



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS.

“Evaluación de caracteres morfoanatómicos en hojas de *Annona purpurea* en tres poblaciones distintas.”

Tesis que para obtener el título de

LICENCIADA EN BIOLOGÍA

PRESENTA:

Yesenia Palacios Hernández.

DIRECTORA: Dra. Agustina Rosa Andrés Hernández.



Facultad de Ciencias Biológicas
BUAP

Abril 2026

Agradecimientos

Agradezco profundamente a la Facultad de Ciencias Biológicas por brindarme un espacio de formación académica y personal, así como por fomentar un ambiente propicio para el aprendizaje y el desarrollo del conocimiento. Al laboratorio 324 de fisiología vegetal, por su apoyo constante, compañerismo y disposición para el trabajo en equipo, lo cual hizo posible el desarrollo de este proyecto en un entorno acogedor. Al proyecto de Colima, por facilitar los espacios y condiciones necesarias para la realización del trabajo de campo y laboratorio.

De manera especial, agradezco a la Dra. Agustina Rosa Andrés Hernández por su acompañamiento, dedicación y compromiso a lo largo de este proceso; su guía, exigencia académica y motivación constante fueron fundamentales para superar mis propios límites y consolidar este trabajo, por último, agradezco a mi amiga Verónica Vargas Arreguin por ser la mejor compañera en campo.

Agradezco con mucho amor a mis padres Gisela Hernández y Francisco Palacios, por brindarme el apoyo incondicional en todos mis proyectos, y darme herramientas para la vida, a mi novio Isao por estar presente en cada paso de mi carrera por comprenderme y creer en mi que es lo que me ha llevado a aventurarme en nuevos proyectos con la seguridad de que no camino sola.

Dedicatoria

A las mujeres de mi familia, quienes han sido ejemplo de fortaleza, resiliencia e inspiración para seguir mi propio camino. A través de ustedes aprendí que es posible avanzar incluso en los momentos más difíciles, y deseo que este logro también sea un reflejo de su lucha.

A mi familia y a mis amigas, por su apoyo, paciencia y compañía a lo largo de este proceso, por creer en mí incluso cuando yo dudaba, y por ser parte fundamental de este camino.

A mí, porque solo yo sé lo que ha costado llegar hasta aquí; por no rendirme, por mi esfuerzo, disciplina y determinación para continuar a pesar de las dificultades.

Y finalmente, a mi corazón, Isao, por inspirarme constantemente a superar mis propios límites, por ver más allá de mí y recordarme siempre de lo que soy capaz.

Que este trabajo sea también una pequeña forma de inspirar a otras mujeres a creer en sí mismas, a seguir sus sueños y a nunca rendirse.

Resumen.

La extracción de material pétreo en zonas mineras provoca la emisión de partículas suspendidas que se depositan sobre la vegetación circundante, alterando funciones fisiológicas y estructurales. Por lo anterior, se evaluó el impacto del material particulado sedimentable (MPS) generado por actividades mineras sobre las características morfoanatómicas y fisicoquímicas de las hojas de *Annona purpurea* en el municipio de Minatitlán, Colima. Para esto se eligieron tres sitios de muestreo, en un gradiente de exposición al material pétreo, donde se recolectaron hojas maduras de *A. purpurea* para el análisis (MPS), pH y conductividad eléctrica, densidad y tamaño estomático; así como el análisis anatómico de la lámina y el pecíolo. Los resultados mostraron que el sitio de alto impacto presentó la mayor acumulación de polvo, confirmando el gradiente de exposición. El análisis del pH reveló diferencias significativas entre sitios, con valores más altos en el sitio de alto impacto con un pH promedio de 7.83. En contraste, la conductividad eléctrica no mostró diferencias significativas mediante ANOVA. Los valores promedio muestran una tendencia clara, donde el sitio Medio presentó la mayor conductividad ($41.74 \pm 26.08 \mu\text{S/cm}$), seguido por el sitio Bajo ($39.34 \pm 34.15 \mu\text{S/cm}$) y el sitio Alto con el valor más bajo ($14.30 \pm 5.35 \mu\text{S/cm}$). Los estomas son diferentes en su densidad, largo y ancho entre los tres sitios. El sitio de bajo impacto presentó la mayor densidad estomática ($95.25 \text{ estomas} \cdot \text{mm}^{-2}$), mientras que los sitios con mayor exposición al polvo mostraron densidades menores ($80.15 \text{ estomas} \cdot \text{mm}^{-2}$ / $83.76 \text{ estomas} \cdot \text{mm}^{-2}$). El análisis anatómico reveló diferencias significativas en el lumen y el espesor de la pared de los vasos del pecíolo, así como en el grosor del parénquima empalizada y esponjoso. Los resultados indican que *A. purpurea* presenta una respuesta compleja y variable frente a la deposición de material particulado, en contraste con lo reportado en la literatura para otras especies vegetales; *A. purpurea* comparte patrones generales como modificaciones en el pH foliar, variaciones en la conductividad eléctrica y cambios en las características estomáticas. Mientras que en muchas especies se reportan reducciones marcadas en la densidad estomática y daños fisiológicos evidentes, en *A. purpurea* las alteraciones fueron moderadas y se expresaron principalmente como ajustes estructurales en el tamaño de los estomas y en la anatomía del pecíolo. Estos parámetros se mantienen dentro de rangos reportados para tejidos foliares funcionales. Sin embargo, sí reflejan alteraciones fisicoquímicas asociadas al estrés ambiental derivado del (MPS).

