaliana*. *Proteome Sci* 10(57). <https://doi.org/10.1186/1477-5956-10-57>
- Hernández-Barrios, J. C., Anten, N. P. R., y Martínez-Ramos, M. (2015). Sustainable harvesting of non-timber forest products based on ecological and economic criteria. *Journal of Applied Ecology*, 52(2), 389–401. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12384>
- Huot, B., Yao, J., Montgomery, B. L., & He, S. Y. (2014). Growth–defense tradeoffs in plants: A balancing act to optimize fitness. *Molecular plant*, 7(8), 1267-1287. <https://doi.org/10.1093/mp/ssu049>
- Koo, A.J. Metabolism of the plant hormone jasmonate: a sentinel for tissue damage and master regulator of stress response. *Phytochem Rev* 17, 51–80 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11101-017-9510-8>
- Körner, C. (2018). Concepts in empirical plant ecology. *Plant Ecology y Diversity*, 11 (4), 405-428. <https://doi.org/10.1080/17550874.2018.1540021>
- Lange, B. M., & Croteau, R. (1999) Isoprenoid biosynthesis via a mevalonate-independent pathway in plants: cloning and heterologous expression of 1-deoxy-

- D-xylulose-5-phosphate reductoisomerase from peppermint. *Archives of biochemistry and biophysics*, 365 (1), 170-174. <https://doi.org/10.1006/abbi.1999.1168>
- Langenheim, J. H. (2003). *Plant resins: Chemistry, evolution, ecology and ethnobotany*. Timber Press.
- Le, T.S.; Harper, R.; Dell, B. Application of Remote Sensing in Detecting and Monitoring Water Stress in Forests. *Remote Sens.* 2023, 15, 3360. <https://doi.org/10.3390/rs15133360>
- León, J., Rojo, E., & Sánchez-Serrano, J. J. (2001). Wound signalling in plants. *Journal of experimental botany*, 52(354), 1-9. <https://doi.org/10.1093/jexbot/52.354.1>
- Lichtenthaler HK. 1996. Vegetation stress: an introduction to the stress concept in plants. *Plant Physiology* 148: 4–14. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(96\)80287-2](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(96)80287-2)
- Linares, E., y Bye, R. (2008). El copal en México. *Biodiversitas*. 78, 8-11.
- Maldonado, B., Caballero, J., Delgado-Salinas, A., y Lira, R. (2013). Relationship between use value and ecological importance of floristic resources of seasonally dry tropical forest in the Balsas river basin, México. *Economic Botany*, 67, 17–29. <https://doi.org/10.1007/s12231-013-9222-y>
- Marchiosi, R., dos Santos, W.D., Constantin, R.P. et al. Biosynthesis and metabolic actions of simple phenolic acids in plants. *Phytochem Rev* 19, 865–906 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11101-020-09689-2>
- Marcotullio, M. C., Curini, M., & Becerra, J. X. (2018). An ethnopharmacological, phytochemical and pharmacological review on lignans from mexican *Bursera* spp. *Molecules*, 23(8), 1-20. <https://doi.org/10.3390/molecules23081976>
- McGarvey, D. J., and Croteau, R. "Terpenoid metabolism." *The plant cell* 7.7 (1995): 1015.
- Medina-Lemos, R. (2008). Fascículo 66. Burseraceae. En *Flora del valle de Tehuacán-Cuicatlán* (pp. 1-76). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Mena-Jiménez, F. (2018). *Estrategias ecológicas y culturales para garantizar la disponibilidad de productos forestales no maderables: Árboles medicinales en la Selva Baja del Sur de Morelos* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma del Estado de Morelos]. Colección Tesis Postgrado. <http://riaa.uaem.mx/handle/20.500.12055/402>
- Mesa-Sierra, N., Peña-Domene, M., Campo, J., y Giardina, C. P. (2022). Restoring mexican tropical dry forests: a national review. *Sustainability*, 14(7). <http://dx.doi.org/10.3390/su14073937>
- Mittler, R. (2005). Abiotic stress, the field environment and stress combination. *Trend in Plant Science*, 11(1), 15-19. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2005.11.002>
- Montúfar-López, A. (2016). Copal de *Bursera bipinnata*. Una resina mesoamericana de uso ritual. *Trace*, 70, 45-78.

- Muilenburg, V. L., y Herms, D. A. (2012). A review of bronze birch borer (Coleoptera: Buprestidae) life history, ecology, and management. *Environmental entomology*, 41(6), 1372-1385. <https://doi.org/10.1603/EN12238>
- Nguy-Robertson, A. L., Peng, Y., Gitelson, A. A., Arkebauer, T. J., Pimstein, A., Herrmann, I., Karnieli, A., Rundquist, D. C., & Bonfil, D. J. (2014). Estimating green LAI in four crops: Potential of determining optimal spectral bands for a universal algorithm. *Agricultural and forest meteorology*, 192, 140-148. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.03.004>
- Nguy-Robertson, A. L., Peng, Y., Gitelson, A. A., Arkebauer, T. J., Pimstein, A., Herrmann, I., Karnieli, A., Rundquist, D. C., & Bonfil, D. J. (2014). Estimating green LAI in four crops: Potential of determining optimal spectral bands for a universal algorithm. *Agricultural and forest meteorology*, 192, 140-148. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.03.004>
- Niethammer, P. (2016). The early wound signals. *Current opinion in genetics & development*, 40, 17-22. <https://doi.org/10.1016/j.gde.2016.05.001>
- Niinemets, Ü. (2010). Responses of forest trees to single and multiple environmental stresses from seedlings to mature plants: Past stress history, stress interactions, tolerance and acclimation. *Forest Ecology and Management*, 260(10), 1623-1639. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.07.054>
- Pallardy, S. G. (2008). *Physiology of Woody plants*. Science Direct. ISBN: 978-0-12-088765-1
- Piper, F. I., y Paula, S. (2020). The role of nonstructural carbohydrates storage in forest resilience under climate change. *Current Forestry Reports*, 6, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s40725-019-00109-z>
- Purata-Velarde, S. E., y León-Martínez, M. (2008). La colecta de resina. En S. E. Purata-Velarde (Ed.), *Uso y manejo de los copales aromáticos: Resinas y aceites* (pp. 17-20). México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Rüdiger, A. L., Siani, A. C., y Veiga-Junior, V. F. (2007). The chemistry and pharmacology of the South American genus *Protium* Burm f. (Burseraceae). *Pharmacognosy reviews*, 1(1), 93-104.
- Rzedowski, J. (1992). Flora del Bajío y regiones adyacentes: Familia Burseraceae. Instituto de Ecología A.C.
- Rzedowski, J., Medina-Lemus, R., y Calderón de Rzedowski, G. (2004). Las especies del género *Bursera* (Burseraceae) en la cuenca superior del río Papaloapan (México). *Acta botánica Mexicana*, 66, 23-151. <https://doi.org/10.21829/abm66.2004.970>
- Savatin, D. V., Gramegna, G., Modesti, V., & Cervone, F. (2014). Wounding in the plant tissue: the defense of a dangerous passage. *Frontiers in plant science*, 5, 470. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00470>

- Sentinelhub. (2024). Normalized Difference Moisture Index (NDMI). <https://custom-scripts.sentinel-hub.com/sentinel-2/ndmi/>
- Serrano-Rosas, I. (2018). Diferenciación de los sistemas vascular y de defensa en plántulas del género *Bursera* (Burseraceae). [Tesis Profesional, Universidad Autónoma de México]. Repositorio Institucional de la UNAM. <https://repositorio.unam.mx/>
- Suárez-Ramos, G., & Engleman, E. M. (1982). Study of the resin canals of the bark of *Bursera copallifera* and *Bursera grandifolia*. (1982). *Botanical Sciences*, 42, 41-54. <https://doi.org/10.17129/botsci.1260>
- Tholl, D. (2015). Biosynthesis and biological functions of terpenoids in plants. In: J. Schrader, J. Bohlmann (Eds.), *Biotechnology of Isoprenoids* (pp. 63-106). Switzerland: Springer. https://doi.org/10.1007/10_2014_295
- Tulik, M., & Jura-Morawiec, J. (2023) An arrangement of secretory cells involved in the formation and storage of resin in tracheid-based secondary xylem of arborescent plants. *Front. Plant Sci.* 14:1268643. doi: 10.3389/fpls.2023.1268643
- Twaij, B. M., & Hasan, M. N. (2022). Bioactive secondary metabolites from plant sources: types, synthesis, and their therapeutic uses. *International Journal of Plant Biology*, 13(1), 4-14. <https://doi.org/10.3390/ijpb13010003>
- Ullmann-Zeunert, Lynn., Stanton, M. A., Wielsch, N., Bartram, S., Hummert, C., Svatos, A., Baldwuing, I. T., & Groten, K. (2013). Quantification of growth–defense trade-offs in a common currency: nitrogen required for phenolamide biosynthesis is not derived from ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase/oxygenase turnover. *The Plant Journal* 75(3), 417-429. <https://doi.org/10.1111/tpj.12210>
- Wang, Z., Zhou, Z., & Wang, C. (2021). Defoliation-induced tree growth declines are jointly limited by carbon source and sink activities. *Science of The Total Environment*, 762, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143077>
- Xiao, H., & Zhong, J. J. (2016). Production of useful terpenoids by higher-fungus cell factory and synthetic biology approaches. *Trends in Biotechnology*, 34(3), 242-255. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2015.12.007>
- Xue, J., y Su, B. (2017) Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications. *Journal of Sensors*, 2017, 1-17. <https://doi.org/10.1155/2017/1353691>
- Zhao, H., Feng, S., Zhou, W., & Kai, G. (2019). Transcriptomic analysis of postharvest toon buds and key enzymes involved in terpenoid biosynthesis during cold storage. *Scientia Horticulturae*, 257, 108747. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108747>

4 FACTORES DENDROMÉTRICOS, EDAFOCLIMÁTICOS, FISIOLÓGICOS Y DEL MÉTODO DE EXTRACCIÓN QUE INFLUYEN EN EL RENDIMIENTO DE COPAL

DENDROMETRIC, EDAPHOCLIMATIC, PHYSIOLOGICAL, AND EXTRACTION METHOD FACTORS INFLUENCING COPAL YIELD

Fredy Martínez-Galván¹; Julio César Buendía-Espinoza¹, Elisa del Carmen Martínez-Ochoa²

¹ Universidad Autónoma Chapingo. Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Carretera Federal México-Texcoco, Km 38.5, C. P. 56230, Texcoco, Edo. Mex. Email: fredy.rise@outlook.es; jcbuendiae@hotmail.com

² Universidad Autónoma Chapingo. Área de Agronomía del departamento de Preparatoria Agrícola. Carretera Federal México-Texcoco, Km 38.5, C. P. 56230, Texcoco, Edo. Mex. Email: elisacmo333@gmail.com

4.1 Resumen

La extracción de copal, un producto forestal no maderable, contribuye a la economía de familias campesinas. Sin embargo, la extracción inapropiada y el desconocimiento de los factores que afectan su producción, han contribuido a reducir sus poblaciones. El objetivo de esta investigación fue determinar las variables dendrométricas, edafoclimáticas, fisiológicas y del método de extracción que tienen mayor influencia en el rendimiento de resina de *Bursera bipinnata* mediante análisis de correlación y regresión lineal múltiple. El sitio experimental se desarrolló en la microcuenca Los Sauces, Morelos, México, con una muestra aleatoria de 70 árboles. Las variables correlacionadas con el rendimiento fueron: Diámetro de fuste ($r = 0.31$; $p < 0.05$), diámetro de copa ($r = 0.29$; $p = 0.01$), volumen de copa ($r = 0.28$; $p = 0.01$), altitud ($r = -0.23$; $p = 0.050$), caras en el fuste ($r = -0.23$; $p = 0.054$), caras en ramas ($r = 0.50$; $p < 0.05$), caras totales ($r = 0.54$; $p < 0.05$), altura de la cara ($r = 0.32$; $p < 0.05$), área total de resinación ($r = 0.55$; $p < 0.05$) y el Índice de Humedad de Diferencia Normalizada (NDMI) en octubre ($r = -0.28$; $p = 0.01$). Se obtuvo un modelo ($R^2 = 0.43.8$; $p < 0.05$), destacando como factor principal el área total de resinación, seguido por la longitud de incisión y el NDMI en octubre. Finalmente, el manejo para la extracción de resina debe integrar factores dendrométricos, edafoclimáticos, fisiológicos y del método de extracción para contribuir a la sostenibilidad de esta actividad productiva.

Palabras clave: copal, rendimiento, regresión lineal múltiple, NDMI, sostenibilidad.

4.2 Abstract

The extraction of copal, a non-timber forest product, contributes to the economy of rural families. However, inappropriate extraction and ignorance of the factors that affect its production have contributed to reducing their populations. The objective of this research was to determine the dendrometric, edaphoclimatic, physiological variables and the extraction method that have the greatest influence on the resin yield of *Bursera bipinnata* by correlation analysis and multiple linear regression. The experimental site was developed in the Los Sauces micro-watershed, Morelos, Mexico, with a random sample of 70 trees. The variables correlated with yield were: Stem diameter ($r = 0.31$; $p < 0.05$), crown diameter ($r = 0.29$; $p = 0.01$), crown volume ($r = 0.28$; $p = 0.01$), altitude ($r = -0.23$; $p = 0.050$), faces on the stem ($r = -0.23$; $p = 0.054$), faces on branches ($r = 0.50$; $p < 0.05$), total faces ($r = 0.54$; $p < 0.05$), face height ($r = 0.32$; $p < 0.05$), total resination area ($r = 0.55$; $p < 0.05$) and the Normalized Difference Moisture Index (NDMI) in October ($r = -0.28$; $p = 0.01$). A model was obtained ($R^2 = 0.43.8$; $p < 0.05$), highlighting the total resination area as the main factor, followed by the incision length and the NDMI in October. Finally, the management for resin extraction should integrate dendrometric, edaphoclimatic, physiological factors and the extraction method to contribute to the sustainability of this productive activity.

Keywords: copal, yield, multiple linear regression, NDMI, sustainability.

4.3 Introducción

Los recursos forestales no maderables (PFNM) se definen como cualquier componente de origen vegetal o animal obtenido de los ecosistemas boscosos, excluyendo la madera, que es utilizado por las comunidades humanas con fines diversos (Wong et al., 2001). Dentro de las principales categorías identificadas para estos recursos se incluyen elementos como fibras, gomas naturales, ceras, rizomas, resinas y tierra de monte, entre otros (Tapia-Tapia y Reyes-Chilpa, 2008). Los bosques tropicales caducifolios albergan PFNM importantes para el desarrollo de las comunidades rurales que habitan en o cerca de los bosques, al aprovecharse constantemente sus recursos (Jiménez-González et al., 2017; Tapia-Tapia y Reyes-Chilpa, 2008). Entre los PFNM de mayor relevancia en estos ecosistemas destaca la resina, extraída principalmente de especies del género *Bursera*, reconocido como uno de los más característicos de los bosques tropicales caducifolios de México (Rzedowski y Calderón de Rzedowski, 2013). Dentro del género destacan *Bursera bipinnata* y *Bursera copallifera* como las

especies que producen la resina más apreciada por los copaleros (Linares y Bye, 2008).

La especie *B. bipinnata*, conocida como copal chino, es una especie arbórea o arbustiva dioico que puede alcanzar los ocho metros de altura, muy resinosa y de aroma agradable, con una corteza gris de textura típicamente lisa. Su floración se presenta en mayo a junio, y su fructificación de junio a octubre (Medina-Lemos, 2008; Rzedowski et al., 2004). Su aprovechamiento para la extracción de resina comienza con la selección de árboles, algunos de los cuales se han aprovechado con anterioridad y otros serán aprovechados por primera vez. Para la selección de un árbol por primera vez, los copaleros determinan visualmente aspectos morfológicos, sanitarios y fisiológicos basados en su experiencia (Abad-Fitz, 2019). Luego, para la obtención de la resina realizan incisiones con una cuña metálica afilada en el fuste o las ramas y, al tercer día colocan una hoja de encino o un trozo de plástico sobre la primera incisión, para facilitar su deposición en pencas de maguey o botellas de plástico (Mena-Jiménez, 2018). Cada tres días realizan incisiones y retiran las impurezas, normalmente restos foliares acumulados (Montúfar-López, 2016).

La especie *B. bipinnata* se distribuye en 17 estados de México y parte de América central (Rzedowski, 1992). Por lo que es una especie moderadamente frecuente en bosques tropicales secos o estacionalmente secos, que son los ecosistemas más representativos de México (Dirzo & Ceballos, 2010). Sin embargo, las poblaciones de esta especie y de *B. excelsa* han disminuido en los estados de Morelos, Puebla y Guerrero debido a la falta de prácticas de aprovechamiento sostenibles (Montúfar-López, 2016).

Algunas investigaciones indican que la producción de resina de *B. bipinnata* está sujeta a factores como la altitud, la exposición, la precipitación y la temperatura (Cruz-Cruz et al., 2017; Cruz-León et al., 2006; Linares & Bye, 2008; Purata-Velarde & León-Martínez, 2005), así como a las características dendrométricas y el estado fitosanitario del árbol (Abat-Fitz et al., 2020; Buendía-Espinoza et al., 2022; Purata-Velarde & León-Martínez, 2008). Otras investigaciones indican que

la producción está condicionada al manejo, es decir, al periodo de descanso, la frecuencia y la intensidad de aprovechamiento (Abat-Fitz et al., 2020; Cruz-Cruz et al., 2017; Purata-Velarde & León-Martínez, 2005). Sin embargo, ninguna investigación ha analizado de forma integral las características morfológicas y fisiológicas de los árboles de copal, así como el método de extracción y las características edafoclimáticas que expliquen y determinen la cantidad de resina que se puede extraer de un árbol. En otras especies vegetales, se han realizado estudios que consideran de manera integral las características morfológicas, fisiológicas y edafoclimáticas para explicar y determinar la cantidad que se puede extraer de oleo-resinas y gomas, como la resina de *Pinus* (Cadena-Iñiguez et al., 2019; Corral Rivas et al; 2019; Muñoz-Flores et al., 2022; Reyes-Ramos et al., 2019) y de látex (Rojo-Martínez et al., 2003).

Bajo este contexto, el desarrollo de conocimiento acerca de los procedimientos más adecuados para la extracción, procesamiento y comercialización de la resina es esencial para la sostenibilidad de esta actividad (Quiroz-Carranza & Magaña-Alejandro, 2015). El manejo adecuado de los productos forestales no maderables es favorable para el desarrollo sostenible a largo plazo, ya que permite que las poblaciones locales se beneficien al tiempo que preservan los servicios ecosistémicos de la biodiversidad forestal (Hernández-Barrios, 2015). Por lo anterior, el objetivo de esta investigación fue determinar las variables dendrométricas, edafoclimáticas, fisiológicas y del método de extracción que tienen mayor influencia en el rendimiento de resina de *Bursera bipinnata*, mediante análisis de correlación y regresión lineal múltiple, con el propósito de contribuir a su aprovechamiento sostenible.

4.4 Materiales y métodos

4.4.1 Área de estudio

El área de estudio se encuentra dentro de la microcuenca Los Sauces, subcuenca del Río Cuautla, al sureste del estado de Morelos. El área cuenta con una superficie de 384 ha y una altitud entre 1230-1580 msnm. Su clima es

semicálido subhúmedo (A)C(w1), con régimen de lluvias en verano, temperatura media de 22.8 °C y precipitación media anual de 819.2 mm (Servicio Meteorológico Nacional, 2024). El grupo de suelo predominante es Phaeozem háplico, que se caracteriza por presentar un horizonte superficial oscuro y rico en materia orgánica, sobre un horizonte subsuperficial de alteración (cámbico) o con acumulación de arcilla (árgico) poco profundo y pedregoso (IUSS Working Group WRB, 2015). La microcuenca está formada por topoformas de sierra volcánica con laderas escarpadas, donde prevalece una vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia, seguido por vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia, así como pequeños espacios destinados a la agricultura de temporal (INEGI, 2015).

Sitio Experimental. La investigación se efectuó en el ejido de Los Sauces, Tepalcingo, Morelos (Figura 1), en un rango altitudinal de 1368 – 1476 metros y una superficie de 29.21 ha. La vegetación predominante fue secundaria arbustiva de selva baja caducifolia (INEGI, 2015). Que se desarrolla en sitios con gran estacionalidad de lluvias y concentrada en pocos meses; en consecuencia, estas comunidades vegetales pierden la mayor parte de las hojas en la época seca (Trejo, 2010). Por otra parte, la estrecha asociación con poblaciones humanas ha dado lugar a paisajes dominados por un mosaico de biomas tropicales secos secundarios en diferentes etapas de sucesión (Mesa-Sierra, 2022).

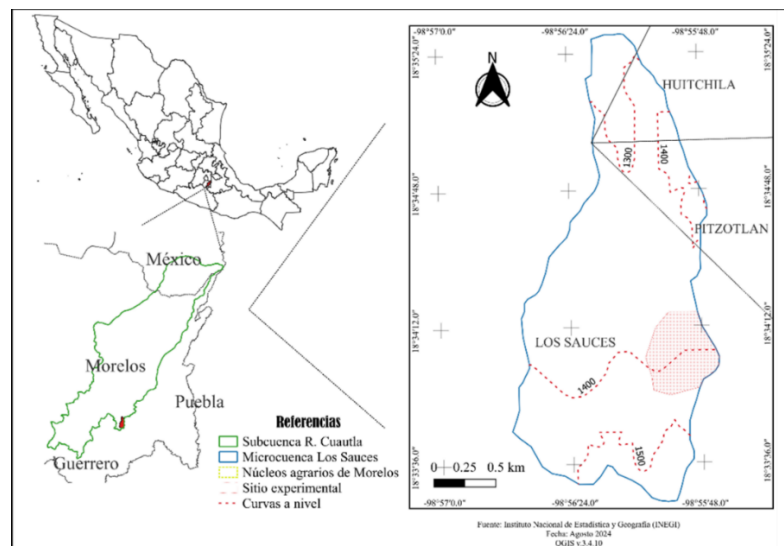


Figura 1. Localización del sitio experimental en la microcuenca Los Sauces, Morelos, México.

4.4.2 Variable de respuesta

Rendimiento de resina. La cantidad de resina que se puede extraer de un árbol es la variable más importante para esta actividad productiva. Debido a que por una parte se relaciona con los ingresos monetarios que se obtienen de su venta, y por otra parte se relaciona con la supervivencia de los individuos aprovechados (Linares & Bye, 2008). La extracción de copal fue realizada en el periodo agosto – octubre por un copalero con experiencia, de acuerdo con el método tradicional, el cual consiste en la inducción del daño tisular mediante incisiones en el fuste o ramas cada tercer día y la resina se colectó en pencas de maguey o botellas de plástico (Mena-Jiménez, 2018; Montúfar-López, 2016). La resina se cuantificó al final de la temporada pesando la cantidad de resina extraída por árbol. Su nemónico en el modelo fue *PROD*.