Palabras clave: *Annona purpurea*, material particulado sedimentable, estomas, pH, Conductividad, hojas, pecíolo.

ÍNDICE

I.	Introducción	7
II.	Antecedentes	9
II.I	<i>Material particulado sedimentable y su impacto en la vegetación</i>	9
II.II	<i>Estudios en Annonaceae</i>	14
II.III	<i>Anatomía de la hoja de Annonaceae</i>	16
II.IV	<i>Parámetros bioquímicos como indicadores de contaminación (pH y conductividad eléctrica).</i>	17
II.V	<i>Efectos de la contaminación en los estomas y caracteres anatómicos</i>	18
III.	Justificación	20
IV.	Pregunta	21
V.	Hipótesis	21
VI.	Objetivo general	21
VI.I	<i>Objetivos específicos.</i>	21
VII.	Área de estudio	22
VIII.	Sitios de trabajo	24
IX.	Metodología	29
IX.I	<i>Evaluación de pH y conductividad eléctrica.</i>	29
IX.II	<i>Variables estomáticas.</i>	30
IX.III	<i>Toma de muestra de polvos</i>	30
IX.IV	<i>Microtecnia Histología vegetal.</i>	32
IX.	Análisis estadísticos.	33
X.	Resultados	34
XI.I	<i>pH y conductividad</i>	34
XI.II	<i>Tamaño de los estomas.</i>	37
XI.III	<i>Densidad estomática</i>	38
XI.IV	<i>Relación entre la densidad estomática y los polvos.</i>	39
XI.V	<i>Anatomía de la hoja</i>	40
XI.VI	<i>Anatomía del pecíolo</i>	41
XI.VII	<i>Lumen del vaso de la hoja</i>	42
XI.VIII	<i>Lumen de la pared del vaso de la hoja</i>	43

<i>XI.IX Parénquima empalizada.</i>	44
<i>XI.X Parénquima esponjoso.</i>	44
<i>XI.XI Largo del lumen del vaso del peciolo.</i>	45
<i>XI.XII Lumen del vaso del peciolo.</i>	45
<i>XI.XIII Pared del vaso del peciolo.</i>	45
<i>XI.XIV Análisis de componentes principales (PCA)</i>	47
XI. Discusión.	48
<i>XII.I pH foliar</i>	48
<i>XII.II Conductividad eléctrica</i>	49
<i>XII.III Variables estomáticas.</i>	50
<i>XII.IV Hojas</i>	51
XII. Conclusiones	55
XIII. Recomendaciones	57
XIV. Referencias	58

I. Introducción

La minería es una de las principales actividades económicas en México y juega un papel crucial en el desarrollo del país. A través de concesiones otorgadas a empresas nacionales e internacionales, se extraen diversos minerales utilizados en múltiples industrias (INEGI, 2020). Los productos obtenidos de la minería satisfacen una enorme gama de necesidades de la sociedad. Sin embargo, esta actividad genera importantes impactos ambientales, siendo uno de los más relevantes la emisión de material particulado al ambiente, el cual puede afectar tanto la calidad del aire como la vegetación circundante (Ghose, 2007).