4.4.3 Variables Explicativas

Las variables explicativas medidas en los árboles aprovechados fueron las dendrométricas, fisiológicas y del método de extracción, mientras que las variables medidas en el sitio fueron las edafoclimáticas (Cuadro 1; Figura 2).

Cuadro 1. Variables explicativas para la producción de resina de copal.

Dendrométricas	Edafoclimáticas	Fisiológicas	Método de extracción
Diámetro de fuste	Altitud	NDMI _{Julio}	Caras de resinación en el fuste
Altura total	pH	NDMI _{agosto}	Caras de resinación en ramas
Diámetro de copa	Conductividad eléctrica	NDMI _{octubre}	Caras de resinación totales
Longitud de copa	Temperatura del suelo	GCI _{Julio}	Altura de la cara
Volumen de copa		GCI _{agosto}	Longitud de incisión
		GCI _{octubre}	Profundidad de incisión Área media de cara

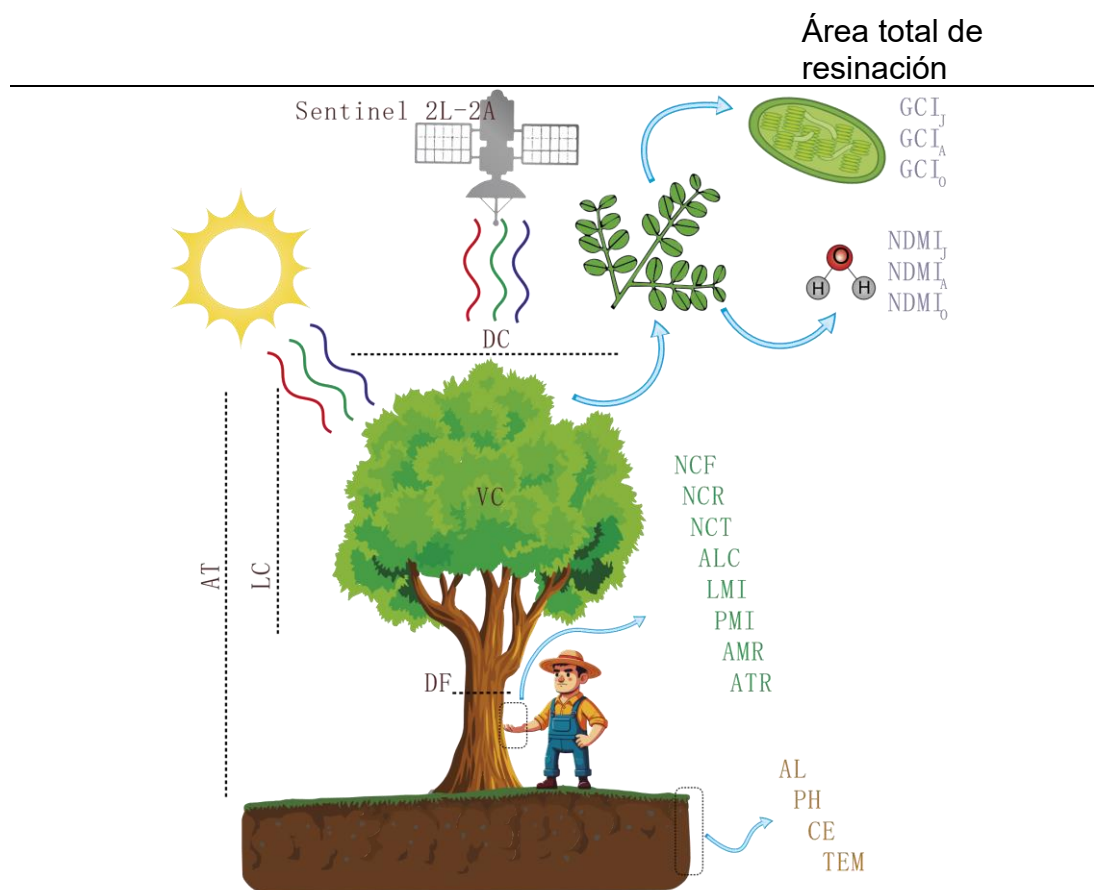


Figura 2. Esquema de las variables explicativas tomadas al árbol de *Bursera bipinnata*. DF: Diámetro del fuste; AT: Altura total; DC: Diámetro de copa; VC: Volúmen de copa; AL: Altitud; PH: Potencial de hidrógeno; CE: Conductividad eléctrica; TEM: Temperatura del suelo; NCF: Caras de resinación en el fuste; NCR: Caras de resinación en ramas; NCT: Caras de resinación totales; ALC: Altura de la cara; LMI: Longitud de incisión; PMI: Profundidad de incisión; AMR: Área media de cara; ATR: Área total de resinación; NDMI: Índice de Humedad de Diferencia Normalizada (julio, agosto, octubre); GCI: Índice de Clorofila Verde (julio, agosto, octubre).

Variables dendrométricas

Diámetro del fuste o tallo principal. Esta característica morfológica se asocia con el rendimiento de resina y es de los principales criterios para la selección de árboles. Puesto que se ha identificado que, por lo general se presenta un bajo rendimiento—en diámetros inferiores a 10 cm (Abad-Fitz et al., 2020; Purata-Velarde & León-Martínez, 2008). En especies de *Boswellia* se ha identificado que

el rendimiento de resina aumenta al incrementar el diámetro del tallo (Tolera et al., 2015). Su nemónico en el modelo fue *DF*.

Altura total. La altura total también puede influir en la producción de resina. Como es el caso de especies de *Pinus*, *Boswellia* y *Commiphora*, donde se ha considerado esta variable para la predicción del rendimiento de resina (Cherenet et al., 2020; Hassan-Ali et al., 2009; Reyes-Ramos et al., 2019). Su nemónico en el modelo fue *AT*.

Diámetro de copa, Longitud de copa y Volumen de copa. Estas variables en especies arbóreas son indicadores indirectos de la actividad fotosintética y la respiración. Árboles con copas de mayores dimensiones presentan mayor área foliar (LA), lo que contribuye a incrementar la absorción de luz (Binkley et., 2013). Con ello una mayor producción de carbohidratos no estructurales, necesarios para la síntesis de compuestos de defensa, como lo son las resinas y sus compuestos bioactivos especializados (Piper & Paula, 2020). Su nemónico en el modelo fueron *DC*, *LC*, *VC*, respectivamente.

Variables edafoclimáticas

Altitud. Los árboles presentan variaciones fisiológicas a lo largo de gradientes altitudinales en respuesta a la variación de factores como la presión atmosférica, la temperatura del aire, la lluvia, el viento y la exposición a la luz (Thomas, 2011). Estas variaciones afectan la absorción de carbono y el estado hídrico de las plantas (Pernicová et al., 2024). Fundamentales para la síntesis de compuestos de defensa. Como es el caso de especies de *Boswellia* donde los árboles ubicados en tierras altas presentaron un mayor rendimiento de resina, relacionado a una mayor disponibilidad de luz (Menguistu, 2011). Su nemónico en el modelo fue *AL*.

pH. El potencial de hidrógeno se utiliza para describir las condiciones del suelo donde desarrolla la vegetación, es uno de los factores relacionados con las condiciones nutricionales de las plantas. Las respuestas fisiológicas al daño

tisular inducido por la producción de resina están particularmente relacionadas con el aprovechamiento del Ca, el Mg y el N (Härdtle et al., 2004; Khan et al., 2018). Su nemónico en el modelo fue *PH*.

Conductividad eléctrica. La presencia de sal en la solución del suelo reduce la capacidad de la planta para absorber agua; Así mismo, estas sales se incorporan al tejido de la planta junto con la corriente de transpiración, por lo que su contenido excesivo daña principalmente a las células foliares. Ambas condiciones producen un efecto negativo en las vías fisiológicas y bioquímicas, como la inhibición de la fotosíntesis, el daño en la membrana celular, la alteración en la producción de especies o moléculas reactivas de oxígeno, y la disminución en la adquisición de agua y nutrientes (Okon, 2019; Parihar et al., 2015). Lo que puede disminuir la producción de precursores para la biosíntesis de compuestos de defensa. Su nemónico en el modelo fue *CE*.

Temperatura del suelo. La temperatura del suelo influye directamente en los procesos biogeoquímicos, las tasas de mineralización, de descomposición de materia orgánica, así como la asimilación de nutrientes en las plantas (Jungqvist et al., 2014). Lo que puede influir en el aprovechamiento de Ca, el Mg y el N relacionados a la respuesta fisiológicas al daño tisular en árboles aprovechados (Khan et al., 2018). Su nemónico en el modelo fue *TEM*.

Variables Fisiológicas

Índice de Humedad de Diferencia Normalizada (NDMI). Las hojas al ser la última frontera del continuo suelo-planta-atmósfera reflejan la disponibilidad de agua, fundamental para el transporte de nutrientes, la turgencia celular y la producción de fotosintatos. En los géneros *Pinus*, *Senegalia* y *Acacia* la disponibilidad de agua en el suelo relacionada a la precipitación influye en su aprovechamiento para la planta, por ende, en la producción de resina y goma (Ballal et al., 2005; Das et al., 2014; Rissanen, 2019). Este índice mide la reflectancia de la banda del infra rojo cercano, NIR, que muestra la estructura interna de la hoja y su contenido de materia seca mientras que, la reflectancia del

infra rojo de onda corta, SWIR refleja cambios en el contenido de agua de la vegetación y en la estructura esponjosa del mesófilo del follaje (Gao, 1996). Sus nemónicos en el modelo fueron *NDMIJ*, *NDMIA* y *NDMIO*, respectivamente.

Índice de Clorofila Verde (GCI). El contenido de clorofila de las plantas influye directamente en su capacidad para sintetizar carbohidratos estructurales, así como carbohidratos no estructurales, a partir de los cuales se forman los precursores de los compuestos bioactivos especializadas necesarios para la defensa contra el estrés biótico y abiótico, como el caso de las resinas (Piper & Paula, 2020). El GCI se utiliza para monitorear los impactos de la estacionalidad y el estrés ambiental, así como para estimar la clorofila del dosel, el contenido de nitrógeno de las hojas y el área foliar verde fotosintéticamente activa (Gitelson et al., 2005; Nguy-Robertson et al., 2014). Su nemónico en el modelo fueron *GCIJ*, *GCIA* y *GCIO*, respectivamente.

Variables del método de extracción

Caras de resinación en el fuste, Caras de resinación en ramas y Caras de resinación totales. Las caras de resinación están conformadas por un conjunto de incisiones realizadas en el periodo que dura el aprovechamiento, las cuales pueden realizarse en el fuste o ramas. Este daño inducido genera un diferencial de presión que permite que la resina se deposite en el área afectada, puesto que proporcionan una defensa física y química contra herbívoros especializados (Becerra et al., 2001). Las caras de resinación son indicadores indirectos de la intensidad de aprovechamiento en los árboles. Su nemónico en el modelo fueron *NCF*, *NCR* y *NCT* respectivamente.

Altura de la cara. La altura media de las caras de resinación de cada árbol se utilizó para determinar la altura promedio donde se realizaron las incisiones durante el periodo de extracción. En árboles del género *Boswellia* y *Commiphora* se ha identificado que la altura de extracción tiene un efecto sobre el rendimiento de resina (Cherenet et al., 2020; Hassan-Ali et al., 2009). Su nemónico en el modelo fue *ALC*.

Longitud de incisión y Profundidad de incisión. Las incisiones se realizan consecutivamente en paralelo, donde su tamaño y profundidad varía en función del grosor y forma del fuste o ramas del árbol. Las incisiones más largas pueden cortar un mayor número de canales resiníferos, pero una incisión más profunda necesariamente no promueve mayor rendimiento, debido a que *Bursera bipinnata* tiene estructuras secretoras situadas entre la peridermis ($198\ \mu$) y el cambium ($39\ \mu$), tanto en el floema conductor ($351\ \mu$) como en el floema no conductor (García-Pineda, 1988). El tamaño de las incisiones se ha identificado como un factor que influye en la producción de resina en especies de *Boswellia*, *Commiphora* y *Butea* (Kelil & Taye, 2023; Prasad et al., 2016; Sabo et al., 2022). Sus nemónicos en el modelo fueron LMI y PMI.

Área media de cara. Es una medida del tamaño de las caras de resinación, que tienen forma trapezoidal, y por lo tanto de la intensidad de aprovechamiento. Esta área incrementa a medida que aumenta el número de incisiones. En especies de *Boswellia*, la intensidad de aprovechamiento influye en el rendimiento y la calidad de resina (Negussie et al., 2021; Sabo et al., 2022). Su nemónico en el modelo fue AMR.

Área total de resinación. Es un indicador directo de la intensidad de extracción de resina durante los meses de agosto, septiembre y octubre. Si aumenta, el árbol producirá más resina a expensas del crecimiento, del desarrollo o de la cicatrización de heridas (Linares y Bye, 2008). Su nemónico en el modelo fue ATR.

4.4.4 Base de datos y medición de variables

En el sitio experimental se georreferenciaron los árboles de *Bursera bipinnata* próximos a ser aprovechados por los copaleros desde el mes de agosto hasta el mes de octubre, donde cada árbol fue una unidad de muestreo. Se georreferenciaron 111 unidades de muestreo, de los cuales se tomó una muestra de 70 unidades mediante la función sample del software R (R Core Team, 2024), cada muestra con la misma probabilidad de ser seleccionados (Singh & Mangat,

1996). En cada unidad se recopilaron datos de las características dendrométricas, fisiológicas y del método de extracción. En el área de goteo de cada unidad se recopilaron las variables edafoclimáticas (Figura 3).

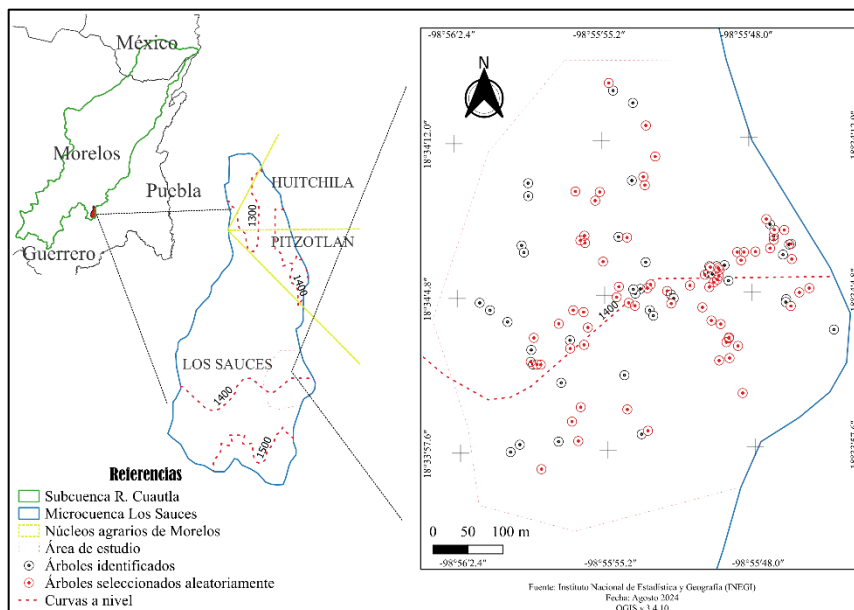


Figura 3. Localización de las 70 unidades de muestreo (árboles de copal) en el sitio experimental, dentro del área de estudio microcuenca Los Sauces, Estado de Morelos, México.

Las coordenadas geográficas para cada árbol se establecieron con un dispositivo de posicionamiento global. Las *variables dendrométricas*, como es el caso del diámetro del fuste, fue medido antes de las ramas primarias, mediante el uso de una cinta diamétrica, adaptándose a la forma irregular del fuste. No obstante, en la mayoría de los casos, esta medición coincidió con el diámetro a la altura del pecho a 1.30 metros desde la base del suelo. La *altura total del árbol* se midió desde el nivel del suelo hasta el ápice de su copa con una cinta métrica. La *longitud de copa* se obtuvo mediante la diferencia entre la altura total y la altura de inserción de la copa. El *diámetro de copa* se determinó del promedio de dos mediciones perpendiculares de la copa (Norte-Sur y Este-Oeste), mediante una cinta métrica. El *volumen de copa* se calculó mediante la mitad del volumen de un esferoide: $V_{copa} = \frac{1}{2} * \left[\frac{4}{3} * \pi * a^2 * c \right]$, donde a = Radio de copa y c = La longitud de copa. Las *variables edafoclimáticas* se determinaron a través de la

toma de muestras de suelo en el área de goteo en cada uno de los árboles, las cuales se analizaron de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. El *pH* y la *conductividad eléctrica* se midieron con un potenciómetro Conductronic equipado con electrodo de pH, celda de conductividad y sensor de temperatura. La *temperatura del suelo* se registró a una profundidad de 10 cm mediante un termómetro digital portátil equipado con una sonda de acero inoxidable, en el mes de septiembre. Las *Variables fisiológicas*, como NDMI y GCI, se determinaron mediante una calculadora ráster del software QGIS 3.10, usando imágenes Sentinel-2 L2A, corregidas atmosféricamente. El índice NDMI devuelve resultados entre -1 y 1. Los valores negativos cercanos a -1 corresponden a suelos estériles y sin cobertura, los valores cercanos a 0 (-0.2 a 0.4) generalmente corresponden a estrés hídrico, mientras que los valores altos y positivos representan un dosel alto sin estrés hídrico (0.4 a 1; EOS Data Analytics, 2024; Sentinelhub, 2024). Se calculó con la siguiente fórmula: $NDMI = \frac{NIR - SWIR1}{NIR + SWIR1}$, donde NIR son los valores de píxel de la banda infrarroja cercana y SWIR1 son los valores de píxel de la banda infrarroja de onda corta, ambos valores en micrómetros (μm). El GCI se calculó con la siguiente fórmula: $GCI = \frac{NIR}{Green} - 1$, donde el NIR son valores de píxel de la banda infrarroja cercana y el Green es la reflectancia de la banda verde, ambos valores en micrómetros (μm). Este índice devuelve resultados entre 0 y 10, un alto valor de GCI indica un alto contenido de clorofila y una planta sana con alta capacidad fotosintética, por el contrario, un valor bajo puede indicar estrés en la planta y una reducción de la actividad fotosintética. Las *variables del método de extracción* se obtuvieron con apoyo de un ejidatario con experiencia en la extracción de resina, donde se identificó el número y ubicación de las caras de resinación. Para determinar la *altura de las caras* se promediaron las alturas de las caras existentes, midiendo con una cinta métrica desde el nivel del suelo. La *longitud de incisión* se midió con cinta métrica, y se determinó como el promedio de las longitudes de las incisiones ubicadas a media cara, en cada una de las caras; mientras que, la *profundidad de la incisión* se midió mediante vernier pie de rey, y se tomó como el promedio de la

profundidad de las incisiones ubicadas a media cara, en cada una de las caras. Para el cálculo del *área de la cara de resinación* se tomaron medidas de las bases y la altura en cada una de las caras mediante cinta métrica, se usó la formula del trapecio y se promediaron. Para el cálculo del *área total de resinación*, se obtuvo el producto del número de caras totales del árbol generados en la temporada, por el promedio de las áreas de las caras de resinación. La *producción de resina* por árbol se pesó al final de la temporada de extracción, mediante una báscula digital granataria.

4.4.5 Análisis de datos

Para identificar el mejor modelo, se realizó un análisis de correlación lineal seguido por un análisis de regresión lineal múltiple en el Software R (R Core Team 2024). Las variables edafoclimáticas, así como las variables dendrométricas, del método de extracción y fisiológicas de los árboles de *B. bipinnata* se consideraron como variables explicativas, mientras que el rendimiento de resina de los árboles se consideró como la variable de respuesta.

Coeficiente de correlación, r_{xy} . El coeficiente de correlación de Pearson permite medir la correlación lineal entre x e y . Este estadístico se denota como:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

donde x_i y y_i son datos i -ésimos, $\bar{x}$ y $\bar{y}$ son sus valores promedios, $S_x = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$ y $S_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$ son los valores de sus desviaciones estándar respectivamente, y n es el número total de datos. Los valores de r_{xy} oscilan de 1 a -1, correspondiendo a una correlación positiva o negativa, respectivamente (McGibney, 2023). Un valor de correlación Pearson $r_{xy} = 0$ corresponde a la ausencia de correlación, $0 < |r_{xy}| < 0.25$ a correlación muy débil, $0.25 < |r_{xy}| < 0.5$ a correlación débil, $0.5 < |r_{xy}| < 0.75$ a correlación fuerte, $0.75 < |r_{xy}| < 1$ a correlación muy fuerte, y $|r_{xy}| = 1$ a correlación perfecta.

Con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$, se probó el siguiente juego de hipótesis, $H_0: r_{xy} = 0$ No existe relación lineal entre la variable de respuesta y la i -ésima variable explicativa, y $H_1: r_{xy} \neq 0$ Existe relación entre la variable de respuesta y la i -ésima variable explicativa, bajo el supuesto de la hipótesis nula donde la distribución muestral de correlaciones sigue una distribución t-Student con $n - 2$ grados de libertad.

Regresión lineal múltiple, RLM. La técnica estadística RLM se utiliza para determinar en qué medida la variable de respuesta puede ser explicada por variables explicativas o predictoras. Para un modelo estandarizado, suponiendo que la variable de respuesta es Y_i , el mejor predictor lineal a partir de las variables explicativas X_{1i} 's, es (Cohen et al. 2003, Di-Rienzo et al., 2005):

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \cdots + \beta_p X_{pi} + \varepsilon_i \quad (3)$$

donde Y_i es la variable de respuesta, β_0 es el intercepto estimado, $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$ son parámetros fijos desconocidos; $X_{1i}, X_{2i}, \dots, X_{pi}$ son variables explicativas con valores fijados por el investigador, y ε_i es una variable aleatoria inobservable (error aleatorio).

Se calcularon los coeficientes estandarizados, que son los resultantes de una regresión en la que se estandarizaron todas las variables y, en este sentido, una variable se considera más importante si su coeficiente de regresión estandarizado (β) es mayor en valor absoluto. Dado que los coeficientes β 's se basan en puntuaciones típicas, son directamente comparables, indicando cuánto cambiará la variable de respuesta por cada cambio de una unidad en la variable explicativa (manteniendo constante el resto de las variables explicativas; Cohen et al., 2003; Montero-Granados, 2016).

La bondad de ajuste de un modelo se mide por el coeficiente de determinación ajustado, $R^2_{ajustado}$, que oscila entre 0 y 1. Esto permite corregir el sesgo de la medida R^2 común, porque su valor no puede disminuir cuando se añade una nueva covariable al modelo, incluso si no está correlacionada con el resultado

(Heinzi & Mittlböck, 2019). Valores cercanos a uno indican que la mayor parte de la variabilidad en Y_i se explica mediante el modelo de regresión (Montgomery et al., 2012).