El material particulado se compone de partículas sólidas o líquidas suspendidas en el aire, teniendo una composición química y un tamaño que varía de 0.005 a 100 μm de diámetro aerodinámico (Sborato et al., 2007). Su origen puede ser natural o antropogénico, pero en zonas rurales o minero-industriales su concentración suele ser significativamente mayor (Dalmasso et al., 1997) debido a la remoción de suelo y roca, el tráfico de maquinaria pesada y los procesos de extracción y refinamiento de minerales. Estas partículas pueden depositarse sobre la vegetación, alterando sus funciones fisiológicas y estructurales, lo que a su vez puede repercutir en su crecimiento, metabolismo y capacidad de adaptación (Hirano et al., 1995; Flückiger et al., 2002).

En este contexto, la vegetación puede actuar como un bioindicador de contaminación, ya que las hojas y otros órganos vegetales pueden acumular material particulado, modificando su morfología y anatomía. Diversos estudios han reportado cambios en la estructura foliar de plantas expuestas a ambientes contaminados, incluyendo la obstrucción de estomas, alteraciones en la cutícula y disminución en la tasa de fotosíntesis (Sharma & Tripathi, 2009). Sin embargo, la información sobre el impacto del material particulado en especies nativas de regiones perturbadas de México es limitada.

En el estado de Colima, el municipio de Minatitlán está localizado a 55 kilómetros de Colima. Está expuesto a la mina a cielo abierto de Peña Colorada, una de las más importantes del país, donde se lleva a cabo la exploración, explotación y beneficio del mineral de hierro que satisface a la industria siderúrgica nacional. Produce

actualmente más de 4.1 millones de concentrado de hierro y 3.6 millones de toneladas de pellet del mismo material, abasteciendo el 30 % de la demanda nacional. Dentro de las obras secundarias generadas para la producción de hierro se encuentran los bancos para la extracción de material pétreo tipo balastre, que es utilizado como material de aportación para la construcción y mantenimiento de las cortinas contenedoras (bordos) de las presas de jales y para el mantenimiento de las vialidades operativas de las mismas (Peña Colorada, s. f.).

Las actividades mineras desarrolladas en el complejo Peña Colorada, particularmente la explotación a cielo abierto, la remoción de material estéril, la operación de bancos para la extracción de material pétreo tipo balastre y el tránsito constante de maquinaria pesada, implican procesos de fragmentación y remoción superficial de suelo y roca. Estas actividades favorecen la generación de material particulado, el cual puede ser transportado y depositarse como polvo sedimentable sobre el entorno inmediato, incluida la vegetación circundante.

El municipio de Minatitlán presenta un clima que favorece la distribución de una gran variedad de especies de plantas, los registros taxonómicos han reportado 127 familias (Padilla 2008) agrupadas en diferentes géneros. Una especie muy valorada y con amplia distribución en el estado es *Annona purpurea* Moc. & Sessé ex Dunal.

Annona purpurea, conocida localmente como "cabeza de negro", es un árbol que puede alcanzar más de 10m de altura. Se caracteriza por sus hojas grandes, membranáceas y pecíolos cortos, además de producir un fruto comestible cubierto por un indumento tomentoso (Standley et al., 1946). Esta especie es común en el sur de México y suele encontrarse en bosques tropicales húmedos y secos, principalmente en áreas con cierto grado de perturbación (Hernández y Lozada, 2012). En Colima, se distribuye ampliamente en la zona de Minatitlán (Padilla, 2008), donde es aprovechada por la población local por sus frutos comestibles y potenciales usos medicinales.

Si bien, se han realizado estudios sobre la distribución, ecología y características químicas y anatómicas de *Annona purpurea*, se conoce poco sobre su respuesta a ambientes contaminados por material particulado. Estudios en otras especies han mostrado que la acumulación de polvo en la superficie foliar puede afectar la

morfología de la hoja y el pecíolo, disminuyendo la eficiencia fotosintética y alterando su estructura anatómica (Flückiger et al., 2002). Sin embargo, no se han realizado investigaciones específicas sobre cómo el material particulado sedimentable derivado de la extracción de piedra afecta de manera directa la anatomía de esta especie en México. Por lo que este estudio tiene como objetivo evaluar el impacto del material particulado sedimentado (MPS), sobre las hojas de la especie *Annona purpurea*, conocer las afecciones anatómicas, desde las características estomáticas hasta caracteres químicos.

II. Antecedentes

II.1 Material particulado sedimentable y su impacto en la vegetación

La presencia de material particulado sedimentable (MPS) en el ambiente constituye uno de los principales factores de alteración para la vegetación, especialmente en zonas urbanas e industriales. Desde finales del siglo XX, diversos estudios han documentado los efectos del polvo atmosférico sobre las características morfo anatómicas de las hojas y su capacidad para retener el polvo sobre las mismas en zonas de alta contaminación urbanas o rurales.

Uno de los primeros estudios científicos que analizan los efectos del polvo de cemento sobre la vegetación fue el de Peirce (1909), quien documenta la deposición intensa de polvo proveniente de una fábrica de cemento en California, observando su acumulación sobre hojas, frutos y suelos hasta varios kilómetros de distancia. El autor demostró que el polvo está compuesto mayoritariamente por carbonatos finos, capaces de adherirse firmemente a las superficies vegetales. El principal impacto identificado no es químico ni tóxico, sino mecánico: las partículas obstruyen los estomas, dificultando el intercambio gaseoso necesario para la respiración y la fotosíntesis. El estudio resalta que, en climas secos, donde la lluvia no elimina los depósitos, los efectos negativos pueden intensificarse.

Cuando hablamos de la deposición de polvos pensamos también en su relación con la fotosíntesis. Appleman (1917) evaluó el efecto de la deposición de polvo sobre la fotosíntesis, a partir de observaciones en vegetación expuesta a polvo de cemento en California. El autor reportó que las partículas de polvo podrían bloquear hasta un

80 % de la radiación incidente sobre la superficie foliar; sin embargo, este sombreado no redujo de manera significativa la síntesis de carbohidratos. Los resultados indicaron que la fotosíntesis puede mantenerse aún con niveles elevados de polvo, debido a que las plantas requieren solo una fracción de la luz total disponible para sostener este proceso. Este trabajo sentó las bases para comprender que el impacto del polvo no depende únicamente de la reducción de luz, sino de otros factores fisiológicos y estructurales de la hoja como la disponibilidad de CO₂, el contenido de pigmentos fotosintéticos y la eficiencia fotosintética, así como características anatómicas como la densidad y tamaño estomático, el grosor del mesófilo, la presencia de tricomas y la estructura de la cutícula.

Por otro lado, Skoss (1995) realizó un análisis de la estructura, composición química y permeabilidad de la cutícula vegetal, en su papel como barrera fisiológica y como vía de interacción con el ambiente. El autor describe la cutícula como una matriz lipoidal compuesta principalmente por cutina y ceras, cuya proporción y espesor varían en función de la especie, la edad de la hoja y las condiciones ambientales. Las hojas expuestas a mayor radiación solar o a déficit hídrico desarrollan cutículas más gruesas y ricas en cutina, lo que reduce la permeabilidad y aumenta la resistencia a la pérdida de agua. Además, analiza experimentalmente la penetración de sustancias aplicadas sobre la hoja, concluyendo que, aunque los estomas son una vía importante de entrada, la difusión a través de la cutícula constituye un mecanismo relevante, especialmente para compuestos lipofílicos.

La deposición de polvo procedente de actividades como canteras, minería a cielo abierto y tráfico pesado impacta a diversos tipos de vegetación (cultivos, pastizales, bosques, líquenes) (Farmer, 1993; Grantz et al., 2003). Se han documentado efectos como disminución de la fotosíntesis, alteración de la respiración y transpiración. La mayoría de los ecosistemas pueden verse afectados por depósitos de polvo (Farmer, 1993). Por otro lado la deposición atmosférica como vía fundamental de entrada de nutrientes y contaminantes (nitrógeno, azufre, calcio, entre otros) en los ecosistemas terrestres fue estudiada por (Lovett 1994) donde demostró que la deposición seca y húmeda puede modificar significativamente la química del suelo, la nutrición vegetal y la productividad de los ecosistemas, el autor

destaca que, aunque algunos compuestos depositados pueden actuar como fertilizantes, un exceso de deposición puede generar desequilibrios nutricionales, acidificación del suelo y estrés fisiológico en la vegetación, destacando la importancia de las partículas atmosféricas como vehículos de transporte de elementos minerales.