La RLM se basa en una serie de supuestos que deben cumplirse para considerar válido al modelo. Un supuesto es la Linealidad, donde la variable de respuesta debe estar relacionada linealmente con cada variable explicativa por separado, y con las variables explicativas colectivamente, lo que se comprueba con la Correlación e Independencia de los errores (independencia de las observaciones). Otro supuesto es la Normalidad, que se determina con el histograma de los residuos o el gráfico de probabilidad Q-Q acumulada observada/esperada según la normal o las pruebas de normalidad de Kolmogorov-Smirnov o Shapiro-Wilk. La Homocedasticidad de varianzas, es un supuesto donde la varianza de la distribución de probabilidad del error $[\varepsilon]$ debe ser constante para todos los valores de la variable independiente, lo que se comprueba con el diagrama de dispersión de los valores predichos tipificados contra los valores de los residuos tipificados o la prueba de Breusch-Pagan (Cohen et al. 2003; Montero-Granados, 2016).

Para determinar la presencia de multicolinealidad en las variables explicativas del modelo, se realizó el análisis de correlación lineal de Pearson, r (Schober et al., 2018, Sahu, 2024) y el factor de inflación de varianza, VIF (Akinwande et al., 2015, Sahu, 2024). El análisis de correlación lineal de Pearson y del factor de inflación de varianza se realizó empleando los paquetes corrplot (Wei & Simko, 2021) y usdm (Naimi et al., 2014) en R (R Core Team 2024). Se excluyeron aquellas variables correlacionadas $|r| > \sim 0.70$ (Booth et al., 1994) y con un VIF mayor que 4. Porque al inflar excesivamente los errores estándar, la multicolinealidad hace que algunas variables sean estadísticamente insignificantes cuando podrían ser significativos (Akinwande et al., 2015; O'Brien, 2007).

4.5 Resultados

4.5.1 Base de datos y selección de variables

En la investigación se analizaron 70 individuos de *Bursera bipinnata*, donde cada individuo fue georreferenciado, además se registraron cinco características dendrométricas, ocho del método de extracción y dos fisiológicas. También se registraron cuatro variables edafoclimáticas en cada uno de los árboles. En el Cuadro 2 se pueden observar los promedios que se registraron de las variables, que fue de 18.70 ± 5.84 cm para el diámetro del fuste, de 4.63 ± 1.02 m para la altura total, de 5.26 ± 1.46 m para el diámetro de copa, de 2.16 ± 0.81 m para la longitud de copa y de 36.39 ± 27.64 m³ para el volumen de copa entre los árboles analizados.

Cuadro 2. Estadísticos descriptivos de los parámetros dendrométricos.

Variable	Unidades	Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar	CV
Diámetro de fuste	cm	18.70	5.72	38.19	5.84	0.31
Altura total	m	4.63	1.70	7.70	1.02	0.22
Diámetro de copa	m	5.26	2.55	9.00	1.46	0.27
Longitud de copa	m	2.16	0.50	5.70	0.81	0.37
Volumen de copa	m ³	36.39	2.29	130.00	27.64	0.75

En el Cuadro 3 se puede apreciar que el promedio de la altitud donde se localizaron los árboles de *B. bipinnata* fue 1406.02 ± 31.21 m, el promedio del pH del suelo fue 7.06 ± 0.52 , el promedio de la conductividad eléctrica fue 173.13 ± 77.83 μ S, mientras que la temperatura promedio del suelo para el mes de septiembre fue 26.51 ± 1.74 °C.

Cuadro 3. Estadísticos descriptivos de los parámetros edafoclimáticos.

Variable	Unidades	Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar	CV
Altitud	m	1406.02	1339.00	1473.33	31.21	0.21

pH	$-\log_{10}[\text{H}^+]$	7.06	5.80	8.54	0.52	0.07
Conductividad eléctrica	μS	173.13	64.00	444.00	77.83	0.44
Temperatura del suelo	$^{\circ}\text{C}$	26.51	24.00	31.00	1.74	0.06

Las características fisiológicas se muestran en el Cuadro 4, donde se observa que el NDMI promedio de julio en los árboles de *B. bipinnata* fue 0.22 ± 0.04 y el NDMI promedio de agosto y octubre fue de 0.30 ± 0.02 y 0.11 ± 0.05 . El GCI promedio en los árboles en julio fue del 4.14 ± 0.42 , en agosto fue de 4.76 ± 0.46 , mientras que en octubre fue de 3.79 ± 0.47 .

Cuadro 4. Estadísticos descriptivos de los parámetros fisiológicos.

Variable	Unidades	Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar	CV
NDMI _{julio}	Adimensional	0.22	0.110	0.30	0.04	0.18
NDMI _{agosto}	Adimensional	0.30	0.250	0.35	0.02	0.06
NDMI _{octubre}	Adimensional	0.11	-0.004	0.24	0.05	0.45
GCI _{julio}	Adimensional	4.14	3.340	5.48	0.42	0.10
GCI _{agosto}	Adimensional	4.76	3.710	5.86	0.46	0.09
GCI _{octubre}	Adimensional	3.79	2.390	4.80	0.47	0.12

De acuerdo con el Cuadro 5, la mediana del número de caras resinadas en el fuste fue 0 con un rango de 2, del número de caras resinadas en las ramas fue 1 con rango de 4, mientras que del total de caras resinadas fue 1 con rango de 3. La altura promedio de las caras fue de 1.56 ± 0.66 m sobre el nivel del suelo, la longitud promedio fue de 15.64 ± 3.57 cm, la profundidad de incisión media fue de 5.97 ± 2.40 mm, el área media de caras de resinación en los árboles fue 56.77 ± 20.15 cm², y el área total promedio de resinación por árbol fue 90.72 ± 52.96 cm². Por otro lado, la producción promedio por árbol de *B. bipinnata* fue de 38.56 ± 50.44 g de resina.

Cuadro 5. Estadísticos descriptivos del método de extracción.

Variable	Unidades	Mediana	Mínimo	Máximo	Rango
Caras en el fuste	cantidad	0.00	0.00	2.00	2.00
Caras en ramas	cantidad	1.00	0.00	4.00	4.00

Caras totales	cantidad	1.00	1.00	4.00	3.00
Variable	Unidades	Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
Altura de la cara	m	1.56	0.40	3.72	0.66
Longitud de incisión	cm	15.64	5.00	25.00	3.57
Profundidad de incisión	mm	5.97	3.00	19.00	2.40
Área media de cara	cm ²	56.77	18.00	109.25	20.15
Área total de resinación	cm ²	90.72	18.00	285.00	52.69
Producción de resina	g	38.56	0	190.00	50.44

4.5.2 Coeficiente de correlación

Resultado de las correlaciones de variables (Cuadro 6), el diámetro del fuste, el diámetro de copa y el volumen de copa mostraron una correlación lineal débil positiva con la producción de resina, que fue estadísticamente significativa. Por el contrario, la altura total y la longitud de la copa no presentaron una correlación lineal con el rendimiento de resina.

Cuadro 6. Correlación entre los parámetros dendrométricos y el rendimiento de resina.

Variable	Coeficiente de correlación de Pearson	Sig.
Diámetro de fuste	0.314**	0.01
Altura total	0.171	0.16
Diámetro de copa	0.291*	0.02
Longitud de copa	0.213	0.08
Volumen de copa	0.287*	0.02
**La correlación es significativa en el nivel 0.01 (bilateral)		
*La correlación es significativa en el nivel 0.05 (bilateral)		

En el Cuadro 7 se muestra que la altitud fue la única variable que se correlacionó de manera muy débil y negativa con el rendimiento de resina. Puesto que, el pH, la conductividad eléctrica y temperatura del suelo no mostraron correlación lineal con el rendimiento de resina.

Cuadro 7. Correlación entre los parámetros edafoclimáticos y el rendimiento de resina.

Variable	Coefficiente de correlación de Pearson	Sig.
Altitud	-0.233*	0.05
pH	-0.127	0.30
Conductividad eléctrica	-0.016	0.89
Temperatura del suelo	-0.133	0.27
**La correlación es significativa en el nivel 0.01 (bilateral)		
*La correlación es significativa en el nivel 0.05 (bilateral)		

En el Cuadro 8, se puede observar que el índice de humedad de diferencia normalizada para el mes de octubre, $NDMI_{octubre}$ fue la única variable fisiológica que mostró una correlación lineal débil negativa con el rendimiento de resina, que fue estadísticamente significativa. Las variables $NDMI_{julio}$, $NDMI_{agosto}$, GCI_{julio} , GCI_{agosto} , $GCI_{octubre}$ no presentaron una correlación lineal.

Cuadro 8. Correlación entre los parámetros fisiológicos y el rendimiento de resina.

Variable	Coefficiente de correlación de Pearson	Sig.
$NDMI_{julio}$	-0.109	0.368
$NDMI_{agosto}$	-0.179	0.139
$NDMI_{octubre}$	-0.287*	0.016
GCI_{julio}	0.059	0.629
GCI_{agosto}	0.079	0.513
$GCI_{octubre}$	0.153	0.207
**La correlación es significativa en el nivel 0.01 (bilateral)		
*La correlación es significativa en el nivel 0.05 (bilateral)		

Entre los parámetros del método de extracción, la cara de resinación en el fuste presentó una correlación muy débil negativa, mientras que las caras de resinación en ramas, las caras de resinación total y del área total de resinación mostraron una correlación lineal fuerte positiva y significativa con el rendimiento de resina (Cuadro 9). La altura de la cara presentó una correlación lineal débil positiva con la producción de resina. Sin embargo, la longitud de incisión, la

profundidad de incisión y el área media de la cara de resinación no tuvieron correlación.

Cuadro 9. Correlación entre los parámetros productivos y el rendimiento de resina.

Variable	Coefficiente de correlación de Pearson	Sig.
Caras de resinación en el fuste	-0.232*	0.05
Caras de resinación en ramas	0.504**	< 0.001
Caras de resinación total	0.545**	< 0.001
Altura de la cara	0.324**	0.01
Longitud de incisión	-0.068	0.58
Profundidad de incisión	0.001	0.99
Área media de cara	0.149	0.22
Área total de resinación	0.552**	<0.001
**La correlación es significativa en el nivel 0.01 (bilateral)		
*La correlación es significativa en el nivel 0.05 (bilateral)		

4.5.3 Modelo de regresión lineal múltiple

El modelo de regresión lineal múltiple incluyó las variables área total de resinación, longitud de incisión y el índice de humedad de diferencia normalizada para el mes de octubre. Las tres variables fueron significativas para el modelo, que explicó 43.8 % de la variabilidad en el rendimiento de resina (Cuadro 10). De acuerdo con las pendientes de cada variable, el área total de resinación fue el factor más significativo para el rendimiento de resina, y su pendiente indica que la producción de resina aumenta con el incremento del área total de resina ($\hat{\beta}_1 = 0.649$). El segundo factor más importante para la producción de resina fue la longitud media de incisión, donde su pendiente indica que la producción de resina disminuye a medida que incrementa la longitud de la incisión ($\hat{\beta}_2 = -0.308$). Finalmente, el tercer factor más importante fue el $\text{NDMI}_{\text{octubre}}$, donde la producción de resina disminuye al aumentar el $\text{NDMI}_{\text{octubre}}$ ($\hat{\beta}_3 = -0.205$).

Cuadro 10. Primer modelo de regresión lineal para la producción de resina de copal.

	Estimador	Error Estándar	Valor-T	Pr > t
INTERCEPTO	1.579e-16	0.091	0.000	1.000
ATR	0.649	0.100	6.441	< 0.05***
LMI	-0.308	0.100	-3.075	0.003**
NDMIO	-0.205	0.093	-2.211	0.030*
Error residual estándar: 0.766 con 66 grados de libertad				
R-cuadrada Múltiple: 0.438 y R-cuadrada ajustada: 0.412				
Estadístico-F: 17.18 con 3 y 66 grados de libertad, valor-p: < 0.05				
Factor de Inflación de Varianza (VIF): ATR: 1.194; LMI: 1.185; NDMIO: 1.019.				

4.6 Discusión

4.6.1 Coeficiente de correlación

Variables Dendrométricas. La producción de resina de los árboles de *Bursera bipinnata* fue directamente proporcional al diámetro del fuste de los árboles aprovechados, es decir, la producción de resina aumentó al incrementar el diámetro del fuste. Dicho diámetro se ha reportado como el segundo factor más importante en la producción de resina en *B. bipinnata* y *B. copallifera* (Buendía-Espinoza et al., 2022). Entonces, el incremento del grosor del fuste, se puede relacionar con la disponibilidad de más canales resiníferos, es decir, mayor área total de canales de resina (Tolera et al., 2015). También, esta correlación puede atribuirse a que la albura constituye hasta el 72% del área basal del tallo en angiospermas tropicales, este componente es responsable del almacenamiento de reservas, así como de la conducción de savia, la conducción de minerales y del transporte de agua, el cual aumenta universalmente con el diámetro del tallo (Qiao et al., 2023; Meinzer et al., 2005). Oliva-Carrasco (2015) afirma que el almacenamiento interno de agua en los troncos de los árboles contribuye del 6 al 28% del suministro hídrico diario, siendo mayor la contribución de agua almacenada en especies de hoja caduca. Por lo tanto, al ser *B. bipinnata* una especie arbórea caducifolia, el almacén de reservas (carbono) y suministro hídrico (hidrógeno y oxígeno) de la albura puede contribuir a una mayor producción de resina. En *Boswellia dalzielii* y *Boswellia papyrifera* también se identificó un incremento en el rendimiento de resina asociado al mayor diámetro

de tronco, pero contrario a lo esperado el rendimiento se estabilizó con diámetros mayores a 20 en *Boswellia papyrifera* (Eshete et al., 2012; Sabo et al., 2022).

Los resultados indican que los árboles de *Bursera bipinnata* tienen una correlación lineal débil positiva entre el rendimiento de resina con el diámetro y volumen de copa, este resultado concuerda con Eltahir & Holi (2021), quienes encontraron que el rendimiento de goma aumentó con el incremento del diámetro de la copa en *Senegalia Senegal*. Esto puede atribuirse al hecho de que los árboles con mayor dimensión de copa, tienden a tener mayores áreas foliares (LA) lo que contribuye a una mayor absorción de luz que mejora la eficiencia del crecimiento (Binkley et., 2013). La cantidad y la eficiencia de la luz absorbida dependen de las dimensiones del dosel y de las características de las hojas (conductancia estomática, potencial hídrico y componentes químicos) que están relacionados de manera positiva con las tasas de crecimiento (Li et al., 2017), y la asimilación de carbono (C) mediante la fotosíntesis y transpiración (Wright et al., 2004). Por lo que, el área foliar dada por el tamaño del dosel, influye en la producción de carbohidratos no estructurales, esenciales para la síntesis de compuestos bioactivos especializados (compuestos fenólicos y terpenoides), constituyentes de las resinas, utilizados en la defensa contra estrés ambiental, estrés biótico, recuperación post estrés y restauración del crecimiento (Langenheim, 2003; Piper & Paula, 2020).

Variables edafoclimáticas. La producción de resina de los árboles de *B. bipinnata* disminuyó al aumentar la altitud, ya que los gradientes altitudinales influyen tanto en la temperatura y las precipitaciones, como en las propiedades del suelo. Por lo que, el gradiente de altitud influye en los procesos fisiológicos de las plantas, afectando la absorción de carbono, la disponibilidad de agua (Pernicová et al., 2022) y por ende, la producción de compuestos bioactivos especializados constituyentes de las resinas. Otro fenómeno descrito por Bresson et al. (2009), es que las plantas situadas a menor altitud presentan tasas de transpiración y conductancias estomáticas más bajas que las situadas a mayor altitud, porque poseen mayor eficiencia en el uso del agua (carbono

asimilado por unidad de agua perdida. Por otro lado, la exposición al viento es mayor al incrementar la altitud, causando perturbación física del dosel vegetal y alterando la tasa de transpiración, lo que también afecta la fotosíntesis a través de cambios en la conductancia estomática y la temperatura de las hojas (Burgess et al., 2016). En contraste con estos resultados, Mengistu (2011) reportó que los árboles de *Boswellia* situados a mayor altitud incrementan su capacidad fotosintética debido a una mayor exposición a la luz, lo que favorece la acumulación anual de carbono en las copas. Por lo tanto, las repuestas de diversas especies al estrés por factores relacionados a la altitud, si afectan su capacidad fotosintética, en consecuencia, su capacidad de producción de resina, como en el caso de *B. bipinnata*.

Variables Fisiológicas. El rendimiento de resina medido al final de la temporada, se correlacionó de forma negativa con el índice de humedad de diferencia normalizada en el mes de octubre, es decir, el último mes de extracción. Un incremento en este índice implicó una disminución en el rendimiento de resina. Debido a la respuesta fisiológica de reasignación de recursos en los árboles bajo condiciones restrictivas, es decir, mayor almacenamiento de agua y la reducción de la actividad fotosintética y biosíntesis de resina. Puesto que los valores obtenidos de NDMI en los meses de julio, agosto y octubre corresponden a estrés hídrico severo (EOS Data Analytics, 2024; Sentinelhub, 2024), ya que la precipitación en el mes de julio fue de 8 mm, en agosto fue 1.8 mm, en septiembre fue 6 mm y en octubre fue 10 mm (SMN, 2024). Este evento de sequía constituyó un factor de estrés abiótico por déficit hídrico y alta temperatura. Lo que pudo alterar el flujo de agua en el xilema y provocar cavitación, donde las embolias resultantes limitan la capacidad de la planta para conducir agua, por lo tanto, limitan también el crecimiento y otras funciones fisiológicas (Rice et al., 2004). Mientras que el estrés por calor pudo disminuir—la tasa neta de asimilación fotosintética de CO₂, debido a una reducción de la tasa de transporte de electrones del cloroplasto (fotosistema II), la desactivación de la ribulosa-1-5-bifosfato carboxilasa oxigenasa (RuBisCO), y la reducción de la respiración celular (Scafaro et al., 2023; Zhao et al., 2021). De acuerdo con Georgieva &

Vassileva (2023), la combinación de sequía y estrés térmico tiene un impacto negativo significativamente mayor sobre el crecimiento y la productividad, en comparación con cada uno de los factores de estrés aplicados individualmente.

Por lo que, a pesar del incremento relativo en la precipitación en octubre, el valor del NDMI para este mes fue mucho menor (0.11 ± 0.05) que en los meses de julio (0.22 ± 0.04) y agosto (0.30 ± 0.02), debido a que los árboles pudieron priorizar la sobrevivencia sobre el crecimiento y producción de resina, mediante la acumulación de solutos en las vacuolas (ajuste osmótico) que, entre otros mecanismos, desvía fotosintatos del crecimiento a la tolerancia o aclimatación (Harfouche et al., 2014). Por lo que la reducción del rendimiento de resina bajo condiciones restrictivas coincide con Rissanen (2019) quien afirma que el flujo y la presión de resina no son características estáticas, ya que fluctúan acorde a la disponibilidad de agua y las relaciones hídricas del árbol. De forma análoga, en *Commiphora wightii* se presentó una reducción del rendimiento de resina entre el 11% y el 20% cuando la humedad del suelo se redujo del 30 % al 10% y 15% (Samanta et al., 2012). Ballal et al. (2005) y Das et al. (2014) también encontraron que árboles de *Senegalia senegal* y *Acacia nilótica* producían más goma cuando las precipitaciones aumentaban.

Variables del método de extracción. Los resultados del estudio también indicaron que el rendimiento de resina en *B. bipinnata* aumenta de manera positiva con el número de caras de resinación en ramas, el número total de caras de resinación, y el área total de resinación. Por otro lado, la producción se reduce respecto al número de caras de resinación en el fuste. El incremento de producción respecto al área total de resinación (conjunto total de incisiones en ramas y fuste por el área media de resinación), coincide con los resultados encontrados por Sabo et al. (2022), quienes señalan que la producción de resina en árboles de *Boswellia dalzielii* aumentó cuando el número de incisiones incrementan desde dos hasta 10 ranuras por árbol. Esta relación entre la intensidad del daño tisular y el rendimiento de resina, se debe a que evolutivamente la producción de resina es un mecanismo de defensa (constitutivo

e inducido) contra herbívoros, debido a son la principal causa de las lesiones en los tejidos de las plantas (Koo, 2018). Por lo que el incremento en la secreción en *B. bipinnata* responde a la demanda de protección ante las lesiones hechas por las incisiones para promover la producción de resina, lo que permite defenderse también de posibles infecciones por hongos, bacterias y otros microorganismos (Becerra et al., 2001; De-Carlo et al., 2019). En contraste, Negussie et al. (2021) halló en árboles de *Boswellia papyrifera* que más de 12 incisiones genera una disminución en la calidad y rendimiento de resina. Por lo que el nivel de tolerancia respecto a la intensidad del daño tisular, debe establecerse para cada especie y para cada región, con la finalidad de evitar que el estrés excesivo y recurrente afecte sus procesos fisiológicos básico, como el crecimiento, desarrollo y reproducción.

En el proceso de extracción de este producto forestal no maderable, las incisiones tienen como objetivo dañar las estructuras secretoras de *B. bipinnata*, las cuales de acuerdo con García-Pineda (1988), están localizadas entre la peridermis ($198\ \mu$) y el cambium ($39\ \mu$), es decir, al floema conductor ($351\ \mu$) y al floema no conductor. Cuando estos conductos se rompen se produce una disminución de la presión en el extremo abierto, esto genera un gradiente de presión del conducto que permite la salida de resina; el flujo finaliza cuando deja de cargarse el conducto al alcanzar el equilibrio entre la presión del epitelio y la presión del conducto, lo que coincide con el cierre de la incisión al solidificarse la resina (Cabrita, 2019). Se observó que la variable; caras de resinación en el fuste presentó una correlación negativa respecto al rendimiento, mientras que la variable caras de resinación en las ramas presentó una correlación positiva fuerte, lo anterior debido a que en su mayoría las caras se ubican en las ramas, puesto que de esta forma se generan más incisiones y en consecuencia un mayor rendimiento de resina en comparación con el fuste.

Asimismo, el rendimiento de resina también incrementó al aumentar la altura de las caras de resinación, porque la mayoría de las caras de resinación se localizan en las ramas y contribuyen a una mayor superficie resinífera. También en

Boswellia papyrifera se obtuvo un mejor rendimiento de resina entre 100 cm (Cherenet et al., 2020) y 150 cm de altura de las incisiones (Hassan-Ali et al., 2009). Sin embargo, en *Commiphora wightii* se encontró que para maximizar el rendimiento se necesitan múltiples perforaciones en diferentes alturas (tronco principal, rama primaria, rama secundaria y rama terciaria; Samanta et al., 2016).