En uno de los principales trabajos, Dalmasso *et al.* (1997) evaluaron el papel de la vegetación como indicadora de contaminación por polvo atmosférico en áreas cercanas a una cementera, proponen una metodología muy eficaz para la obtención del polvo depositado y su tratamiento, que incluyó tres zonas de exposición (alta, media y baja), donde identificaron diferencias notables en la retención de polvo entre especies. *Acacia caven*, *Geoffroea decorticans* y *Prosopis nigra* mostraron una mayor capacidad de retención, mientras que *Prosopis alba*, *Aspidosperma quebrachoblanco* y *Eucalyptus camaldulensis* presentaron una menor retención. Los autores destacaron la relevancia de realizar estudios morfo anatómicos detallados para comprender cómo las características foliares influyen en la acumulación de material particulado.

Por otro lado, Sharifi *et al.* (1997) demostraron que las partículas finas pueden acumularse en la epidermis y alojarse en las aperturas estomáticas, interfiriendo con el intercambio gaseoso. Esta obstrucción provoca una disminución en la conductancia estomática, alteraciones en la transpiración y modificaciones indirectas en la fotosíntesis. El estudio resalta que el tamaño y la forma de las partículas de polvo son determinantes en el grado de afectación estomática, y que estas respuestas pueden variar entre especies, dependiendo de la morfología foliar y estomática.

Existen estudios enfocados en el estudio de las características de la hoja y cómo influyen en la deposición y retención de polvos, por ejemplo, Neinhuis *et al.* (1998) analizó cómo la micro morfología de la superficie foliar y las propiedades de humectabilidad influyen en la acumulación y remoción estacional de contaminantes atmosféricos en hojas de *Fagus sylvatica*, *Quercus robur* y *Ginkgo biloba*. Los autores demuestran que la cantidad de partículas depositadas sobre las hojas no depende únicamente de la carga atmosférica, sino de manera crítica de la estructura de la cutícula y de las ceras epicuticulares.

Los resultados muestran que hojas con superficies altamente hidrofóbicas y micro estructuradas entre ellas el *Ginkgo biloba* presentan una menor retención de partículas, debido a una mayor eficiencia de autolimpieza asociada al escurrimiento del agua. En contraste, superficies más hidrofílicas o menos estructuradas retienen mayores cantidades de contaminantes. Además, se observa una marcada variación estacional, relacionada con el envejecimiento foliar y los cambios en la composición de las ceras.

Hacke *et al.* (2001) han demostrado que el diámetro y el lumen de los vasos en el pecíolo están estrechamente relacionados con la eficiencia hidráulica, absorción de minerales y nutrientes de la planta. Cambios en el lumen y en la pared de los vasos observados entre sitios pueden interpretarse como una estrategia entre eficiencia hidráulica y seguridad frente al estrés ambiental. Carlquist (2001) demostró que la anatomía varía según el ambiente, donde especies de zonas secas presentan vasos más pequeños y mayor resistencia a la cavitación, aunque menor eficiencia en el transporte de agua, mientras que especies de ambientes húmedos desarrollan vasos más grandes y eficientes, lo que sugiere una relación entre estructura del xilema y condiciones ecológicas. Tyree y Zimmermann (2002) demostraron que el transporte de agua en el xilema depende en gran medida del diámetro del lumen de los vasos, ya que un mayor tamaño incrementa la conductividad hidráulica sin embargo esta mayor eficiencia implica también una mayor susceptibilidad a la cavitación. En hojas expuestas a contaminantes, Singh *et al.* (2007) documentaron una disminución del lumen vascular asociada con limitaciones en la transpiración y el intercambio gaseoso, lo que eventualmente se reflejó en cambios anatómicos como modificaciones en el lumen y la pared de los vasos, o en el grosor del parénquima. Gostin (2009) analizó los efectos de la contaminación atmosférica sobre la estructura foliar en especies de Fabácea, encontrando una disminución en el grosor de la lámina foliar y en la altura de las células del parénquima en empalizada, así como una reducción en el tamaño de las células epidérmicas. Asimismo, se observó un aumento en el grosor de la pared externa de la epidermis, una disminución del tamaño de los estomas y, en algunos casos, un incremento en el índice estomático.

Además de las características foliares otro factor importante en la retención del polvo es la estacionalidad, Alcalá *et al.* (2010) analizaron el potencial de retención de polvo atmosférico en tres especies del ecosistema semiárido de San Luis Potosí, México. Su investigación evidenció diferencias significativas entre especies, atribuibles a características morfoanatómicas intrínsecas y factores antropogénicos. Los resultados mostraron una mayor retención de polvo durante el invierno y una menor en verano, lo que sugiere una relación entre la anatomía de la hoja, la estacionalidad y la retención de partículas sedimentables. Chaudhary *et al.* (2018) analizaron la deposición de material particulado suspendido (SPM) sobre las hojas y su impacto en la fisiología y estructura vegetal, señalando que la acumulación de partículas en la superficie foliar reduce la fotosíntesis al interferir con la absorción de luz y obstruir los estomas, lo que limita el intercambio gaseoso.

En estudios sobre la apertura estomática y su relación con contaminantes como el aumento de aerosoles atmosféricos, realizados por Grantz *et al.* (2018) se demostró que las partículas en suspensión pueden reducir la apertura estomática, alterar la radiación incidente sobre las hojas y afectar la eficiencia fotosintética. Además, se identifica que la deposición de aerosoles puede inducir estrés fisiológico, especialmente en ambientes con alta carga particulada de origen antropogénico. Por otro lado, McGranahan *et al.* (2021) evaluaron experimentalmente el efecto del polvo fugitivo de caminos no pavimentados sobre plantas anuales y gramíneas perennes bajo condiciones controladas. Los autores encontraron que, en plantas anuales, la acumulación de polvo provocó disminución progresiva de la conductancia estomática, cambios en la temperatura foliar y modificaciones en el contenido de clorofila. De manera inesperada, algunas especies mostraron incrementos en la eficiencia fotosintética, posiblemente debido a un efecto de dispersión de la luz generado por el polvo. En contraste, las gramíneas perennes mostraron una alta resistencia fisiológica, sin reducciones significativas en el crecimiento. El estudio concluye que el impacto del polvo depende del tipo de planta, su estrategia funcional y la duración de la exposición. La acumulación de polvo no solo altera anatomía sino también morfología foliar y pigmentos, Al respecto Devkota *et al.* (2025) compararon especies arbóreas en zonas industriales y residenciales de Nepal, midiendo carga de polvo en invierno y monzón, el área foliar específica y contenido de clorofila. Se observaron reducciones de hasta

~20-28 % en el área foliar específica y disminuciones del contenido de clorofila en zonas más contaminadas.

II.II Estudios en Annonaceae

La familia Annonaceae es una de las más diversas e importantes dentro del orden Magnoliales, y está compuesta principalmente por árboles, arbustos y, en menor medida, lianas. Comprende aproximadamente 120 géneros y más de 2,400 especies, con una distribución predominantemente pan tropical, aunque con mayor riqueza en regiones tropicales de América, África y el sudeste asiático (Chatrou et al., 2012; Couvreur et al., 2021).

Pueden estar representados en formas biológicas como Árboles, arbustos o lianas; indumento simple o estrellado. Hojas simples, alternas, enteras, deciduas o persistentes, típicamente dísticas, venación pinnada. Inflorescencias generalmente cimosas o flores solitarias. Frutos apocárpicos o sincárpicos, monocarpes indehiscentes, parecidos a bayas, algunas veces frutos secos dehiscentes (*Anaxagorea*) o indehiscentes, o los monocarpes a veces coalescentes para formar un fruto agregado, estipitados, flexibles. Semillas una a varias, comúnmente ariladas, endospermo oleoso, ruminado a profundamente plegado laminar.