4.6.2 Modelo de regresión lineal múltiple

El modelo de regresión lineal múltiple obtenido explicó el 43.8% de la variabilidad en el rendimiento de resina de *B. bipinnata*, a partir de las variables del método de extracción: Área total de resinación (ATR) y longitud media de la incisión (LMI), así como de la variable fisiológica: Índice de humedad de diferencia normalizada en el mes de octubre ($NDMI_{Octubre}$). La variable más importante fue el área total de resinación, es decir, la intensidad del daño tisular inducido durante los tres meses de aprovechamiento. Esto porque las incisiones se realizaron a una profundidad media de 5.97 ± 2.40 mm y dañaron los canales resiníferos entre la peridermis ($198 \mu\text{m}$) y el cambium ($39 \mu\text{m}$), provocando así que los árboles de *B. bipinnata* segregaran más resina en un intento de defenderse química y físicamente (Becerra et al., 2001; De-Carlo et al., 2019; García-Pineda, 1988). Las incisiones se realizaron cada tres días tras la solidificación de la resina sobre la incisión y el equilibrio de las presiones epiteliales y del conducto (Cabrita, 2019). De forma similar, Sabo et al. (2022) y Eshete et al. (2012) encontraron que la intensidad de ranuras incrementaba la producción de resina de *Boswellia*, pero no por encima de una intensidad de ranuras de 6 a 9, mientras que Das et al. (2014) encontraron también que el rendimiento de goma de *Acacia nilótica* aumentaba con la intensidad de golpeo.

El segundo factor más importante fue la longitud de incisión, la cual, cuando aumenta, disminuye el rendimiento de resina. Esto se debe a que los árboles de *B. bipinnata* presentan un crecimiento radial irregular, tanto en el fuste como en las ramas, conocidos entre los copaleros como venas, que es donde se realizan

las incisiones. Las cuales reflejan una mayor formación de xilema y de floema (Prislan et al., 2013), lo que puede contribuir a una mayor presencia de canales resiníferos. A medida que la incisión incrementa en longitud sale de estas zonas de mayor crecimiento. Puesto que en este trabajo las incisiones tuvieron una longitud media de 15.6 ± 3.57 cm, alcanzado los 25 cm de diámetro, en función del diámetro del tallo o de la rama.

Por otro lado, los canales axiales, radiales y tangenciales forman una red tridimensional en el floema conductor y no conductor que funciona como una red de drenaje que, cuando se daña, drenan la resina del mismo depósito, es decir, de la parte intacta de la corteza interna (García-Pineda, 1988; Suárez-Ramos y Engleman, 1982; Tolera et al., 2013). Finalmente, si la diferencia de presión entre el epitelio y el conducto es responsable de impulsar la salida de resina Cabrita (2019), este diferencial de presión podría disminuir a medida que aumenta el número de conductos afectados, puesto que estos forman parte de una misma red tridimensional. Prasad et al. (2016) encontraron que incisiones de 1 cm de largo proporcionaron mejor rendimiento en *Butea monosperama* en comparación con incisiones de 2 cm y 3 cm. En contraste, Saini et al. (2018) hallaron que el rendimiento de la goma aumentaba al incrementar el tamaño del corte de 1 a 4 cm en *Commiphora wightii*. López-Álvarez et al. (2023) también encontraron en especies de *Pinus* que la amplitud y la longitud de la incisión afectan el rendimiento de resina.

El tercer factor importante fue la disponibilidad de agua, medido a través de la humedad de las hojas del dosel en el mes de octubre, ($NDMI_{Octubre}$), el último mes de aprovechamiento. De modo que, al aumentar el valor de NDMI genera una reducción en el rendimiento de resina, esto en un contexto de sequía. Puesto que la precipitación en el periodo de aprovechamiento fue de tan solo 17.8 mm (SMN, 2024), por lo que los valores de NDMI calculados desde julio a octubre indicaron estrés hídrico severo en los árboles aprovechados (EOS Data Analytics, 2024; Sentinelhub, 2024). Por lo que, a pesar de un ligero incremento en la precipitación en el mes de octubre, este no se reflejó en el contenido de humedad

de las hojas, posiblemente debido a la respuesta fisiológica de reasignación de recursos en los árboles bajo condiciones restrictivas, es decir, mayor almacenamiento de agua, la reducción de la actividad fotosintética (Scafaro et al., 2023; Zhao et al., 2021) y biosíntesis de resina. Priorizando de esta forma su sobrevivencia, en términos de tolerancia o aclimatación (Harfouche et al., 2014) sobre el crecimiento y la defensa contra el daño tisular. Además, el déficit hídrico inducido por sequía, al provocar cavitación, limita la capacidad de conducir agua en las plantas (Rice et al., 2004), lo que afecta el potencial hídrico local y en consecuencia la presión del epitelio y de los conductos resiníferos (Cabrita, 2019; Rissanen, 2019). En contraste, la disponibilidad de agua en suficiencia, relacionado con la precipitación tiene efectos positivos en el rendimiento de resinas y gomas, como es el caso de *Commiphora wightii*, *Senegalia Senegal*, *Acacia nilotica* y *Pinus*, (Ballal et al., 2005; Das et al., 2014; López-Álvarez et al., 2023; Samanta et al., 2012).

4.7 Conclusiones

El rendimiento de resina en *Bursera bipinnata* está influenciado por un conjunto de factores dendrométricos, edafoclimáticos, fisiológicos y del método de extracción. La correlación positiva entre el diámetro del fuste, el tamaño del dosel y la producción de resina destaca la importancia de las características estructurales como la presencia de canales resiníferos, almacenamiento de agua, carbohidratos, así como la eficiencia fotosintética y la producción de carbohidratos no estructurales. Factores edafoclimáticos como la altitud y el déficit hídrico durante periodos de sequía severa afectan negativamente la producción, priorizando los árboles su supervivencia mediante ajustes osmóticos y reducción de la biosíntesis de resina. El modelo de regresión lineal múltiple mostró que la intensidad del daño tisular (área total de resinación) es el factor más relevante para el rendimiento, sin embargo, debe manejarse con precaución para evitar efectos adversos sobre los procesos fisiológicos básicos del árbol. Finalmente, estos resultados enfatizan la necesidad de una visión integral en la extracción de resina, por un lado, la selección árboles de mayor tamaño, su extracción bajo condiciones no restrictivas y la moderación en intensidad del daño tisular, que permita balancear la extracción de resina y la supervivencia de esta especie estructural, con ello garantizar un aprovechamiento sostenible.

4.8 Literatura citada

- Abad-Fitz, I. (2019). *Manejo de los copales y consecuencias fisiológicas de la selección humana en poblaciones de Bursera bipinnata (DC.) Engl., en el sureste de Morelos, México* [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma del Estado de Morelos]. Colección Tesis Postgrado. <http://riaa.uaem.mx/handle/20.500.12055/914>
- Abad-Fitz, I., Maldonado-Almanza, B., Aguilar-Dorantes, K. M., Sánchez-Méndez, L., Gómez-Caudillo, L., Casas, A., Blancas, J., García-Rodríguez, Y. M., Beltrán-Rodríguez, L., Sierra-Huelsz, J. A., Cristians, S., Moreno-Calles, A. I., Torres-García, I., & Espinosa-García, F. J. (2020). Consequences of traditional management in the production and quality of copal resin (*Bursera bipinnata* (Moc. & Sessé ex DC.) Engl.) in Mexico. *Forests* 11(9), 1-24. <https://doi.org/10.3390/f11090991>
- Akinwande, M. O., Dikko, H. G., & Samson, A. (2015). Variance inflation factor: as a condition for the inclusion of suppressor variable (s) in regression analysis. *Open journal of statistics*, 5(07), 754. <https://doi.org/10.4236/ojs.2015.57075>
- Ballal, M. E., El-Siddig, E. A., Elfadl, M. A., & Luukkanen, O. (2005). Gum arabic yield in differently managed *Acacia senegal* stands in western Sudan. *Agroforestry Syst*, 63, 237-245. <https://doi.org/10.1007/s10457-005-4162-x>
- Becerra, J. X., Venable, D. L., Evans, P. H., & Bowers, W. S. (2001). Interactions between chemical and mechanical defenses in the plant genus *Bursera* and their implications for herbivores. *American Zoologist*, 41(4), 865–876. <https://doi.org/10.1093/icb/41.4.865>
- Binkley, D., Campoe, O. C., Gspaltl, M., & Forrester, D. I. (2013). Light absorption and use efficiency in forests: Why patterns differ for trees and stands. *Forest ecology and management*, 288, 5-13. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.11.002>
- Booth, G. D., Niccolucci, M. J., & Schuster, E. G. (1994). *Identifying proxy sets in multiple linear regression: An aid to better coefficient interpretation*. U S Departament of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station.
- Bresson, C. C., Kowalski, A. S., Kremer, A., & Delzon, S. (2009). Evidence of altitudinal increase in photosynthetic capacity: gas exchange measurements at ambient and constant CO₂ partial pressures. *Ann. For. Sci.*, 66, 505 <https://doi.org/10.1051/forest/2009027>
- Buendía-Espinoza, J. C., Martínez-Ochoa, E. C., García-Nuñez, R. M., Arrazate-Jiménez, S. C., & Sánchez-Vélez, A. (2022). Prediction of Resin Production in Copal Trees (*Bursera* spp.) Using a Random Forest Model. *Sustainability*, 14(13), 1-13. <https://doi.org/10.3390/su14138047>

- Burgess, A. J., Retkute, R., Preston, S. P., Jensen, O. E., Pound, M. P., Pridmore, T. P., & Murchie, E. H. (2016). The 4-dimensional plant: effects of wind-induced canopy movement on light fluctuations and photosynthesis. *Frontiers in plant science*, 7, 217696. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01392>
- Cabrita, P. (2019). A Model for Resin Flow. En: Ramawat, K., Ekiert, H., Goyal, S. (Eds.) *Plant Cell and Tissue Differentiation and Secondary Metabolites*. Reference Series in Phytochemistry. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-11253-0_5-1
- Cadena-Iñiguez, P., Reynoso-Santos, R., Hernández-Ramos, J., Muñoz-Flores, H. J., & Cruz-Santos, E. (2019). Transfer of a predictive model for the production of pine resin *Pinus* spp a small producers in Ejido Jorge de la Vega Domínguez, Cintalapa, Chiapas. *International Journal of Agriculture, Environment and BioResearch*, 4(4). <https://doi.org/10.35410/IJAEB.2019.4414>
- Cherenet, E., Abiyu, A., Ambachew, G., Kibruyesfa, S., & Tatek, D. (2020). Tapping height and season affect frankincense yield and wound recovery of *Boswellia papyrifera* trees. *Journal of Arid Environments*, 179, 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104176>
- Choen, J., Choen, P., West, S. G., & Aiken, S. (2003). *Applied Multiple Regression/Correlation Analysis for the Behavioral Sciences*. LAWRENCE ERLBAUM ASSOCIATES, PUBLISHERS.
- Corral-Rivas, S., Silva-Antuna, A. M., & Quiñonez-Barraza, G. (2019). Modelo generalizado no-lineal altura-diámetro con efectos mixtos para siete especies de *Pinus* en Durango, México. *Revista Mexicana De Ciencias Forestales*, 10(53). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i53.500>
- Cruz-Cruz, M., Antonio-Gómez, V. M., Rodríguez-Ortíz, G., Vásquez-Barranco, I. G., Lagunes-Rivera, L. & Hernández-Santiago, E. (2017). Resinas y aceites esenciales de tres especies de copal del sur de Oaxaca, México. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 4(1), 12-23.
- Cruz-León, A., Salazar-Martínez, L., & Campos-Orsno, M. (2006). Antecedentes y actualidad del aprovechamiento de copal en la Sierra de Huautla, Morelos. *Geografía Agrícola*, 37, 97-115.
- Das, I., Katiyar, P., & Raj, A. (2014). Effects of temperature and relative humidity on ethephon induced gum exudation in *Acacia nilotica*. *Asian Journal of Multidisciplinary Studies*, 2(10), 114-116.
- De-Carlo, A., Dosoky, N. S., Satyal, P., Sorensen, A., & Setzer, W. N. (2019). The essential oils of the *Burseraceae*. En: S. Malik (Ed.). *Essential Oil Research. Trends in Biosynthesis, Analytics, Industrial Applications and Biotechnological Production*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-16546-8_4

- Di-Rienzo, J. A., Casanoves, F., Gonzalez, L. A., Tablada, E. M., Díaz, M. P., Robledo, C. W., & Balzarini, M. G. (2005). *Estadística para las Ciencias Agropecuarias*. Universidad Nacional de la Plata.
- Dirzo, R., & Ceballos, G. (2010). Las selvas secas de México: Un reservorio de biodiversidad y laboratorio vivo. En: G. Ceballos, A. García, E. Espinoza, C. J. Bezaury & R. Dirzo (Eds.), *Diversidad, amenazas y áreas prioritarias para la conservación de las selvas del Pacífico de México* (pp. 13-20). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Eltahir, M. E. S., & Holli, R. H. S. (2021). Assessing gum yield from *Acacia senegal* during its Peak Picking in relation to Growth Attributes. *Discovery Agriculture*, 7(17), 138-145.
- EOS Data Analytics. (2024). NDMI: Índice De Humedad De Diferencia Normalizada. <https://eos.com/es/make-an-analysis/ndmi/#:~:text=El%20%C3%8Dndice%20de%20Humedad%20de,estr%C3%A9s%20h%C3%ADrico%20en%20los%20cultivos>.
- Eshete, A., Sterck, F. J., & Bongers, F. (2012). Frankincense production is determined by tree size and tapping frequency and intensity. *Forest Ecology and Management*, 274, 136-142. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.02.024>
- Gao, B. C. (1996). NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote sensing of environment*, 58(3), 257-266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
- García-Pineda, M. O. (1988). *Descripción anatómica de la corteza de seis especies del género Bursera*. [Tesis Profesional, Universidad Autónoma de México]. Repositorio Institucional de la UNAM. <https://repositorio.unam.mx/>
- Georgieva, M., & Vassileva, V. (2023). Stress Management in Plants: Examining Provisional and Unique Dose-Dependent Responses. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(6), 5105. <https://doi.org/10.3390/ijms24065105>
- Gitelson, A. A., Viña, A., Ciganda, V., Rundquist, D. C., & Arkebauer, T. J. (2005). Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. *Geophysical research letters*, 32(8). <https://doi.org/10.1029/2005GL022688>
- Härdtle, W., Von Oheimb, G., Friedel, A., Meyer, H., & Westphal, C. (2004). Relationship between pH-values and nutrient availability in forest soils—the consequences for the use of ecograms in forest ecology. *Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 199(2), 134-142. <https://doi.org/10.1078/0367-2530-00142>
- Harfouche, A., Meilan, R., & Altman, A. (2014). Molecular and physiological responses to abiotic stress in forest trees and their relevance to tree improvement. *Tree Physiology*, 34 (11), 1181–1198. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpu012>

- Hassan-Ali, A., Kamal, E. M. F., & Musa-Adam, I. (2009). Effect of position of tapping, tree stem diameter and tapping tools on frankincense yield of *Boswellia papyrifera* in South Kordofan State, Sudan. *Forests, Trees and Livelihoods*, 19(1), 19-26. <https://doi.org/10.1080/14728028.2009.9752651>
- Heinzi, H., & Mittlböck, M. (2002). Adjusted R² Measures for the Inverse Gaussian Regression Model. *Computational Statistics*, 17, 525–544. <https://doi.org/10.1007/s001800200125>
- Hernández-Barrios, J. C., Anten, N. P. R., & Martínez-Ramos, M. (2015). Sustainable harvesting of non-timber forest products based on ecological and economic criteria. *Journal of Applied Ecology*, 52(2), 389–401. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12384>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. INEGI. (2015). Guía para la interpretación de cartografía: Uso del suelo y vegetación: Escala 1:250 000 Serie V. INEGI. México.
- IUSS Working Group WRB. (2015). Base referencial mundial del recurso suelo 2014, Actualización 2015. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. Informes sobre recursos mundiales de suelos 106. FAO.
- Jiménez-González, A., Pincay-Alcivar, F. A., Ramos-Rodríguez, M. P., Mero-Jalca, O. F., & Cabrera Verdesoto, C. A. (2017). Utilización de productos forestales no madereros por pobladores que conviven en el bosque seco tropical. *Revista Cubana De Ciencias Forestales*, 5(3), 270–286.
- Jungqvist, G., Oni, S. K., Teutschbein, C., & Futter, M. N. (2014). Effect of climate change on soil temperature in Swedish boreal forests. *PloS one*, 9(4), e93957. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0093957>
- Kelil, S., & Taye, S. (2023). Effect of tapping on gum and incense yield of selected trees species in elwaye and Dhas districts, Borana zone, Southern Oromia. *East African Journal of Forestry and Agroforestry*, 6(1), 211-226. <https://doi.org/10.37284/eajfa.6.1.1334>
- Khan, A. L., Al-Harrasi, A., Shahzad, R., Imran, Q. M., Yun, B. W., Kim, Y. H., Kang, S. M., Al-Rawahi, A., & Lee, I. J. (2018). Regulation of endogenous phytohormones and essential metabolites in frankincense-producing *Boswellia sacra* under wounding stress. *Acta Physiologiae Plantarum*, 40(113), 1-11. <https://doi.org/10.1007/s11738-018-2688-6>
- Koo, A. J. (2018). Metabolism of the plant hormone jasmonate: A sentinel for tissue damage and master regulator of stress response. *Phytochem Rev* 17, 51–80. <https://doi.org/10.1007/s11101-017-9510-8>
- Langenheim, J. H. (2003). *Plant resins: Chemistry, evolution, ecology and ethnobotany*. Timber Press.

- Li, Y., Kröber, W., Bruelheide, H., Härdtle, W., & Von Oheimb, G. (2017). Crown and leaf traits as predictors of subtropical tree sapling growth rates. *Journal of Plant Ecology*, 10(1), 136-145. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtw041>
- Linares, E., & Bye, R. (2008). El copal en México. *Biodiversitas*. 78, 8-11.
- López-Álvarez, O., Zasb, R., y Marey-Pérez, M. (2023). Resin tapping: A review of the main factors modulating pine resin yield. *Industrial Crops & Products*, 202, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117105>
- McGibney, D. P. (2023). *Applied Linear Regression for Business Analytics with R. A practical Guide to Data Science with Case Studies*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-21480-6>
- Medina-Lemos, R. (2008). Fascículo 66. *Burseraceae*. En: *Flora del valle de Tehuacán-Cuicatlán* (pp. 1-76). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Meinzer, F. C., Bond, B. J., Warren, J. M., & Woodruff, D. R. (2005). Does water transport scale universally with tree size? *Functional Ecology*, 19, 558-565. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2005.01017.x>
- Mena-Jiménez, F. (2018). *Estrategias ecológicas y culturales para garantizar la disponibilidad de productos forestales no maderables: Árboles medicinales en la Selva Baja del Sur de Morelos* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma del Estado de Morelos]. Colección Tesis Postgrado. <http://riaa.uaem.mx/handle/20.500.12055/402>
- Mengistu, W. T. (2011). *Physiological ecology of the frankincense tree* [Tesis Doctoral, Wageningen University & Research]. WUR Library. <https://www.wur.nl/es/publication-details.htm?publicationId=publication-way-343036383936>
- Mesa-Sierra, N., Peña-Domene, M., Campo, J., & Giardina, C. P. (2022). Restoring mexican tropical dry forests: a national review. *Sustainability*, 14(7). <http://dx.doi.org/10.3390/su14073937>
- Montero-Granados, R. (2016). *Modelos de regresión lineal múltiple*. Universidad de Granada. España. Disponible en: https://www.ugr.es/~montero/matematicas/regresion_lineal.pdf
- Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2012). *Introduction to Linear Regresión Analysis*. John Wiley & Sons, Inc.
- Montúfar-López, A. (2016). Copal de *Bursera bipinnata*. Una resina mesoamericana de uso ritual. *Trace*, 70, 45-78.
- Muñoz-Flores, H. J., Hernández Ramos, J., Sáenz-Reyes, J. T., Reynoso-Santos, R., & Barrera-Ramírez, R. (2022). Modelos predictivos de producción de resina en *Pinus pseudostrobus* Lindl., en Michoacán, México. *Revista Mexicana De Ciencias Forestales*, 13(73), 128–154. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i73.1188>

- Naimi, B., Hamm, N. A., Groen, T. A., Skidmore, A. K., & Toxopeus, A. G. (2014). Where is positional uncertainty a problem for species distribution modelling? *Ecography*, 37(2), 191-203. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2013.00205.x>
- Negussie, A., Gebrehiwot, K., Yohannes, M., Norgrove, L., & Aynekulu, E. (2021). Continuous resin tapping for frankincense harvest increases susceptibility of *Boswellia papyrifera* (Del.) Hochst trees to longhorn beetle damage. *Heliyon*, 7(2), 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06250>.
- Nguy-Robertson, A. L., Peng, Y., Gitelson, A. A., Arkebauer, T. J., Pimstein, A., Herrmann, I., Karnieli, A., Rundquist, D. C., & Bonfil, D. J. (2014). Estimating green LAI in four crops: Potential of determining optimal spectral bands for a universal algorithm. *Agricultural and forest meteorology*, 192, 140-148. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.03.004>
- O'brien, R. M. (2007). A caution regarding rules of thumb for variance inflation factors. *Quality & quantity*, 41, 673-690. <https://doi.org/10.1007/s11135-006-9018-6>
- Okon, O. G. (2019). Effect of salinity on physiological processes in plants. In B. Giri, A. Varma (Eds), *Microorganisms in saline environments: strategies and functions* (pp. 237-262). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-18975-4_10
- Oliva-Carrasco, L., Bucci, S. J., Di-Francescantonio, D., Lezcano, O. A., Campanello, P. I., Scholz, F. G., Rodríguez, S., Madanes, N., Cristiano, P. M., Hao, G. Y., Holbrook, N. M., & Goldstein, G. (2015). Water storage dynamics in the main stem of subtropical tree species differing in wood density, growth rate and life history traits. *Tree physiology*, 35(4), 354-365. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpu087>
- Parihar, P., Singh, S., Singh, R., Singh, V. P., & Prasad, S. M. (2015). Effect of salinity stress on plants and its tolerance strategies: a review. *Environmental science and pollution research*, 22, 4056-4075. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3739-1>
- Pernicová, N., Urban, O., Čáslavský, J., Kolář, T., Rybníček, M., Sochová, I., Pañuelas, J., Bosela, M., & Trnka, M. (2024). Impacts of elevated CO₂ levels and temperature on photosynthesis and stomatal closure along an altitudinal gradient are counteracted by the rising atmospheric vapor pressure deficit. *Science of The Total Environment*, 171173. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171173>
- Piper, F. I., & Paula, S. (2020). The role of nonstructural carbohydrates storage in forest resilience under climate change. *Current Forestry Reports*, 6, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s40725-019-00109-z>
- Prasad, R., Singh, P., Tripathi, V. D., Shukla, A., Handa, A. K., Alam, B., Singh, R., & Chaturvedi, O. P. (2016). Standardization of gum tapping techniques for *Butea monosperma* L. Effect of types and depth of incision on gum

- exudation. *Indian Journal of Agroforestry*, 18(2), 86–90.
<https://epubs.icar.org.in/index.php/IJA/article/view/103215>
- Prislan, P., Gričar, J., De-Luis, M., Smith, K. T., & Čufar, K. (2013). Phenological variation in xylem and phloem formation in *Fagus sylvatica* from two contrasting sites. *Agricultural and forest meteorology*, 180, 142-151.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.06.001>
- Purata-Velarde, S. E., & León-Martínez, M. (2005). *La riqueza de los bosques mexicanos: más allá de la madera. Experiencias de comunidades rurales*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Purata-Velarde, S. E., & León-Martínez, M. (2008). La colecta de resina. En: S. E. Purata-Velarde (Ed.), *Uso y manejo de los copales aromáticos: Resinas y aceites* (pp. 17-20). México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Qiao, Y., Yang, S. I., Hao, Y., Miao, Z., Dong, L., & Li, F. (2023). Quantifying the Profiles of Heartwood, Sapwood, and Bark Using a Seemingly Unrelated Mixed-Effect Model for *Larix Olgensis* in Northeast China. *Forests*, 14(6),
<https://doi.org/10.3390/f14061216>
- Quiroz-Carranza, J. A., & Magaña-Alejandro, M. A. (2015). Resinas naturales de especies vegetales mexicanas: usos actuales y potenciales. *Madera y Bosques*, 21(3), 171-183. ISSN: 1405-0471.
- R Core Team. (2024). *R: A language and environment for statistical computing* (Versión 4.4.1) [Software]. R Foundation for Statistical Computing.
<https://www.r-project.org/>
- Reyes-Ramos, A., Cruz de León, J., Martínez-Palacios, A., Marc-Lobit, P. C., Ambríz-Parra, J. E., & Sánchez-Vargas, N. M. (2019). Caracteres ecológicos y dendrométricos que influyen en la producción de resina en *Pinus oocarpa* de Michoacán, México. *Madera y Bosques*, 25(1), 1-13.
<https://doi.org/10.21829/myb.2019.2511414>
- Rice, K. J., Matzner, S. L., Byer, W., & Brown, J. R. (2004). Patterns of tree dieback in Queensland, Australia: the importance of drought stress and the role of resistance to cavitation. *Oecologia* 139, 190–198.
<https://doi.org/10.1007/s00442-004-1503-9>
- Rissanen, K. (2019). Scots pine resin and BVOC emissions in relation to tree water dynamics. *Dissertationes Forestales*, 283, 48.
<https://doi.org/10.14214/df.283>
- Rojó-Martínez, G. E., Jasso-Mata, J., Vargas-Hernández, J. J., Velázquez-Martínez, A., & Palma-López, D. (2003). Predicción de la producción de látex en plantaciones comerciales de hule (*Hevea brasiliensis* MÜLL. ARG.) en Oaxaca, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 26(3).
<https://doi.org/10.35196/rfm.2003.3.183>
- Rzedowski, J. (1992). *Flora del Bajío y regiones adyacentes: Familia Burseraceae*. Instituto de Ecología A.C.

- Rzedowski, J., & Calderón de Rzedowski, G. (2013). Datos para la apreciación de la flora fanerogámica del bosque tropical caducifolio de México. *Acta botánica mexicana*, (102), 1-23.
- Rzedowski, J., Medina-Lemus, R., & Calderón de Rzedowski, G. (2004). Las especies del género *Bursera* (*Burseraceae*) en la cuenca superior del río Papaloapan (México). *Acta botánica Mexicana*, 66, 23-151. <https://doi.org/10.21829/abm66.2004.970>
- Sabo, P., Salako, K. V., Kakaï, R. G., & Trees, A. O. (2022). Combined effects of tree size and tapping techniques on resin production of *Boswellia dalzielii* Hutch., an African frankincense tree. *Trees*, 36, 1697–1710. <https://doi.org/10.1007/s00468-022-02320-1>
- Sahu, S. K. (2024). *Introduction to Probability, Statistics & R*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-37865-2>
- Saini, L. S., Rajput, S. K., Rathore, T. R., & Tomar, U. K. (2018). Non-destructive harvesting of oleo-gum resin in *Commiphora wightii* (Arnott) Bhandaria critically endangered plant. *Industrial Crops and Products*, 113, 259-265. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.01.057>
- Samanta, J. N., Saravanan, R., Gajbhiye, N. A., & Mandal, K. (2012). Growth, photosynthetic competence and oleo-gum resin production of guggal (*Commiphora wightii*) across soil moisture and nitrogen gradient. *Journal of Tropical Forest Science*, 538-545.
- Samanta, J. N., Mandal, K., Saravanan, R., Gajbhiye, N., & Ravi, V. (2016). Influence of tapping position, intensity of tapping and season on gummosis of guggal (*Commiphora wightii*), oleo-gum-resin yield and quality. *The Indian Journal of Agricultural Sciences*, 86 (1), 143-146. <https://doi.org/10.56093/ijas.v86i1.55256>
- Scafaro, A. P., Posch, B. C., Evans, J. R., Graham, D. F., & Owen, K. A. (2023). Rubisco deactivation and chloroplast electron transport rates co-limit photosynthesis above optimal leaf temperature in terrestrial plants. *Nat Commun*, 14, 2820. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38496-4>
- Schober, P., Boer, C., & Schwarte, L. A. (2018). Correlation coefficients: appropriate use and interpretation. *Anesthesia & analgesia*, 126(5), 1763-1768. <https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000002864>
- Sentinelhub. (2024). Normalized Difference Moisture Index (NDMI). <https://custom-scripts.sentinel-hub.com/sentinel-2/ndmi/>
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). (2024). Estación Meteorológica Automatizada El Limón, Tepalcingo. Datos climáticos. México.
- Singh, R., & Mangat, N. S. (1996). Simple Random Sampling. In *Elements of Survey Sampling. Kluwer Texts in the Mathematical Sciences*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-017-1404-4_3

- Suárez-Ramos, G., & Engleman, E. M. (1982). Study of the resin canals of the bark of *Bursera copallifera* and *Bursera grandifolia*. *Botanical Sciences*, 42, 41-54. <https://doi.org/10.17129/botsci.1260>
- Tapia-Tapia, E. D. C., & Reyes-Chilpa, R. (2008). Productos forestales no maderables en México: aspectos económicos para el desarrollo sustentable. *Madera y bosques*, 14(3), 95-112.
- Thomas, S. C. (2011). Genetic vs. phenotypic responses of trees to altitude. *Tree Physiology*, 31(11), 1161-1163. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpr105>
- Tolera, M., Menger, D., Sass-Klaassen, U., Sterck, F. J., Copini, P., & Bongers, F. (2013). Resin secretory structures of *Boswellia papyrifera* and implications for frankincense yield. *Annals of Botany*, 111(1), 61-68. <https://doi.org/10.1093/aob/mcs236>
- Tolera, M., Sass-Klaassen, U., Eshete, A., Bongers, F., & Sterck, F. (2015). Frankincense yield is related to tree size and resin-canal characteristics. *Forest Ecology and Management*, 353, 41-48. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.05.013>
- Trejo, I. (2010). Las selvas secas del pacífico Mexicano. En: G. Ceballos, A. García, E. Espinoza, C. J. Bezaury y R. Dirzo (Eds.), *Diversidad, amenazas y áreas prioritarias para la conservación de las selvas del Pacífico de México* (pp. 13-20). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Wei, T. and Simko, V. (2021) R Package “Corrplot”: Visualization of a Correlation Matrix.
- Wong, J. L. G., Thornber, K., & Baker, N. (2001). *Resource assessment of non-wood forest products: experience and biometric principles*. Food & Agriculture Org.
- Wright, I. J., Reich, P. B., Westoby, M., Ackerly, D. D., Baruch, Z., Bongers, F., Cavender-Bares, J., Chapin, T., Cornelissen, J. H. C. Diemer, M., Flexas, J., Garnier, E., Groom, P. K., Gulias, J., Hikosaka, K., Lamont, B. B, Lee, T., Lee, W., Lusk, C., & Villar, R. (2004). The worldwide leaf economics spectrum. *Nature*, 428, 821-827. <https://doi.org/10.1038/nature02403>
- Zhao, J., Lu, Z., Wang, L., & Jin, B. (2021). Plant Responses to Heat Stress: Physiology, Transcription, Noncoding RNAs, and Epigenetics. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(1), 117. <https://doi.org/10.3390/ijms22010117>

5 IMPACTO FISIOLÓGICO DE LA EXTRACCIÓN DE RESINA EN *Bursera bipinnata*

PHYSIOLOGICAL IMPACT OF RESIN EXTRACCIÓN IN *Bursera bipinnata*

Fredy Martínez-Galván¹; Julio César Buendía-Espinoza¹, Elisa del Carmen Martínez-Ochoa²

¹ Universidad Autónoma Chapingo. Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Carretera Federal México-Texcoco, Km 38.5, C. P. 56230, Texcoco, Edo. Mex. Email: fredy.rise@outlook.es; jcbuendiae@hotmail.com

² Universidad Autónoma Chapingo. Área de Agronomía del departamento de Preparatoria Agrícola. Carretera Federal México-Texcoco, Km 38.5, C. P. 56230, Texcoco, Edo. Mex. Email: elisacmo333@gmail.com

5.1 Resumen

El copal, es un producto forestal no maderable, que es un mecanismo de defensa constitutivo e inducido contra herbívoros. Su extracción tiene profundas implicaciones en los procesos biológicos básicos de los árboles aprovechados. El objetivo de esta investigación fue determinar las variables del método de extracción de resina que tienen mayor influencia en el contenido de humedad foliar y clorofila en *Bursera bipinnata*, mediante análisis de correlación y regresión lineal múltiple, para determinar el impacto fisiológico. El sitio experimental se desarrolló en la microcuenca Los Sauces, Morelos, México, con una muestra aleatoria de 70 árboles. Las variables explicativas fueron las del método de extracción. Las variables de respuesta fueron el Índice de Humedad de Diferencia Normalizada (NDMI) y el Índice de Clorofila Verde (GCI). La producción de resina se correlacionó con el NDMI en octubre ($r = -0.287$; $p = 0.016$). La profundidad de incisión se correlacionó con el GCI en agosto ($r = -0.438$; $p = 0.001$) y octubre ($r = -0.300$; $p = 0.012$). La producción de resina y la profundidad de incisión fueron factores asociados al NDMI en octubre ($R^2 = 0.09$; $p = 0.041$). Mientras que la profundidad de incisión y el número total de caras de resinación fueron factores asociados al GCI en agosto ($R^2 = 0.204$; $p = 0.05$) y octubre ($R^2 = 0.106$; $p = 0.023$). Finalmente, es necesario limitar la profundidad de las incisiones, así como el número de caras de resinación, especialmente en condiciones restrictivas, esto favorecería su aprovechamiento sostenible.

Palabras clave: copal, producto forestal no maderable, impacto fisiológico, NDMI, GCI.

5.2 Abstract

Copal, a non-timber forest product, is a constitutive and induced defense mechanism against herbivores. Its extraction has profound implications for the basic biological processes of the exploited trees. This research aimed to determine the variables of the resin extraction method that have the greatest influence on foliar moisture and chlorophyll content in *Bursera bipinnata*, through correlation and multiple linear regression analysis, to determine the physiological impact. The experimental site was developed in the Los Sauces micro-watershed, Morelos, Mexico, with a random sample of 70 trees. The explanatory variables were those of the extraction method. The response variables were the Normalized Difference Moisture Index (NDMI) and the Green Chlorophyll Index (GCI). Resin production was correlated with NDMI in October ($r = -0.287$; $p = 0.016$). Incision depth was correlated with GCI in august ($r = -0.438$; $p = 0.001$) and October ($r = -0.300$; $p = 0.012$). Resin production and incision depth were factors associated with NDMI in October ($R^2 = 0.09$; $p = 0.041$). While incision depth and the total number of resination faces were factors associated with GCI in august ($R^2 = 0.204$; $p = 0.05$) and October ($R^2 = 0.106$; $p = 0.023$). Finally, it is necessary to limit the depth of the incisions, as well as the number of resination faces, especially in restrictive conditions; this would favor its sustainable use.

Keywords: copal, non-timber forest product, physiological impact, NDMI, GCI.

5.3 Introducción

La obtención de productos forestales no maderables (PFNM) es una práctica común en distintos ecosistemas de México, siendo los bosques tropicales secos una de las fuentes más representativas de estos recursos, debido a su diversidad y distribución geográfica (Dirzo & Ceballos, 2010). Dentro de estos productos, las resinas ocupan un lugar relevante para la economía de ejidos y comunidades locales, como es el caso del copal obtenido de *Bursera bipinnata*, una especie arbórea o arbusto dioico que alcanza hasta ocho metros de altura (Medina-Lemos, 2008; Rzedowski et al., 2004).

Las especies del género *Bursera* se caracterizan por la producción de resinas, que exudan tanto del tronco como de las hojas (Becerra et al., 2001). Ante el daño, estas plantas liberan de inmediato líquidos desde los tejidos lesionados (Gigliarelli et al., 2015). La composición de la resina es heterogénea, puede contener ácidos resínicos ($C_{20}H_{30}O_2$), ácidos grasos, ésteres, esteroides, alcoholes, ceras y resenos (mezclas de ácidos neutros), todos con estructura

base de Carbono, Hidrógeno y Oxígeno (Pallardy, 2008). Dentro de los fitoquímicos del género *Bursera*, los terpenoides son los compuestos más representativos y costosos de producir para el árbol (Pallardy, 2008). Estos se sintetizan principalmente a través de las rutas del ácido mevalónico (MVA) y del metileritritol (MEP) en el retículo endoplasmático liso (RE) y el leucoplasto, generando como precursores al DMAPP (dimetilali pirofosfato) y el IPP (isopentenil pirofosfato) (Bhatla & Lal, 2023). Además, la resina de este género incluye a los lignanos, compuestos fenólicos conocidos por sus propiedades antioxidantes, antibacterianas, antivirales, antifúngicas y anti protozoarias (Marcotullio et al., 2018). Una vez sintetizada en las células epiteliales, la resina se exporta desde vesículas envueltas por membranas plasmáticas, como respuesta a daños (Al-Harrasi et al., 2019).

La extracción de resina en *Bursera bipinnata* se realiza entre agosto y octubre, coincidiendo con la temporada de lluvias. El proceso consiste en inducir daño tisular con una cuña metálica cada tres días sobre el tronco o las ramas. Posteriormente, se coloca una hoja de encino o plástico para dirigir la resina hacia recipientes improvisados como pencas de maguey o botellas de plástico, donde es colectado (Montúfar-López, 2016; Mena-Jiménez, 2018). A nivel fisiológico, las plantas responden al daño mecánico de manera local o sistémica, involucrando la generación, translocación y percepción de señales, que activan la expresión de genes inducidos por heridas (León et al., 2001). De acuerdo con Choi et al. (2017), las especies reactivas de oxígeno (ROS), el Ca^{2+} y las señales eléctricas forman una red que facilita la transmisión rápida de respuestas a lo largo de la planta. El Ca^{2+} estimula la liberación de especies reactivas de oxígeno (ROS) y ácidos grasos poliinsaturados (PUFA) inducida por lesiones en plantas mediante la activación de la nicotinamida adenina dinucleótido fosfato, NADPH, oxidasa y fosfolipasas (Niethammer, 2016). Entonces, como consecuencia del daño tisular se producen ROS, que dañan la capa lipídica insaturada y las membranas asociadas, afectando así a los sistemas de transporte activo y pasivo a través de los tejidos celulares y exponiendo a la planta a factores de estrés exógenos. (León et al., 2001; Al-Harrasi et al., 2019).

La producción de ROS va acompañada de señales eléctricas en forma de flujo iónico que activan simultáneamente mensajeros químicos como el ácido jasmónico (JA), que se origina en los cloroplastos, donde el ácido 12-oxo-fotodienoico es el principal precursor. Esta hormona es activada por señales derivadas de los lípidos del ácido α -linoléico (Koo, 2018). Estas señales desencadenan la producción de resina en las áreas afectadas, formando una barrera física y química que protege a la planta contra infecciones y herbívoros (Becerra et al., 2001). Sin embargo, este tipo de defensa es energéticamente costoso y, en condiciones de extracción intensiva puede afectar el crecimiento y la reproducción de la planta, comprometiendo su supervivencia a largo plazo, especialmente bajo condiciones restrictivas.

De acuerdo con Hout et al (2014), las plantas hacen compensaciones entre la demanda por crecimiento y la demanda por defensa, debido a la limitación de recursos, por lo que se prioriza un solo proceso frente al otro. Así, estas compensaciones tienen profundas implicaciones, ya que ambos procesos son vitales para la supervivencia, la reproducción y la adaptación. En estudios con especies como *Boswellia sacra*, se ha observado que el daño reiterado por la extracción de resina aumenta en el contenido de Ca/Mg, pero reduce el nitrógeno y los aminoácidos, y para *Hevea* aumenta las reservas almacenadas de carbohidratos y azúcares (TNC) en el tallo y raíz (Silpi et al., 2007; Khan et al., 2018). En el caso de *Boswellia papyrifera* investigaciones han señalado que la resinación frecuente reduce el área foliar de la copa y la ganancia de carbono fotosintético en los árboles de tierras bajas, generando una disminución en los aminoácidos y los carbohidratos almacenados (Mengistu et al., 2012, Mengistu et al., 2013). En el caso de *Bursera bipinnata* y *Bursera copallifera*, la resinación frecuente afecta negativamente su capacidad reproductiva (flores, frutos y semillas), reduciendo significativamente su éxito reproductivo y disminuyendo las poblaciones en algunas áreas de México como Morelos, Puebla y Guerrero (Montúfar-López, 2016; Abad-Fitz et al., 2022).

Dado el impacto potencial de estas prácticas de extracción en la fisiología y viabilidad de *Bursera bipinnata*, es fundamental comprender mejor las variables que influyen en el estrés fisiológico de los árboles durante su aprovechamiento. Por lo anterior, el objetivo de esta investigación fue determinar las variables del método de extracción de *Bursera bipinnata* que influyen en el estrés fisiológico de los árboles aprovechados, empleando un modelo de regresión lineal múltiple, con el fin de optimizar el proceso de extracción, reducir el impacto negativo en los árboles y fomentar prácticas de manejo sostenible.

5.4 Materiales y métodos

5.4.1 Área de estudio

El área de estudio se encuentra en la microcuenca Los Sauces, dentro de la subcuenca del Río Cuautla, al sureste del estado de Morelos. Esta microcuenca abarca una superficie de 384 ha, con un rango altitudinal entre 1230 y 1580 metros sobre el nivel del mar. Su clima es semicálido subhúmedo (A)C(w1), con lluvias concentradas en verano. Su temperatura media anual es de 22.8 °C, y la precipitación media anual es de 819.2 mm (Servicio Meteorológico Nacional, 2024). El suelo predominante es el Phaeozem háplico, caracterizado por un horizonte superficial oscuro rico en materia orgánica sobre una capa subsuperficial con acumulación de arcilla (árgico), escasa profundidad y pedregoso (IUSS Working Group WRB, 2015). La microcuenca está formada por topoformas de sierra volcánica con laderas escarpadas, donde prevalece una vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia, seguido por vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia, así como pequeños espacios destinados a la agricultura de temporal (INEGI, 2015).

Sitio Experimental. La investigación se llevó a cabo en el ejido de Los Sauces, Tepalcingo, Morelos (Figura 1), en un rango altitudinal que va desde 1368 hasta 1476 metros y una superficie de 29.21 ha. La vegetación predominante es secundaria arbustiva de selva baja caducifolia (INEGI, 2015), donde la vegetación pierde sus hojas durante la temporada seca debido a la alta

estacionalidad de lluvias (Trejo, 2010). La influencia de poblaciones humanas en la región ha promovido un mosaico de biomas tropicales secos secundarios en diferentes etapas de sucesión (Mesa-Sierra, 2022).

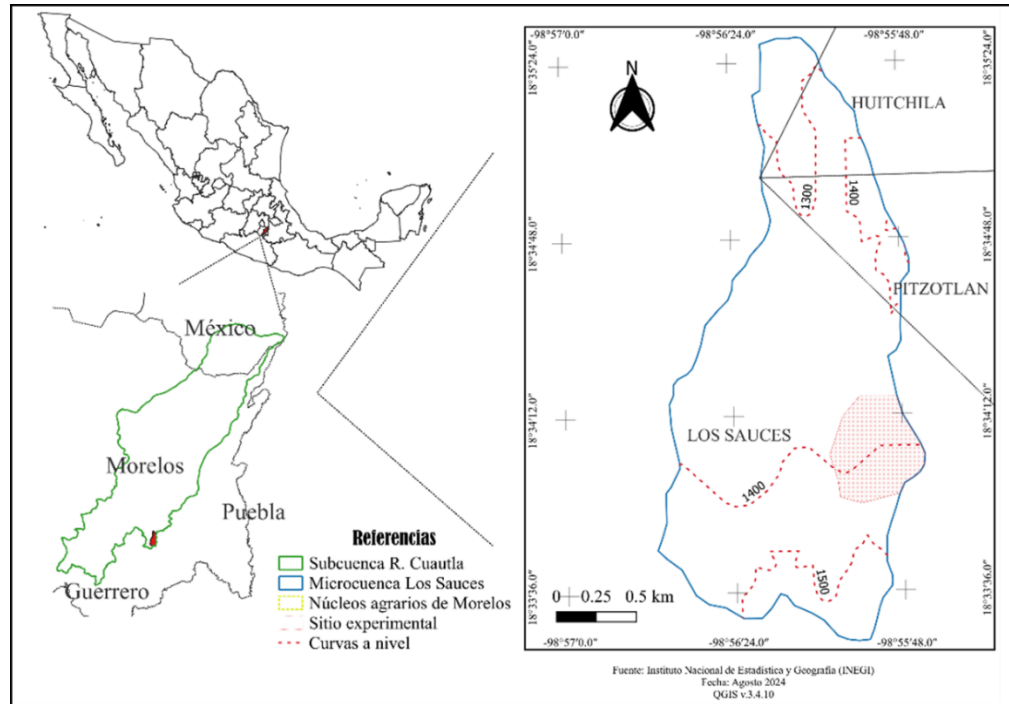


Figura 4. Localización del sitio experimental en la microcuenca Los Sauces.