Muchas especies de la familia tienen una alta importancia ecológica, al formar parte estructural de bosques tropicales, y económica, ya que varios géneros como *Annona*, *Asimina* y *Uvaria* producen frutos comestibles y compuestos con potencial farmacológico (Rainer & Chatrou, 2006; Sauquet et al., 2017).

Annonaceae es una familia pan tropical que llega hasta el norte de Australia y las Islas del Pacífico, constituida por 108 a 130 géneros y entre 2300 y 2400 especies (Kessler, 1993; Rainer y Chatrou, 2006). Generalmente se encuentra en regiones tropicales y templadas, tanto del Viejo como del Nuevo Mundo (Cronquist 1981; Mols & Kebl, 2003) por debajo de los 2000 msnm; representadas principalmente en selvas tropicales y ha sido conocida durante siglos gracias a sus especies cultivadas con diversos fines, entre los que destaca el alimenticio.

México, registra 14 géneros y 63 especies, de las cuales *Annona* representa el grupo más diverso ya que al menos 18 especies se distribuyen en dentro de México,

De la Cruz et al., (2016) señalaron que el país constituye un centro de diversidad importante para la familia, con mayor presencia en Chiapas, Oaxaca, Veracruz y Guerrero. Puede tener una amplitud geográfica desde el occidente de México incluyendo Nayarit hasta sectores de Centroamérica y Sudamérica (Topete-Corona, 2018).

El género *Annona* ha sido objeto de diversos estudios que han permitido comprender su diversidad, distribución y características morfoanatómicas, especialmente en regiones tropicales del continente americano. La especie *Annona purpurea* ha sido estudiada principalmente por sus características anatómicas, ecológicas y fitoquímicas. León (2003) realizó un análisis detallado de la anatomía de la madera en siete especies del género *Annona* incluyendo *A. purpurea*, proporcionando información relevante sobre la disposición y tipo de vasos, fibras, parénquima y radios. Estos datos resultan esenciales para la identificación taxonómica y la comprensión de las adaptaciones ecológicas del género.

Hilje (2018) trabajó sobre genética de poblaciones en *A. purpurea* en bosques húmedos y secos de Costa Rica mediante el uso de microsatélites. Éstos mostraron niveles de diversidad genética comparables con los reportados para otros árboles tropicales y otras especies de Annonaceae. Esta información molecular resulta clave para comprender la variabilidad poblacional y guiar estrategias de conservación y manejo sostenible. Ese mismo año también Topete-Corona (2018) evaluó la ecología y relevancia económica de *A. purpurea* en el occidente de México. Se registraron individuos en distintos estados de desarrollo (juveniles y adultos), lo que sugiere procesos activos de regeneración natural. Además, que factores de perturbación como incendios, apertura de claros y pastoreo favorecen el establecimiento de la especie, mientras que los bosques cerrados presentan menor número de individuos. También documentó el uso local del fruto conocido como "cabeza de negro", reforzando la importancia socioeconómica de la especie en comunidades rurales.

Por otro lado, Vidal-Lezama et al. (2019) profundizaron en los atributos nutritivos y fitoquímicos de *A. Purpurea*. destacando su valor agroindustrial y su aprovechamiento local en estados como Colima, Jalisco, Nayarit, Guerrero, Oaxaca

y Chiapas (Figura 1.). Señalaron que sus frutos presentan elevado contenido nutrimental y antioxidante, aunque la especie permanece subutilizada debido a la falta de domesticación y acciones de conservación genética. Hernández-Fuentes et al. (2019) complementariamente identificaron cinco nuevas acetogeninas —anno-purpurinas A-E— aisladas de las raíces de *A. purpurea*, las cuales mostraron actividad citotóxica frente a diversas líneas celulares cancerígenas. Este hallazgo refuerza su relevancia como fuente de compuestos bioactivos con potencial terapéutico.

Finalmente, López-Martínez et al. (2021) compararon las propiedades nutricionales y funcionales de *A. muricata*, *A. cherimola* y *A. purpurea*, determinando que ésta última posee el mayor contenido de compuestos fenólicos, así como una destacada actividad antioxidante y citotóxica in vitro. Estos resultados refuerzan su importancia como recurso agroindustrial y como especie con aplicaciones nutracéuticas y medicinales.