5.4.2 Variables de respuesta

Índice de Humedad de Diferencia Normalizada evaluado en los meses de agosto (NDMIA) y octubre (NDMIO). Este índice mide la reflectancia en el infrarrojo cercano (banda 8), relacionada con la estructura interna y contenido de materia seca de la hoja, y en el infrarrojo de onda corta (banda 11), que refleja cambios en el contenido de agua de la vegetación y en la estructura esponjosa del mesófilo en las cubiertas de vegetación (Gao, 1996). El NDMI es sensible a los cambios en el contenido de agua de la vegetación, de manera que puede utilizarse para detectar una disminución de la capacidad hídrica en plantas afectadas por la extracción de resina en *Bursera bipinnata*. El daño tisular generado por la extracción de resina en árboles *B. bipinnata* podría afectar no solo a la corteza interna, sino también al xilema, tejido conductor responsable del transporte ascendente de agua (Couvreur et al., 2018). Esto podría reducir la

capacidad de *Bursera bipinnata* para suministrar agua a las hojas, afectando el intercambio de gases, el crecimiento celular y la fotosíntesis (Bhattacharya, 2021; Choat et al., 2012). Por lo tanto, el NDMI proporciona una medida indirecta del estrés hídrico asociado a estas prácticas de extracción, facilitando así el seguimiento de la salud de las plantas y su respuesta a los factores de estrés inducidos. Su nemónico en el modelo fueron *NDMIA* y *NDMIO*, respectivamente.

Índice de Clorofila Verde evaluado para los meses de agosto (GCIA) y octubre (GCIO). Este índice se emplea para monitorear el impacto de la estacionalidad y el estrés ambiental en las plantas. Su relación con el contenido clorofila y de nitrógeno en hojas permite estimar la capacidad fotosintética (Gitelson et al., 2005; Nguy-Robertson et al., 2014) y la síntesis de carbohidratos no estructurales, esenciales para la defensa contra el estrés ambiental y biótico (Piper & Paula, 2020) y, por ende, la salud y vigor de la planta. Cuando se produce un daño tisular, especialmente en la corteza interna, como resultado de prácticas de extracción de resina o condiciones de estrés ambiental, se observa una reasignación de recursos hacia la síntesis de compuestos de defensa (Huot et al., 2014), lo que reduce los componentes esenciales para la recolección de luz y fijación de carbono (Guo et al., 2012). Este cambio en la asignación de recursos, que se concentra en la defensa en lugar del crecimiento y la fotosíntesis, puede traducirse en una reducción de clorofila en las hojas, lo que disminuye el GCI (Khan et al., 2018). Así, el GCI actúa como un indicador indirecto del impacto del daño tisular, al reflejar disminuciones en la capacidad fotosintética de la planta. Cuando el GCI muestra valores bajos, puede ser un signo de que la planta está redirigiendo sus recursos para enfrentar el estrés, afectando su capacidad para realizar la fotosíntesis de manera óptima y limitar su crecimiento (Guo et al., 2012; Piper & Paula, 2020).

5.4.3 Variables explicativas

Las variables explicativas se seleccionaron en función de su relación directa con la técnica de extracción de resina en *Bursera bipinnata*.

Caras de resinación en el fuste, en ramas y totales. Una cara de resinación representa un conjunto de incisiones realizadas de manera alterna durante el periodo de aprovechamiento, tanto en fuste como ramas en los árboles de *B. bipinnata*. Estas incisiones causan daño tisular, lo que activa una respuesta defensiva en la planta que estimula la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS), además de señales de calcio (Ca^{2+}) y eléctricas que, en conjunto, forman una red para la transmisión rápida de señales de defensa (Choi et al., 2017). Como resultado, la planta segrega resina en la zona afectada, proporcionando así una defensa química contra herbívoros (Becerra et al., 2001). Para evaluar la intensidad del estrés inducido, se usaron las caras de resinación en el fuste, en las ramas y el total de estas, identificadas en el modelo con los nemónicos *NCF* (caras de resinación en el fuste), *NCR* (caras de resinación en ramas) y *NCT* (caras de resinación totales), respectivamente.

Altura de la cara. Es una variable determinante en la extracción de resina en árboles de *B. bipinnata*, ya que se relaciona con el rendimiento de resina obtenido durante este proceso. La extracción de resina implica realizar incisiones de forma ordenada y consecutiva a distintas alturas en el fuste o en las ramas, y en estudios con especies como *Boswellia* y *Commiphora* se ha observado que la altura de estas incisiones influye significativamente en el volumen de resina producido (Cherenet et al., 2020; Hassan-Ali et al., 2009). En el modelo, esta variable se identifica con el nemónico *ALC* y se utiliza para analizar cómo la ubicación de las incisiones en el tronco o ramas afecta tanto la producción de resina como la respuesta fisiológica de la planta al daño tisular.

Longitud de incisión y Profundidad de incisión. Son variables fundamentales en el proceso de extracción de resina en árboles de *B. bipinnata*, ya que determinan la intensidad del daño tisular y, por ende, la respuesta de la planta. Estas incisiones, realizadas de forma paralela y consecutiva, varían en tamaño y profundidad según las dimensiones del fuste o las ramas del árbol. En esta especie, las estructuras responsables de la producción de resina están ubicadas entre la peridermis (198 μm) y el cambium (39 μm), abarcando tanto el floema

conductor como el no conductor (García-Pineda, 1988). El daño tisular que generan las incisiones activa respuestas de defensa tanto localizadas como sistémicas: En el sitio de la herida, la planta inicia procesos para prevenir infecciones por patógenos, mientras que, a nivel sistémico, se activan mecanismos que modifican el crecimiento y desarrollo de los órganos afectados (Ikeuchi et al., 2020). En el modelo, estas variables se identifican con los nemónicos *LMI* (longitud media de incisión) y *PMI* (profundidad media de incisión), proporcionando un marco para analizar cómo las dimensiones de las incisiones afectan la producción de resina y las respuestas fisiológicas de la planta.

Área media de cara. Es un indicador clave del tamaño de las caras de resinación y de la intensidad de aprovechamiento del árbol. A medida que aumenta el número de incisiones, también se incrementa el área de cada cara de resinación, lo que está directamente relacionado con el rendimiento y la calidad de la resina producida. Este fenómeno ha sido observado en otras especies resiníferas, como *Boswellia* donde un mayor tamaño en las caras de resinación tiende a mejorar el flujo y la calidad de resina (Negussie et al., 2021; Sabo et al., 2022). Su nemónico en el modelo fue *AMR*.

Área total de resinación. Es un indicador directo de la intensidad de aprovechamiento durante la temporada de extracción de resina (tres meses) y del daño tisular acumulado en el árbol. A medida que aumenta esta área, la producción de resina también se incrementa, aunque a expensas de otros procesos fisiológicos críticos, como el crecimiento y la cicatrización de los tejidos (Linares & Bye, 2008). Esto tiene implicaciones importantes para la supervivencia y adaptación de la planta, ya que debe destinar más recursos a la defensa en lugar de a su desarrollo (Hout et al., 2014). En este modelo, la variable área total de resinación se utilizó para evaluar el impacto del aprovechamiento en la fisiología del árbol y optimizar prácticas de extracción sostenibles. Su nemónico en el modelo fue *ATR*.

Producción total de resina. Las resinas son mezclas complejas compuestas por ácidos resínicos ($C_{20}H_{30}O_2$), ácidos grasos, ésteres de estos ácidos, esteroides, alcoholes, ceras y compuestos resinosos, las cuales desempeñan un papel clave en las interacciones ecológicas (Langenheim, 2003; Pallardy, 2008). Aunque inicialmente son líquidas y translúcidas, con el tiempo se solidifican debido a procesos de polimerización y oxidación (Case et al., 2003). En *B. bipinnata*, los metabolitos especializados más predominantes son los terpenoides y lignanos, siendo los terpenoides particularmente relevantes debido a su alto costo de síntesis y almacenamiento, que excede al de otros metabolitos especializados (Pallardy, 2008). En este sentido, la extracción excesiva de resina ha contribuido a la disminución de las poblaciones de *Bursera* en la región del Alto Balsas (Morelos, Puebla y Guerrero), generando alta mortalidad y afectando negativamente el éxito reproductivo (Abad-Fitz et al., 2022; Montúfar-López, 2016). La variable producción total de resina se utilizó en el modelo para evaluar el rendimiento de resina en relación con la intensificación de la explotación y sus efectos sobre la salud de los árboles y la sostenibilidad de las poblaciones. Su nemónico en el modelo fue *PROD* (Figura 5).

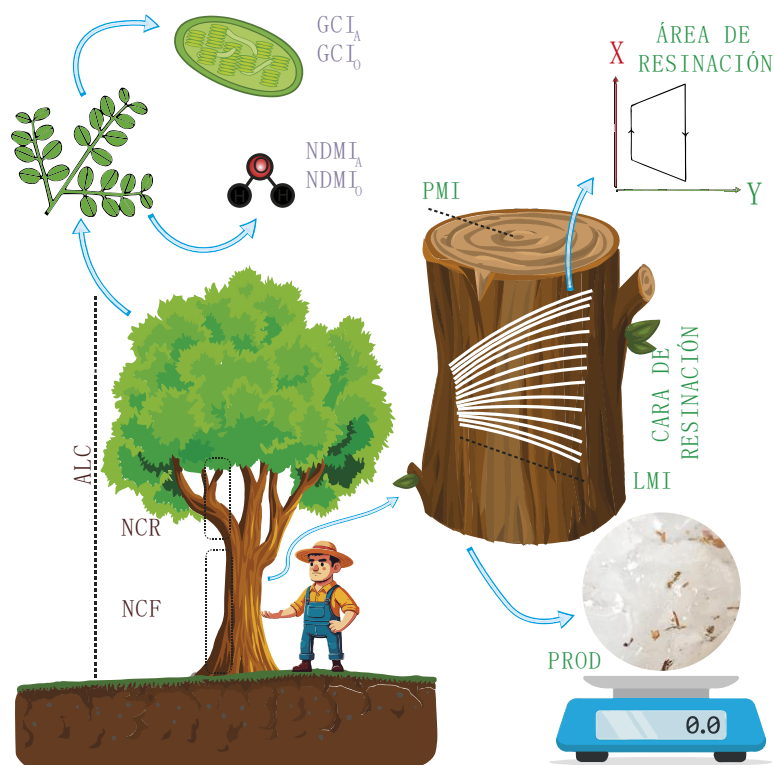


Figura 5. Esquema de las variables explicativas y la variable de respuesta tomadas al árbol de *Bursera bipinnata*. NCF: Caras de resinación en el fuste; NCR: Caras de resinación en ramas; NCT: Caras de resinación totales; ALC: Altura de la cara; LMI: Longitud de incisión; PMI: Profundidad de incisión; AMR: Área media de cara; ATR: Área total de resinación; PROD: Producción de resina, NDMI: Índice de Humedad de Diferencia Normalizada (agosto, octubre); GCI: Índice de Clorofila Verde (agosto, octubre).

5.4.4 Base de datos y medición de variables

En el sitio experimental se georreferenciaron los árboles de *Bursera bipinnata* próximos a ser aprovechados por los copaleros en el periodo agosto a octubre, donde cada árbol fue una unidad de muestreo. Se georreferenciaron 111 unidades de muestreo, de los cuales se tomó una muestra de 70 unidades mediante la función sample del software R (R Core Team, 2024), cada muestra con la misma probabilidad de ser seleccionados (Singh & Mangat, 1996). En cada unidad se recopilaban datos de las características del método de extracción de resina en los árboles (Figura 2).

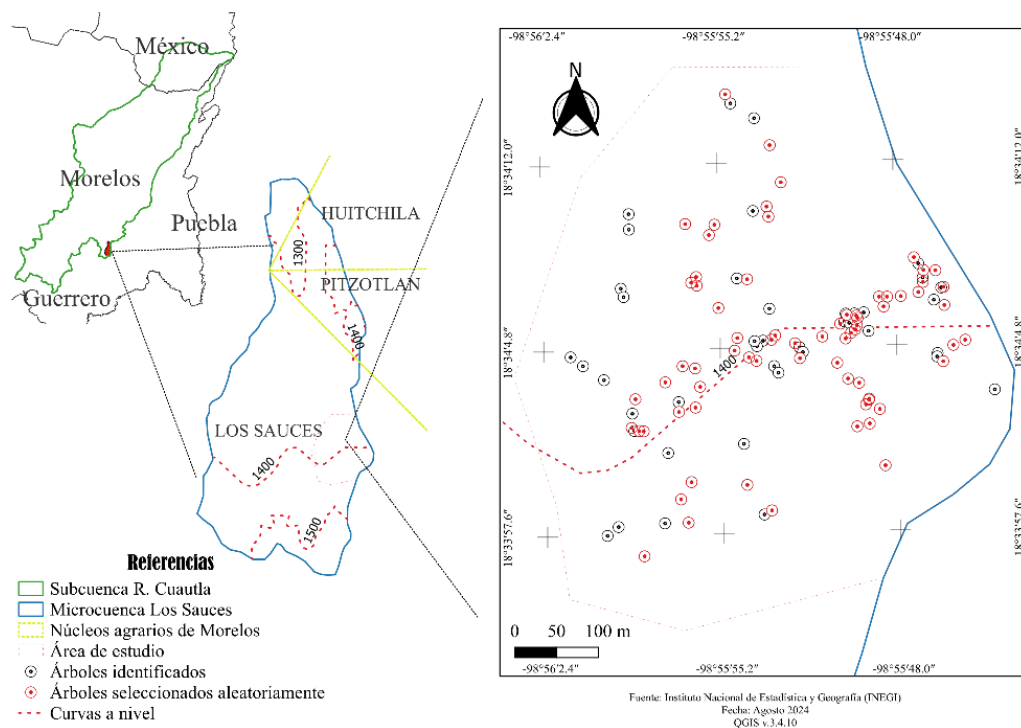


Figura 6. Localización de las 70 unidades de muestreo (árboles de copal) en el sitio experimental, dentro del área de estudio microcuenca Los Sauces, Estado de Morelos.

Las coordenadas geográficas para cada árbol se determinaron utilizando un dispositivo de posicionamiento global. Las *Variables del método de extracción* se obtuvieron con la colaboración de un ejidatario con experiencia en la extracción de resina, quien se encargó de identificar el número y ubicación de las caras de resinación. Para determinar la *altura de las caras* se promediaron las alturas de las caras existentes, midiendo desde el nivel del suelo con una cinta métrica. La *longitud de incisiones* se midió también con cinta métrica, y se determinó como el promedio de las longitudes de las incisiones ubicadas a mitad de cada cara. La *profundidad de incisiones* se midió mediante vernier pie de rey, y se consideró como el promedio de la profundidad de las incisiones ubicadas a mitad de cada cara. El *área de la cara de resinación* se calculó utilizando la fórmula del trapecio, tomando las medidas de las bases y las alturas de las caras con una cinta métrica y promediándolas. Para calcular el *área total de resinación*, se multiplicó el

número total de caras de resinación del árbol por el promedio de las áreas de las caras de resinación. La *producción de resina* por árbol se pesó al final de la temporada de aprovechamiento utilizando una báscula digital granataria. Las *Variables fisiológicas*, como NDMI y GCI, se determinaron mediante una calculadora ráster del software QGIS 3.10, utilizando imágenes Sentinel-2 L2A corregidas atmosféricamente. El índice NDMI devuelve valores entre -1 y 1. Los valores negativos cercanos a -1 corresponden a suelos estériles y sin cobertura, mientras que los valores cercanos a 0 (-0.2 a 0.4) generalmente señalan estrés hídrico. Los valores positivos altos (0.4 a 1) indican un dosel denso y saludable, sin estrés hídrico (EOS Data Analytics, 2024; Sentinelhub, 2024). El *NDMI* se calculó con la fórmula: $NDMI = \frac{NIR-SWIR1}{NIR+SWIR1}$, donde NIR representa los valores de píxel de la banda infrarroja cercana, y SWIR1 los valores de píxel de la banda infrarroja de onda corta, ambos valores en micrómetros (μm). El GCI se calculó con la fórmula: $GCI = \frac{NIR}{Green} - 1$, donde el NIR representa los valores de píxel de la banda infrarroja cercana (banda 8), y el Green es la reflectancia de la banda verde (banda 3), ambos valores en micrómetros (μm). Este índice devuelve valores entre 0 y 10, un alto valor de GCI indica un alto contenido de clorofila y una planta sana con incremento capacidad fotosintética, por el contrario, un valor bajo puede indicar estrés en la planta y una reducción de la actividad fotosintética.

5.4.5 Análisis de datos

Para identificar el mejor modelo explicativo, se realizó un análisis de correlación lineal seguido por un análisis de regresión lineal múltiple utilizando el Software R (R Core Team 2024). Las variables del método de extracción de *Bursera bipinnata* fueron consideradas como variables explicativas, mientras que los índices NDMI y GCI se consideraron como variables de respuesta.

Coeficiente de correlación, r_{xy} . El coeficiente de correlación de Pearson fue empleado para medir la relación lineal entre dos variables, x e y . Este estadístico se denota como:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

donde x_i y y_i son datos i -ésimos, $\bar{x}$ y $\bar{y}$ son sus valores promedios y $S_x = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$ y $S_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$ son los valores de sus desviaciones estándar, respectivamente, y n es el número total de datos. Este coeficiente, r_{xy} , toma valores entre 1 y -1, correspondiendo a una correlación positiva o negativa (McGibney, 2023). Para interpretar los resultados, se clasificaron las correlaciones como ausencia de correlación $r_{xy} = 0$, muy débiles $0 < |r_{xy}| < 0.25$, débiles $0.25 < |r_{xy}| < 0.5$, fuertes $0.5 < |r_{xy}| < 0.75$, muy fuertes $0.75 < |r_{xy}| < 1$, y perfecta $|r_{xy}| = 1$. Con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, se evaluaron las hipótesis $H_0: r_{xy} = 0$ No existe relación lineal entre la variable de respuesta y la i -ésima variable explicativa, y $H_1: r_{xy} \neq 0$ Existe relación entre la variable de respuesta y la i -ésima variable explicativa, asumiendo que las correlaciones siguen una distribución t-Student con $n - 2$ grados de libertad.

Regresión lineal múltiple, RLM. La técnica estadística de RLM se utilizó para identificar en qué medida las variables explicativas pueden explicar los índices fisiológicos. Para un modelo estandarizado, suponiendo que la variable de respuesta es Y_i , el mejor predictor lineal a partir de las variables explicativas, X_{1i} 's, es (Cohen et al. 2003, Di-Rienzo et al., 2005):

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \cdots + \beta_p X_{pi} + \varepsilon_i \quad (2)$$

donde Y_i es la variable de respuesta, β_0 es el intercepto estimado, $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$ son parámetros fijos desconocidos; $X_{1i}, X_{2i}, \dots, X_{pi}$ son variables explicativas con valores fijados por el investigador, y ε_i es una variable aleatoria inobservable (error aleatorio).

Se calcularon coeficientes estandarizados (β) para comparar la importancia relativa de las variables (Cohen et al., 2003; Montero-Granados, 2016), y la bondad de ajuste del modelo se evaluó mediante el coeficiente de determinación

ajustado, $R^2_{ajustado}$, que corrige posibles sesgos asociados al R^2 convencional, y oscila entre 0 y 1 (Heinzel & Mittlböck, 2019). Valores cercanos a uno indican que la mayor parte de la variabilidad en Y_i se explica mediante el modelo de regresión (Montgomery et al., 2012). Adicionalmente, se verificaron los supuestos de Linealidad (comprobación con la correlación), Independencia (comprobación con la independencia de las observaciones), Normalidad (comprobación con el gráfico de probabilidad Q-Q acumulada observada/esperada según la normal o las pruebas de normalidad de Kolmogorov-Smirnov o Shapiro-Wilk) y Homocedasticidad de los residuos (comprobación con el diagrama de dispersión de los valores predichos tipificados contra los valores de los residuos tipificados o la prueba de Breusch-Pagan) mediante pruebas estadísticas y gráficos diagnósticos (Cohen et al. 2003; Montero-Granados, 2016).

Para evitar la presencia de multicolinealidad en las variables explicativas del modelo, se analizó la correlaciones lineal de Pearson, r (Schober et al., 2018, Sahu, 2024) entre las variables predictoras y el factor de inflación de varianza, VIF (Akinwande et al., 2015, Sahu, 2024), eliminando aquellas con $|r| > \sim 0.70$ (Booth et al., 1994) y $VIF > 4$, porque al inflar excesivamente los errores estándar la multicolinealidad hace que algunas variables sean estadísticamente insignificantes cuando deberían ser significativas (Akinwande et al., 2015; O'Brien, 2007). La correlación lineal de Pearson y el Factor de inflación de varianza se analizaron en los paquetes `corrplot` (Wei & Simko, 2021) y `usdm` (Naimi et al., 2014) en R (R Core Team 2024).

5.5 Resultados

5.5.1 Base de datos y selección de variables

En esta investigación la ubicación geográfica de los setenta árboles se determinó mediante tecnología GPS, así como nueve características de productividad y dos fisiológicas. Como variables predictoras se consideraron: Caras de resinación en el fuste, caras de resinación en las ramas, caras de resinación totales, altura de la cara, longitud de incisión, profundidad de incisión, área media de cara, área

total de resinación, la producción de resina. Las variables de respuesta fueron: $NDMI_{agosto}$, $NDMI_{octubre}$, GCI_{agosto} , y $GCI_{octubre}$. En el Cuadro 11 se pueden observar las medianas que se registraron de las variables, que fue de 0.30 ± 0.49 para el número de caras de resinación en el fuste, 1.33 ± 1.07 para el número de caras de resinación en las ramas, y 1.63 ± 0.78 para el número total de caras de resinación. En el mismo cuadro se pueden observar los promedios que se registraron de las variables, que fue de 1.56 ± 0.66 m sobre el nivel del suelo para la altura de las caras. 15.64 ± 3.57 cm de longitud de incisiones, de 5.97 ± 2.40 mm profundidad de incisión, de 56.77 ± 20.15 cm² área de caras de resinación, de 90.72 ± 52.96 cm² área total de resinación, y de 38.56 ± 50.44 g en producción de resina en el periodo agosto–octubre.

Cuadro 11. Estadísticos descriptivos de los parámetros productivos.

Variable	Unidades	Mediana	Mínimo	Máximo	Rango
Caras en el fuste	Cantidad	0.00	0.00	2.00	2.00
Caras en ramas	Cantidad	1.00	0.00	4.00	4.00
Caras totales	Cantidad	1.00	1.00	4.00	3.00
Variable	Unidades	Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
Altura de la cara	m	1.56	0.40	3.72	0.66
Longitud de incisión	cm	15.64	5.00	25.00	3.57
Profundidad de incisión	mm	5.97	3.00	19.00	2.40
Área media de cara	cm ²	56.77	18.00	109.25	20.15
Área total de resinación	cm ²	90.72	18.00	285.00	52.69
Producción de resina	g	38.56	0	190	50.44

En el Cuadro 12 se puede observar que, en promedio, el NDMI en las hojas de los árboles de copal en el mes de agosto fue de 0.30 ± 0.02 , y en octubre fue de 0.11 ± 0.05 . El GCI en el mes de agosto fue de 4.76 ± 0.46 , y en octubre fue de 3.79 ± 0.47 .

Cuadro 12. Estadísticos descriptivos de los parámetros fisiológicos.

Variable	Unidades	Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
NDMIA	Adimensional	0.30	0.25	0.35	0.02
NDMIO	Adimensional	0.11	-0.004	0.24	0.05
GCIA	Adimensional	4.76	3.71	5.86	0.46
GCIO	Adimensional	3.79	2.39	4.80	0.47

5.5.2 Coeficiente de correlación

Índice de Humedad de Diferencia Normalizada. En el Cuadro 13 se observa que las variables productivas no presentaron una correlación estadísticamente significativa con el índice de humedad de diferencia normalizada en el mes de agosto.

Cuadro 13. Correlación entre los parámetros productivos y el NDMI en agosto.

Variable	Coeficiente de correlación de Pearson	Sig.
Caras de resinación en el fuste	-0.055	0.652
Caras de resinación en ramas	-0.057	0.639
Caras de resinación total	-0.113	0.353
Altura de la cara	0.014	0.906
Longitud de incisión	0.006	0.964
Profundidad de incisión	-0.085	0.485
Área media de cara	-0.006	0.963
Área total de resinación	-0.013	0.915
Producción de resina	-0.179	0.139
**La correlación es significativa en el nivel 0.01 (bilateral)		
*La correlación es significativa en el nivel 0.05 (bilateral)		

En el Cuadro 14 se observa que la producción de resina mostró una correlación negativa débil pero significativa con el índice de humedad de diferencia normalizada en el mes de octubre ($r = -0.287$; $p = 0.016$).

Cuadro 14. Correlación entre los parámetros productivos y el NDMI en octubre.

Variable	Coeficiente de correlación de Pearson	Sig.
----------	---------------------------------------	------

Caras de resinación en el fuste	0.030	0.788
Caras de resinación en ramas	-0.169	0.163
Caras de resinación total	-0.211	0.080
Altura de la cara	-0.051	0.674
Longitud de incisión	0.047	0.698
Profundidad de incisión	-0.90	0.457
Área media de cara	-0.010	0.937
Área total de resinación	-0.103	0.398
Producción de resina	-0.287*	0.016
**La correlación es significativa en el nivel 0.01 (bilateral)		
*La correlación es significativa en el nivel 0.05 (bilateral)		

Índice de Clorofila Verde. En el Cuadro 15 y 16 se puede observar que la profundidad de incisión mostró una correlación negativa débil negativa pero significativa con el índice de clorofila verde en ambos meses ($r = -0.438$; $p = 0.001$ en agosto y $r = -0.300$; $p = 0.012$ en octubre).

Cuadro 15. Correlación entre los parámetros productivos y el GCI en agosto.

Variable	Coefficiente de correlación de Pearson	Sig.
Caras de resinación en el fuste	-0.094	0.438
Caras de resinación en ramas	0.150	0.214
Caras de resinación total	0.147	0.225
Altura de la cara	0.057	0.641
Longitud de incisión	-0.192	0.112
Profundidad de incisión	-0.438**	<0.001
Área media de cara	-0.226	0.060
Área total de resinación	-0.021	0.861
Producción de resina	0.079	0.513
**La correlación es significativa en el nivel 0.01 (bilateral)		
*La correlación es significativa en el nivel 0.05 (bilateral)		

Cuadro 16. Correlación entre los parámetros productivos y el GCI en octubre.

Variable	Coefficiente de correlación de Pearson	Sig.
Caras de resinación en el fuste	-0.111	0.365

Caras de resinación en ramas	0.161	0.184
Caras de resinación total	0.151	0.213
Altura de la cara	0.023	0.850
Longitud de incisión	-0.065	0.594
Profundidad de incisión	-0.300*	0.012
Área media de resinación	-0.173	0.152
Área total de resinación	0.018	0.881
Producción de resina	0.153	0.207

**La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral)

*La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral)

5.5.3 Modelo de regresión lineal múltiple

Índice de humedad de diferencia normalizada. El análisis de regresión lineal múltiple para evaluar los efectos de las variables productivas sobre el NDMI en octubre consideró la producción de resina y la profundidad de incisión como variables explicativas. Sin embargo, solo la producción de resina resultó significativa en el modelo ($p < 0.05$), que explicó el 9 % de la variabilidad en la humedad del dosel en los árboles aprovechados durante este mes (Cuadro 17). La producción de resina se identificó como el principal factor asociado con el contenido de humedad del dosel, observándose que la humedad disminuye a medida que aumenta la producción de resina ($\hat{\beta}_1 = -0.287, p = 0.016$). Esto sugiere que un mayor aprovechamiento de resina podría estar relacionado con un menor suministro de agua en el dosel.

Cuadro 17. Modelo sobre los efectos de los parámetros productivos sobre NDMI en octubre.

	Estimador	Error Estándar	Valor-T	Pr > t
INTERCEPTO	0.000	0.115	0.000	1.000
PROD	-0.287	0.116	-2.463*	0.016
PMI	-0.089	0.116	-0.772	0.443
Error residual estándar: 0.967 con 67 grados de libertad				
R-Cuadrada Múltiple: 0.090, R-Cuadrada Ajustada: 0.063				
Estadístico-F: 3.334 con 2 y 67 grados de libertad, valor-p: 0.041				
Factor de Inflación de Varianza (VIF): PROD: 1.000; PMI: 1.000				

Índice de clorofila verde. Para el GCI en agosto, el modelo de regresión lineal incluyó la profundidad de incisión y el número total de caras de resinación como variables explicativas. De estas, únicamente la profundidad de incisión fue significativa ($p < 0.05$), explicando el 20.4 % de la variabilidad en el contenido de clorofila del dosel (Cuadro 18). La profundidad de incisión mostró un efecto negativo sobre el GCI ($\hat{\beta}_1 = -0.420, p < 0.050$), indicando que el contenido de clorofila disminuye a medida que se incrementa la profundidad de las incisiones realizadas.

Cuadro 18. Modelo sobre los efectos de los parámetros productivos sobre GCI en agosto.

	Estimador	Error Estándar	Valor-T	Pr > t
INTERCEPTO	0.000	0.108	0.000	1.000
PMI	-0.428	0.109	-3.925***	<0.05
NCT	0.114	0.109	1.051	0.297
Error residual estándar: 0.905 con 67 grados de libertad				
R-Cuadrada Múltiple: 0.204, R-Cuadrada Ajustada: 0.180				
Estadístico-F: 8.614 con 2 y 67 grados de libertad, valor-p: 0.05				
Factor de Inflación de Varianza (VIF): PMI: 1.005; NCT: 1.005				

En cuanto al Índice de Clorofila Verde (GCI) en octubre, se consideraron las variables profundidad de incisión y número total de caras resinadas. El análisis reveló que únicamente la profundidad de incisión tuvo un efecto significativo sobre el contenido de clorofila ($p = 0.014$), mientras que el número total de caras resinadas no mostró una influencia estadísticamente relevante ($p = 0.269$). El modelo explicó el 10.6 % de la variabilidad en el GCI, indicando una moderada capacidad explicativa (Cuadro 19). Se observó que el contenido de clorofila disminuye a medida que se incrementa la profundidad de las incisiones ($\hat{\beta}_1 = -289, p = 0.014$). Este hallazgo podría estar asociado con la pérdida de funcionalidad fotosintética derivada de un mayor daño físico en los tejidos vegetales causado por incisiones profundas.

Cuadro 19. Modelo sobre los efectos de los parámetros productivos sobre GCI en octubre.

	Estimador	Error Estándar	Valor-T	Pr > t
INTERCEPTO	-0.000	0.114	0.000	1.000
PMI	-0.289	0.115	-2.502*	0.014
NCT	0.129	0.115	1.114	0.269
Error residual estándar: 0.959 con 67 grados de libertad				
R-Cuadrada Múltiple: 0.106, R-Cuadrada Ajustada: 0.079				
Estadístico-F: 3.98 con 2 y 67 grados de libertad, valor-p: 0.023				
Factor de Inflación de Varianza (VIF): PMI: 1.005; NCT: 1.005				

5.6 Discusión

5.6.1 Coeficiente de correlación

Índice de Humedad de Diferencia Normalizada. El NDMI registrado en el dosel de *Bursera bipinnata* durante el mes de octubre fue inversamente proporcional al rendimiento de resina, es decir, el nivel de la humedad de las hojas del dosel disminuyó al incrementar el rendimiento de resina. Esto puede explicarse considerando que las hojas representan la última barrera en el flujo continuo de agua en el sistema suelo-planta-atmósfera. La reducción en la humedad del dosel probablemente se asocia con una disminución del flujo hídrico derivada del daño en los tejidos vasculares, ya que las incisiones realizadas para la extracción de resina alcanzaron una profundidad media de 5.97 ± 2.40 mm. Cabe destacar que las estructuras secretoras de resina en *B. bipinnata* se localizan entre la peridermis (198 μ m) y el cambium (39 μ m), abarcando tanto el floema conductor (351 μ m) como el floema no conductor (García-Pineda, 1988; Serrano-Rosas, 2018). Por lo tanto, dichas incisiones no solo afectaron la corteza interna (floema), sino también al xilema, el principal tejido responsable del transporte ascendente del agua, crucial para satisfacer la demanda transpiratoria y la expansión celular (Couvreur et al., 2018). La disminución en el suministro y la deposición de agua en las hojas tiene impactos fisiológicos significativos en los árboles. El crecimiento celular, que depende de una turgencia mínima, se ve comprometido, reduciendo o deteniendo la elongación de las hojas. Además, se inhibe la

fotosíntesis, ya que el agua actúa como donadora de electrones, y se reduce la tasa de respiración y otros procesos enzimáticos clave (Bhattacharya, 2021).

Por otro lado, el daño tisular ocasionado por la extracción de resina podría contribuir a la pérdida de agua, aunque en menor medida, debido a la transpiración peridérmica, una característica de la corteza que tiene menor conductancia al agua y al CO₂ en comparación con los estomas, alcanzando solo hasta el 28% de la conductancia estomática (Wittmann & Pfan, 2008). Sin embargo, esta pérdida de agua puede ser lo suficientemente significativa como para generar déficits hídricos en los tallos, especialmente durante periodos de sequía. Una mayor conductancia de vapor de agua en la corteza puede incrementar el estrés hídrico en los tallos, agravado por la baja disponibilidad de agua en el suelo (Wolfe, 2020). Es importante mencionar que el agua almacenada en los troncos puede contribuir entre el 6% y el 28% al presupuesto hídrico diario de los árboles grandes, aunque en especies de hoja caduca esta contribución es mayor debido a la menor densidad de la albura (Oliva-Carrasco, 2015). En casos extremos, el agua almacenada en los tallos principales puede suplir hasta el 50% de la transpiración diaria total (Scholz et al., 2008).

En este contexto, el valor medio del NDMI obtenido en los árboles sometidos a aprovechamiento en octubre fue de 0.11 ± 0.05 , lo que indica un estrés hídrico severo (EOS Data Analytics, 2024). Este resultado se alinea con el bajo acumulado de precipitación registrado entre julio y octubre de 2023, de solo 26.6 mm, en contraste con los 417.48 mm esperados para el mismo periodo (Servicio Meteorológico Nacional, 2024). Este déficit hídrico se traduce en impactos severos en los procesos fisiológicos de la planta. El estrés térmico, por ejemplo, reduce la eficiencia del transporte de electrones en los cloroplastos, desactiva la ribulosa-1-5-bisfosfato carboxilasa oxigenasa (RuBisCO) y disminuye la tasa de asimilación fotosintética neta de CO₂ (Scafaro et al., 2023). Asimismo, el estrés hídrico reduce tanto el contenido como el potencial hídrico en la planta, dificultando la adecuada redistribución del agua en los tejidos (Zhao et al., 2021).

Índice de clorofila verde. El GCI del dosel de *Bursera bipinnata* evaluado en los meses de agosto y octubre fue inversamente proporcional a la profundidad de incisión, evidenciando que un aumento en la profundidad de las incisiones ocasiona una disminución en el contenido de clorofila del dosel. En este estudio, la profundidad media de las incisiones fue 5.97 ± 2.40 mm, aunque se registraron incisiones de hasta 19 mm. Dicho daño tisular afecta directamente los tejidos vasculares, alterando el transporte de agua y nutrientes minerales a través del xilema, esenciales para satisfacer las demandas de las hojas y procesos como la expansión celular. De igual manera, se interrumpe el transporte de fotoasimilados y moléculas de señalización a través del floema (Agustí & Blázquez, 2020; Couvreur et al., 2018). Este impacto repercute en los procesos de asimilación de nitrógeno, un macronutriente indispensable para la actividad fotosintética, dado que aproximadamente el 75% del nitrógeno foliar se invierte en cloroplastos, destinándose un tercio de esta inversión a las reacciones primarias de la fotosíntesis y otro tercio a las reacciones de fijación de carbono (Evans & Clarke, 2019).

Adicionalmente, Huot et al. (2014) encontraron que recursos clave como el carbono y el nitrógeno pueden ser redirigidos hacia la síntesis de compuestos de defensa en respuesta al daño por patógenos o herbívoros, lo cual suprime componentes fotosintéticos tanto a nivel de expresión génica como en la abundancia de proteínas (Borges et al., 2013). Por ejemplo, el tratamiento con ácido jasmónico (JA) ha demostrado reducir componentes esenciales para la recolección de luz y la fijación de carbono (Guo et al., 2012). En *Nicotiana attenuata*, se ha observado que el nitrógeno presente en la ribulosa-1-5-bisfosfato carboxilasa/oxigenasa (RuBisCO) se reasigna hacia la producción de compuestos defensivos como nicotina y fenolamidas, en un proceso dependiente de la vía de señalización del JA (Ullmann-Zeunert et al., 2013). De manera similar, en *Boswellia sacra*, los árboles heridos presentaron una reducción en los niveles de nutrientes esenciales como hidrógeno, carbono y nitrógeno, mientras que el contenido de calcio y magnesio se duplicó. Además, se observó un incremento en la concentración de ácido jasmónico endógeno (50.1%) y ácido

abscísico (54.81%), lo cual favoreció las respuestas defensivas en detrimento del crecimiento y desarrollo (Khan et al., 2018).

En este contexto, el índice de clorofila verde (GCI) ha sido identificado como un estimador confiable del índice de área foliar verde (LAI), el cual refleja la proporción de área foliar fotosintéticamente activa por unidad de superficie de suelo (Nguy-Robertson et al., 2014). Un aumento en el daño reduce el LAI, afectando negativamente la productividad de *Bursera bipinnata*, ya que las hojas desempeñan un papel crucial en la fijación de carbono mediante la fotosíntesis y la respiración (Binkley et al., 2013; Wright et al., 2004). Estos resultados coinciden con las observaciones de Mengistu et al. (2012) en *Boswellia papyrifera*, donde la extracción intensiva redujo significativamente el área foliar de la copa. Una disminución en la actividad fotosintética conlleva una menor producción de carbohidratos no estructurales, fundamentales para el transporte de recursos, el metabolismo energético, la osmorregulación celular y la síntesis de compuestos defensivos. Estos carbohidratos también son críticos para la restauración del crecimiento y la recuperación de la planta tras un estrés biótico o abiótico (Piper & Paula, 2020).

5.6.2 Modelo de regresión lineal múltiple

Índice de Humedad de Diferencia Normalizada. El modelo de regresión lineal múltiple explicó el 9% de la variabilidad en el contenido de humedad de las hojas del dosel, utilizando como variables independientes la producción de resina y la profundidad de incisión. La producción de resina fue la variable de mayor peso explicativo, como consecuencia del daño generado en los tejidos vasculares durante el periodo de extracción, de agosto a octubre, para inducir la secreción de resina. Estudios previos en *Boswellia* y *Acacia* han demostrado que el incremento en la intensidad del daño tisular genera un aumento en el rendimiento de resina o goma (Eshete et al., 2012; Negussie et al., 2021; Sabo et al., 2022). Sin embargo, este daño afecta negativamente el movimiento ascendente del agua, esencial para la fotosíntesis y el crecimiento celular (Bhattacharya, 2021; Couvreur et al., 2018).

La secreción de resina, además de funcionar como un mecanismo de defensa químico y físico (Becerra et al., 2001; De-Carlo et al., 2019; García-Pineda, 1988), se solidifica sobre las áreas afectadas debido a procesos de polimerización y oxidación (Case et al., 2003), contribuyendo también a reducir la pérdida de agua. Sin embargo, un mayor rendimiento de resina requiere un flujo constante, lo que implica que es necesario el daño tisular recurrente, es decir, cada tercer día, entre los meses de agosto a octubre. Este proceso puede conducir a la pérdida de agua almacenada en los tallos principales del árbol (Oliva-Carrasco, 2015; Scholz et al., 2008). A pesar de estar separados por hileras de células intermedias del cambium, el floema y el xilema están conectados por células de parénquima radial que transportan agua de forma simplástica (Höll, 1975; Thompson & Holbrook, 2003). Un cambio en el gradiente de potencial hídrico entre el floema y el xilema influye en la dirección y el alcance del flujo radial de agua (Pfautsch et al., 2015).

El periodo de aprovechamiento, de agosto a octubre de 2023, se vio marcado por un evento de sequía previo en julio, cuando la precipitación acumulada fue de solo 26.6 mm (Servicio Meteorológico Nacional, 2024). Este déficit hídrico, sumado al estrés por daño tisular y las altas temperaturas, agravó el impacto de la extracción de resina en el contenido de humedad de las hojas del dosel. Para mantener la funcionalidad hidráulica y evitar la pérdida de agua durante la transpiración, el floema debe ajustar osmóticamente su potencial hídrico al del xilema. Este ajuste ocurre mediante la concentración de carbohidratos en el floema y las células circundantes (Sevanto, 2018), un mecanismo que es crítico para el transporte de agua a larga distancia.

El estrés combinado, tanto biótico como abiótico, puede generar efectos acumulativos. Fini et al. (2017) destacan que eventos como olas de calor, sequías, plagas y perturbaciones humanas suelen ocurrir simultáneamente, interactuando de manera sinérgica. Estas condiciones provocan una reducción en la producción de fotosintatos y una mayor demanda de recursos fisiológicos para la protección del árbol, lo que conduce al agotamiento de los carbohidratos

no estructurales (NSC) como uno de los principales efectos del estrés, especialmente en casos de defoliación inducida por sequías o ataques de insectos (Wang et al., 2021). Este fenómeno está estrechamente relacionado con la mortalidad de árboles en diversas regiones, una tendencia que se espera se agrave con el cambio climático, resultando en eventos de mortalidad más extensos y severos (Allen et al., 2010).

Índice de clorofila verde. El modelo de regresión lineal múltiple explicó el 20% de la variabilidad en el contenido de clorofila en las hojas del dosel durante el mes de agosto y el 10.6% en el mes de octubre. Estas variaciones estuvieron asociadas a las variables profundidad de incisión y caras de resinación total, siendo la profundidad de incisión el factor más influyente en ambos meses. Este resultado se atribuye al daño generado en los tejidos vasculares desde agosto hasta octubre para inducir la secreción de resina. De acuerdo con el Índice de Humedad Diferencial Normalizado (NDMI), dichos daños afectan negativamente al suministro de agua a las hojas, comprometiendo la actividad fotosintética y el crecimiento. Además, el xilema, encargado de transportar agua, también transporta nutrientes esenciales como el nitrógeno, indispensable para la actividad fotosintética (Agustí & Blázquez, 2020; Couvreur et al., 2018; Evans & Clarke, 2019).

Las incisiones realizadas durante el periodo de aprovechamiento presentaron profundidades de entre 3 y 19 mm, generando daño tisular desde la peridermis hasta el cámbium vascular y el xilema. Esto afecta estructuras clave como el floema conductor y no conductor, responsables del transporte de foto asimilados y moléculas de señalización, así como las estructuras secretoras (Agustí & Blázquez, 2020; García-Pineda, 1988; Serrano-Rosas, 2018). Como consecuencia, los árboles pasan de un estado fisiológico óptimo a uno subóptimo, alcanzando un nuevo equilibrio mediante ajustes fisiológicos, bioquímicos y genéticos (Bussotti & Pollastrini, 2021).

El daño en los tejidos desencadena respuestas locales y sistémicas que incluyen la generación, translocación y percepción de señales para activar la expresión de

genes inducibles por heridas (León et al., 2001). Estas respuestas implican la interacción de especies reactivas de oxígeno (ROS), calcio (Ca^{2+}) y señales eléctricas, conocidas como "señalización en trío" (Choi et al., 2017). Estas señales activan mensajeros químicos como el ácido jasmónico (JA, Koo, 2018), que desempeña un papel crucial en la reasignación de recursos, incluyendo carbono, hidrógeno y nitrógeno, con un impacto directo en la reducción de componentes esenciales para la fotosíntesis, como los complejos de recolección de luz y la fijación de carbono (Borges et al., 2013; Guo et al., 2012; Huot et al., 2014; Ullmann-Zeunert et al., 2013). Estudios en *Boswellia sacra* han demostrado que los árboles sometidos a extracción de resina presentan concentraciones de ácido jasmónico 50.1% mayores y niveles más altos de ácido abscísico (ABA) en comparación con árboles no aprovechados para la extracción de resina, además de una mayor concentración de calcio y magnesio. Estos cambios están relacionados con una menor concentración de nutrientes esenciales como carbono, hidrógeno y nitrógeno, y contribuyen a la senescencia foliar y la reducción del área foliar (Khan et al., 2018; Mengistu et al., 2012).

En *Boswellia papyrifera*, se ha documentado que una mayor intensidad de aprovechamiento de resina provoca una disminución significativa en el área foliar de la copa (Khan et al., 2018; Mengistu et al., 2012). Al igual que en *Bursera bipinnata*, este efecto está asociado con la limitación en el suministro de nitrógeno hacia las hojas y su redistribución hacia procesos de defensa, lo que resulta en una reducción de la actividad fotosintética en los árboles aprovechados. Como consecuencia, se puede observar un menor contenido de sacarosa, fructosa y glucosa en los tejidos foliares (Khan et al., 2018; Wang et al., 2021). Además, estudios previos han demostrado que en especies del género *Boswellia*, la extracción continua e intensiva de resina disminuye las concentraciones de carbohidratos no estructurales, llevándolos a un posible agotamiento (Mengistu, 2011; Mengistu et al., 2013). Esta reducción de carbohidratos no estructurales representa un riesgo crítico, ya que, si los niveles de estos compuestos caen por debajo de un umbral mínimo, puede incrementarse significativamente la mortalidad de los árboles. La recuperación de dichos compuestos puede tomar

varios años ante la extracción continua de resinas, lo que compromete severamente la capacidad defensiva de los árboles frente a condiciones de estrés biótico o abiótico (Barker-Plotkin et al., 2021; Wang et al., 2021), y nos conlleva a un entorno forestal no sostenible.

5.7 Conclusiones

La extracción de resina en *Bursera bipinnata* impacta negativamente la fisiología del árbol al comprometer el transporte hídrico y la actividad fotosintética, debido al daño en los tejidos vasculares, principalmente el floema y el xilema. El Índice de Humedad de Diferencia Normalizada (NDMI) y el Índice de Clorofila Verde (GCI) evidenciaron que las incisiones profundas y frecuentes no solo reducen la humedad foliar y el contenido de clorofila, sino que también disminuyen la capacidad de los árboles para mantener la transpiración y el crecimiento celular. Estos efectos se agravan durante periodos de déficit hídrico severo, como los registrados entre julio y octubre de 2023, exacerbando el estrés fisiológico y energético del árbol. Además, el daño tisular estimula respuestas defensivas que reasignan recursos clave, como Carbono, Hidrógeno y Nitrógeno, hacia la síntesis de compuestos de defensa, a expensas de la fotosíntesis y el crecimiento. Esta redistribución reduce la producción de carbohidratos no estructurales, fundamentales para la recuperación del árbol tras condiciones de estrés. Si los niveles de estos compuestos caen por debajo de un umbral crítico, aumenta el riesgo de mortalidad, especialmente con aprovechamientos intensivos y bajo condiciones climáticas adversas. Estos resultados subrayan la importancia de limitar tanto la profundidad de las incisiones como la intensidad del daño tisular, así como la frecuencia de extracción de resina, especialmente en contextos de estrés hídrico, lo anterior, para garantizar su aprovechamiento sostenible y contribuir a la resiliencia de los ecosistemas en el contexto actual del cambio climático.

5.8 Literatura citada

- Abad-Fitz, I., Vázquez-Lobo, A., Blancas, J., Casas, A., Sierra-Huelsz, J. A., Martínez-Garza, C., Alcalá, R. A., y Beltrán-Rodríguez, L. (2022). Can Resin Extraction Have an Effect on the Reproductive Biology in Burseraceae Species?: A Global Analysis. *Trees, Forests and People*, 10. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2022.100353>
- Agustí, J., & Blázquez, M. A. (2020). Plant vascular development: mechanisms and environmental regulation. *Cell. Mol. Life Sci.* 77, 3711–3728. <https://doi.org/10.1007/s00018-020-03496-w>
- Akinwande, M. O., Dikko, H. G., & Samson, A. (2015). Variance inflation factor: as a condition for the inclusion of suppressor variable (s) in regression analysis. *Open journal of statistics*, 5(07), 754. <https://doi.org/10.4236/ojs.2015.57075>
- Al-Harrasi, A., Khan, A. L., Asaf, S., & Al-Rawahi, A. (2019). *Biology of genus Boswellia*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-16725-7>
- Allen, C. D., Macalady, A. K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., Kitzberger, T., Rigling, A., Breshears, D. D., Hogg E. H., Gonzáles, P., Fensham, R., Zhang, Z., Castro, J., Deminova, N., Lim, J. H., Allard, G., Running, S. T., Semerci, A., & Cobb, N. (2010). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 259, 660–684. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.001>
- Barker-Plotkin, A., Blumstein, M., Laflower, D., Pasquarella, V. J., Chandler, J. L., Elkinton, J. S., & Thompson, J. R. (2021). Defoliated trees die below a critical threshold of stored carbon. *Functional Ecology*, 35(10), 2156–2167. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13891>
- Becerra, J. X., Venable, D. L., Evans, P. H., & Bowers, W. S. (2001). Interactions between chemical and mechanical defenses in the plant genus *Bursera* and their implications for herbivores. *American Zoologist*, 41(4), 865–876. <https://doi.org/10.1093/icb/41.4.865>
- Bhatla, S. C., & Lal, M. A. (2023). *Plant physiology, development and metabolism*. Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-2023-1>
- Bhattacharya, A. (2021). *Soil water deficit and physiological issues in plants*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-33-6276-5>
- Binkley, D., Campoe, O. C., Gspaltl, M., & Forrester, D. I. (2013). Light absorption and use efficiency in forests: Why patterns differ for trees and stands. *Forest ecology and management*, 288, 5–13. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.11.002>
- Booth, G. D., Niccolucci, M. J., & Schuster, E. G. (1994). *Identifying proxy sets in multiple linear regression: An aid to better coefficient interpretation*. U S

Departament of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station.

- Borges, L. L., Santana, F. A., Castro, I. S. L., Arruda, K. M. A., De Oliveira Ramos, H. J., Moreira, M. A., & De-Barros, E. G. (2013). Differentially expressed proteins during an incompatible interaction between common bean and the fungus *Pseudocercospora griseola*. *Molecular breeding*, 32, 933-942. <https://doi.org/10.1007/s11032-013-9922-0>
- Bussotti, F., & Pollastrini, M. (2021). Revisiting the concept of stress in forest trees at the time of global change and issues for stress monitoring. *Plant Stress*, 2, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2021.100013>
- Case, R. J., Tucker, A. O., Maciarelo, M. J., & Wheeler, K. A. (2003). Chemistry and ethnobotany of commercial incense copals copal blanco, copal oro, and copal negro, of North America. *Economic Botany*, 57(2), 189-202. [https://doi.org/10.1663/0013-0001\(2003\)057\[0189:CAEOCI\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1663/0013-0001(2003)057[0189:CAEOCI]2.0.CO;2)
- Cherenet, E., Abiyu, A., Ambachew, G., Kibruyesfa, S., & Tatek, D. (2020). Tapping height and season affect frankincense yield and wound recovery of *Boswellia papyrifera* trees. *Journal of Arid Environments*, 179, 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104176>
- Choat, B., Jansen, S., Brodribb, T. J., Cochard, H., Delzon, S., Bhaskar, R., Bucci, S. J., Taylor, F. S., Gleason, S. M., Hacke, U. G., Jacobsen, A. L., Lens, F., Hafiz, M., Martínez-Vilalta, J., Mayr, S., Mencuccini, M., Patrick, J. M., Nardini, A., Pittermann, J., ... & Zanne, A. E. (2012). Global convergence in the vulnerability of forests to drought. *Nature*, 491(7426), 752-755. <https://doi.org/10.1038/nature11688>
- Choi, W. G., Miller, G., Wallace, I., Harper, J., Mittler, R. & Gilroy, S. (2017). Orchestrating rapid long-distance signaling in plants with Ca²⁺, ROS and electrical signals. *Plant J*, 90, 698-707. <https://doi.org/10.1111/tpj.13492>
- Cohen, J., Cohen, P., West, S. G., & Aiken, L. S. (2003). *Applied Multiple Regression/Correlation Analysis for the Behavioral Sciences*. LAWRENCE ERLBAUM ASSOCIATES, PUBLISHERS.
- Couvreur, V., Ledder, G., Manzoni, S., Way, D. A., Muller, E. B., & Russo, S. E. (2018). Water transport through tall trees: a vertically explicit, analytical model of xylem hydraulic conductance in stems. *Plant, Cell & Environment*, 41(8), 1821-1839. <https://doi.org/10.1111/pce.13322>
- De-Carlo, A., Dosoky, N. S., Satyal, P., Sorensen, A., & Setzer, W. N. (2019). The essential oils of the *Burseraceae*. En: S. Malik (Ed.). *Essential Oil Research. Trends in Biosynthesis, Analytics, Industrial Applications and Biotechnological Production*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-16546-8_4
- Di-Rienzo, J. A., Casanoves, F., Gonzalez, L. A., Tablada, E. M., Díaz, M. P., Robledo, C. W., & Balzarini, M. G. (2005). Estadística para las Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de la Plata.

- Dirzo, R., & Ceballos, G. (2010). Las selvas secas de México: Un reservorio de biodiversidad y laboratorio viviente. En G. Ceballos, A. García, E. Espinoza, C. J. Bezaury y R. Dirzo (Eds.), *Diversidad, amenazas y áreas prioritarias para la conservación de las selvas del Pacífico de México* (pp. 13-20). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- EOS Data Analytics. (2024). NDMI: Índice de Humedad de Diferencia Normalizada. <https://eos.com/es/make-an-analysis/ndmi/#:~:text=El%20%C3%8Dndice%20de%20Humedad%20de,estr%C3%A9s%20h%C3%ADdrico%20en%20los%20cultivos>
- Eshete, A., Sterck, F. J., & Bongers, F. (2012). Frankincense production is determined by tree size and tapping frequency and intensity. *Forest Ecology and Management*, 274, 136-142. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.02.024>
- Evans, J. R., & Clarke, V. C. (2019). The nitrogen cost of photosynthesis. *Journal of Experimental Botany*, 70(1), 7-15. <https://doi.org/10.1093/jxb/ery366>
- Fini, A., Tattini, M., & Esteban, R. (2017). Plants' responses to novel environmental pressures. *Front. Plant Sci.*, 8(2000), 1-4. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.02000>
- Gao, B. C. (1996). NDWI-A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote sensing of environment*, 58(3), 257-266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
- García-Pineda, M. O. (1988). Descripción anatómica de la corteza de seis especies del género *Bursera*. [Tesis Profesional, Universidad Autónoma de México]. Repositorio Institucional de la UNAM. <https://repositorio.unam.mx/>
- Gigliarelli, G., Becerra, J. X., Curini, M., & Marcotullio, M. C. (2015). Chemical composition and biological activities of fragrant Mexican copal (*Bursera* spp.). *Molecules*, 20(12), 22383-22394. <https://doi.org/10.3390/molecules201219849>
- Gitelson, A. A., Viña, A., Ciganda, V., Rundquist, D. C., & Arkebauer, T. J. (2005). Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. *Geophys. Res. Lett.*, 32(8), L08403. <https://doi.org/10.1029/2005GL022688>
- Guo, J., Pang, Q., Wang, L., Yu, P., Li, N., & Yan, X. (2012). Proteomic identification of MYC2-dependent jasmonate-regulated proteins in *Arabidopsis thaliana*. *Proteome Sci* 10(57). <https://doi.org/10.1186/1477-5956-10-57>
- Hassan-Ali, A., Kamal, E. M. F., & Musa-Adam, I. (2009). Effect of position of tapping, tree stem diameter and tapping tools on frankincense yield of *Boswellia papyrifera* in South Kordofan State, Sudan. *Forests, Trees and Livelihoods*, 19(1), 19-26. <https://doi.org/10.1080/14728028.2009.9752651>

- Heinzl, H., & Mittlböck, M. (2002). Adjusted R^2 Measures for the Inverse Gaussian Regression Model. *Computational Statistics*, 17, 525–544. <https://doi.org/10.1007/s001800200125>
- Höll, W. (1975). Radial transport in rays. In MH Zimmermann, JA Milburn, eds, *Transport in Plants I*. Springer, Berlin, pp 432–450
- Huot, B., Yao, J., Montgomery, B. L., & He, S. Y. (2014). Growth–defense tradeoffs in plants: A balancing act to optimize fitness. *Molecular plant*, 7(8), 1267–1287. <https://doi.org/10.1093/mp/ssu049>
- Ikeuchi, M., Rymer, B., & Sugimoto, K. (2020). How do plants transduce wound signals to induce tissue repair and organ regeneration?. *Current opinion in plant biology*, 57, 72–77. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2020.06.007>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. INEGI. (2015). Guía para la interpretación de cartografía: Uso del suelo y vegetación: Escala 1:250 000 Serie V. INEGI. México.
- IUSS Working Group WRB (2015). Base referencial mundial del recurso suelo 2014, Actualización 2015. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. Informes sobre recursos mundiales de suelos 106. FAO.
- Khan, A. L., Al-Harrasi, A., Shahzad, R., Imran, Q. M., Yun, B. W., Kim, Y. H., Kang, S. M., Al-Rawahi, A., & Lee, I. J. (2018). Regulation of endogenous phytohormones and essential metabolites in frankincense-producing *Boswellia sacra* under wounding stress. *Acta Physiologiae Plantarum*, 40(113), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s11738-018-2688-6>
- Koo, A.J. (2018). Metabolism of the plant hormone jasmonate: a sentinel for tissue damage and master regulator of stress response. *Phytochem Rev.*, 17, 51–80 <https://doi.org/10.1007/s11101-017-9510-8>
- Langenheim, J. H. (2003). *Plant resins: Chemistry, evolution, ecology and ethnobotany*. Timber Press.
- León, J., Rojo, E., & Sánchez-Serrano, J. J. (2001). Wound signalling in plants. *Journal of experimental botany*, 52(354), 1–9. <https://doi.org/10.1093/jexbot/52.354.1>
- Linares, E., & Bye, R. (2008). El copal en México. *Biodiversitas*. 78, 8–11.
- Marcotullio, M. C., Curini, M., & Becerra, J. X. (2018). An ethnopharmacological, phytochemical and pharmacological review on lignans from mexican *Bursera* spp. *Molecules*, 23(8), 1–20. <https://doi.org/10.3390/molecules23081976>
- McGibney, D. P. (2023). *Applied Linear Regression for Business Analytics with R. A practical Guide to Data Science with Case Studies*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-21480-6>

- Medina-Lemos, R. (2008). Fascículo 66. Burseraceae. En *Flora del valle de Tehuacán-Cuicatlán* (pp. 1-76). Universidad Nacional Autónoma de México. ISBN 970-32-5083-7
- Mena-Jiménez, F. (2018). Estrategias ecológicas y culturales para garantizar la disponibilidad de productos forestales no maderables: Árboles medicinales en la Selva Baja del Sur de Morelos [Tesis de maestría, Universidad Autónoma del Estado de Morelos]. Colección Tesis Postgrado. <http://riaa.uaem.mx/handle/20.500.12055/402>
- Mengistu, T., Sterck, F. J., Anten, N. P. A., & Bongers, F. (2012). Frankincense tapping reduced photosynthetic carbon gain in *Boswellia papyrifera* (Burseraceae) trees. *Forest Ecology and Management*, 278, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.04.029>
- Mengistu, T., Sterck, F. J., Fetene, M., & Bongers, F. (2013). Frankincense tapping reduces the carbohydrate storage of *Boswellia* trees. *Tree physiology*, 33(6), 601-608. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpt035>
- Mengistu, W. T. (2011). Physiological ecology of the frankincense tree [Tesis Doctoral, Wageningen University & Research]. WUR Library. <https://www.wur.nl/es/publication-details.htm?publicationId=publication-way-343036383936>
- Mesa-Sierra, N., Peña-Domene, M., Campo, J., y Giardina, C. P. (2022). Restoring mexican tropical dry forests: a national review. *Sustainability*, 14(7). <http://dx.doi.org/10.3390/su14073937>
- Montero-Granados. R. (2016). *Modelos de regresión lineal múltiple*. Universidad de Granada. España. Disponible en: https://www.ugr.es/~montero/matematicas/regresion_lineal.pdf
- Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2012). *Introduction to Linear Regresión Analysis*. John Wiley & Sons, Inc.
- Montúfar-López, A. (2016). Copal de *Bursera bipinnata*. Una resina mesoamericana de uso ritual. *Trace*, 70, 45-78.
- Naimi, B., Hamm, N. A., Groen, T. A., Skidmore, A. K., & Toxopeus, A. G. (2014). Where is positional uncertainty a problem for species distribution modelling?. *Ecography*, 37(2), 191-203. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2013.00205.x>
- Negussie, A., Gebrehiwot, K., Yohannes, M., Norgrove, L., & Aynekulu, E. (2021). Continuous resin tapping for frankincense harvest increases susceptibility of *Boswellia papyrifera* (Del.) Hochst trees to longhorn beetle damage. *Heliyon*, 7(2), 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06250>.
- Nguy-Robertson, A. L., Peng, Y., Gitelson, A. A., Arkebauer, T. J., Pimstein, A., Herrmann, I., Karnieli, A., Rundquist, D. C., & Bonfil, D. J. (2014). Estimating green LAI in four crops: Potential of determining optimal spectral bands for a universal algorithm. *Agricultural and forest*

- Niethammer, P. (2016). The early wound signals. *Current opinion in genetics & development*, 40, 17-22. <https://doi.org/10.1016/j.gde.2016.05.001>
- O'brien, R. M. (2007). A caution regarding rules of thumb for variance inflation factors. *Quality & quantity*, 41, 673-690. <https://doi.org/10.1007/s11135-006-9018-6>
- Oliva-Carrasco, L., Bucci, S. J., Di-Francescantonio, D., Lezcano, O. A., Campanello, P. I., Scholz, F. G., Rodríguez, S., Madanes, N., Cristiano, P. M., Hao, G. Y., Holbrook, N. M., & Goldstein, G. (2015). Water storage dynamics in the main stem of subtropical tree species differing in wood density, growth rate and life history traits. *Tree physiology*, 35(4), 354-365. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpu087>
- Pallardy, S. G. (2008). *Physiology of Woody plants*. Science Direct. ISBN: 978-0-12-088765-1
- Pfautsch, S., Renard, J., Tjoelker, M. G., & Salih, A. (2015). Phloem as capacitor: radial transfer of water into xylem of tree stems occurs via symplastic transport in ray parenchyma. *Plant physiology*, 167(3), 963-971. <https://doi.org/10.1104/pp.114.254581>
- Piper, F. I., & Paula, S. (2020). The role of nonstructural carbohydrates storage in forest resilience under climate change. *Current Forestry Reports*, 6, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s40725-019-00109-z>
- R Core Team. (2024). R: A language and environment for statistical computing (Versión 4.4.1) [Software]. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>
- Rzedowski, J., Medina-Lemus, R., & Calderón de Rzedowski, G. (2004). Las especies del género *Bursera* (*Burseraceae*) en la cuenca superior del río Papaloapan (México). *Acta botánica Mexicana*, 66, 23-151. <https://doi.org/10.21829/abm66.2004.970>
- Sabo, P., Salako, K. V., Kakaï, R. G., & Trees, A. O. (2022). Combined effects of tree size and tapping techniques on resin production of *Boswellia dalzielii* Hutch., an African frankincense tree. *Trees*, 36, 1697–1710. <https://doi.org/10.1007/s00468-022-02320-1>
- Sahu, S. K. (2024). *Introduction to Probability, Statistics & R*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-37865-2>
- Scafaro, A. P., Posch, B. C., Evans, J. R., Graham, D. F., & Owen, K. A. (2023). Rubisco deactivation and chloroplast electron transport rates co-limit photosynthesis above optimal leaf temperature in terrestrial plants. *Nat Commun* 14, 2820. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38496-4>

- Schober, P., Boer, C., & Schwarte, L. A. (2018). Correlation coefficients: appropriate use and interpretation. *Anesthesia & analgesia*, 126(5), 1763-1768. <https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000002864>
- Scholz, F. C., Bucci, S. J., Goldstein, G., Meinzer, F. C., Franco, A. C., & Miralles-Wilhelm, F. (2008). Temporal dynamics of stem expansion and contraction in savanna trees: withdrawal and recharge of stored water. *Tree Physiology*, 28(3), 469-480. <https://doi.org/10.1093/treephys/28.3.469>
- Sentinelhub. (2024). Normalized Difference Moisture Index (NDMI). <https://custom-scripts.sentinel-hub.com/sentinel-2/ndmi/>
- Serrano-Rosas, I. (2018). *Diferenciación de los sistemas vascular y de defensa en plántulas del género Bursera (Burseraceae)*. [Tesis Profesional, Universidad Autónoma de México]. Repositorio Institucional de la UNAM. <https://repositorio.unam.mx/>
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). (2024). Estación Meteorológica Automatizada El Limón, Tepalcingo. Datos climáticos. México.
- Sevanto, S. (2018). Drought impacts on phloem transport. *Current Opinion in Plant Biology*, 43, 76-81. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2018.01.002>
- Silpi, U., Lacointe, A., Kasempsap, P., Thanysawanyangkura, S., Chantuma, P., Gohet, E., Musigamart, N., Cément, A., & Thaler, P. (2007). Carbohydrate reserves as a competing sink: evidence from tapping rubber trees. *Tree physiology*, 27(6), 881-889. <https://doi.org/10.1093/treephys/27.6.881>
- Singh, R., & Mangat, N. S. (1996). Simple Random Sampling. In: *Elements of Survey Sampling. Kluwer Texts in the Mathematical Sciences*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-017-1404-4_3
- Thompson, M. V., & Holbrook, N. M. (2003). Scaling phloem transport: water potential equilibrium and osmoregulatory flow. *Plant, Cell & Environment*, 26(9), 1561-1577. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2003.01080.x>
- Trejo, I. (2010). Las selvas secas del pacífico Mexicano. En G. Ceballos, A. García, E. Espinoza, C. J. Bezaury y R. Dirzo (Eds.), *Diversidad, amenazas y áreas prioritarias para la conservación de las selvas del Pacífico de México* (pp. 13-20). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Ullmann-Zeunert, Lynn., Stanton, M. A., Wielsch, N., Bartram, S., Hummert, C., Svatos, A., Baldwuing, I. T., & Groten, K. (2013). Quantification of growth–defense trade-offs in a common currency: nitrogen required for phenolamide biosynthesis is not derived from ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase/oxygenase turnover. *The Plant Journal* 75(3), 417-429. <https://doi.org/10.1111/tpj.12210>
- Wang, Z., Zhou, Z., & Wang, C. (2021). Defoliation-induced tree growth declines are jointly limited by carbon source and sink activities. *Science of The Total Environment*, 762, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143077>

- Wei, T., & Simko, V. (2021). R Package “Corrplot”: Visualization of a Correlation Matrix.
- Wittmann, C., & Pfanz, H. (2008). Antitranspirant functions of stem periderms and their influence on corticular photosynthesis under drought stress. *Trees*, 22, 187–196. <https://doi.org/10.1007/s00468-007-0194-3>
- Wolfe, B. T. (2020). Bark water vapour conductance is associated with drought performance in tropical trees. *Biology Letters*, 16(8). <https://doi.org/10.1098/rsbl.2020.0263>
- Wright, I. J., Reich, P. B., Westoby, M., Ackerly, D. D., Baruch, Z., Bongers, F., Cavender-Bares, J., Chapin, T., Cornelissen, J. H. C. Diemer, M., Flexas, J., Garnier, E., Groom, P. K., Gulias, J., Hikosaka, K., Lamont, B. B, Lee, T., Lee, W., Lusk, C., & Villar, R. (2004). The worldwide leaf economics spectrum. *Nature*, 428, 821-827. <https://doi.org/10.1038/nature02403>
- Zhao, J., Lu, Z., Wang, L., & Jin, B. (2021). Plant Responses to Heat Stress: Physiology, Transcription, Noncoding RNAs, and Epigenetics. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(1), 117. <https://doi.org/10.3390/ijms22010117>