En conjunto, los estudios desarrollados en las últimas dos décadas evidencian que *Annona purpurea* es una especie de alto valor ecológico, taxonómico, económico y fitoquímico dentro de la familia Annonaceae. Asimismo, subrayan la necesidad de continuar con investigaciones morfo anatómicas y fisiológicas que permitan entender con mayor profundidad sus adaptaciones estructurales y su respuesta a condiciones ambientales, particularmente en escenarios de perturbación o contaminación atmosférica.

II.III Anatomía de la hoja de Annonaceae

Para *Annona purpurea* no existe descripción anatómica detallada; sin embargo, estudios en especies del mismo género muestran que la anatomía de la hoja en *Annona* son altamente conservadas y pueden utilizarse como referencia confiable cuando no hay descripciones específicas disponibles (Metcalf & Chalk, 1979). La morfología externa de *A. purpurea* se caracteriza por presentar hojas simples, enteras, de forma elíptica a oblonga, con ápice agudo y base redondeada o ligeramente atenuada, con textura coriácea y pubescencia en hojas jóvenes que se vuelve glabra al madurar (Rzedowski 2005).

Los estudios anatómicos realizados en otras especies del género (*A. muricata*, *A. squamosa*, *A. cherimola*, *A. glabra*; Metcalfe & Chalk, (1979); Rai & Panda, (2014). indican que la epidermis es típicamente uniestratificada, formada por células de contorno irregular y paredes delgadas, generalmente cubierta por una cutícula delgada a moderadamente gruesa cuya variación depende de factores ambientales como la exposición solar o la acumulación de polvo. Asimismo, (Pinto et al., 2011) mostró que en diversas especies de *Annona* aparece la presencia de estomas de tipo anomocítico distribuidos únicamente en la cara abaxial, lo que indica un patrón hipostomáticas característico del género. Los tamaños estomáticos reportados oscilan comúnmente entre 18–30 μm de longitud y 10–20 μm de ancho.

La nervadura media suele presentar un haz vascular colateral, con xilema dirigido hacia la cara adaxial y floema hacia la abaxial, rodeado por una vaina de células parenquimáticas y fibras esclerenquimáticas que otorgan soporte estructural adicional (Metcalfe & Chalk, 1979). De igual manera, se reportan bandas de colénquima angular, especialmente en zonas marginales y cercanas a la epidermis, proporcionando resistencia mecánica a la lámina foliar (Fahn, 1990). Finalmente, aunque en *A. purpurea* únicamente se describe pubescencia externa sin detalle anatómico, diversas especies del género presentan tricomas simples y pluricelulares, principalmente en hojas jóvenes y en la superficie abaxial, los cuales funcionan como barrera física contra polvo, patógenos y pérdida excesiva de agua (Fahn, 1990). En conjunto, estos rasgos anatómicos documentados para *Annona* permiten construir un marco comparativo sólido para interpretar y contextualizar la estructura foliar de *A. purpurea* ante la falta de estudios anatómicos específicos para la especie.

II.IV Parámetros bioquímicos como indicadores de contaminación (pH y conductividad eléctrica).

Blum y Ebercon (1981) evaluaron la estabilidad de las membranas celulares como indicador de tolerancia al estrés por sequía y altas temperaturas en trigo, observando que el incremento en la fuga de electrolitos está directamente relacionado con la pérdida de integridad de las membranas plasmáticas. Este método permitió establecer la conductividad eléctrica como un indicador confiable del daño celular bajo condiciones de estrés ambiental. Lutts et al. (1996) analizaron

la senescencia inducida por NaCl en hojas de arroz, reportando un aumento significativo en la fuga de electrolitos y alteraciones en la fluorescencia de la clorofila. Estos cambios se asociaron con procesos de peroxidación lipídica y desorganización de las membranas celulares, evidenciando que el estrés salino provoca deterioro estructural y funcional en los tejidos foliares. El aumento de CE se interpreta como mayor permeabilidad celular y, por tanto, mayor nivel de estrés fisiológico.

Prasad (2004) analizó los efectos del estrés por metales pesados en plantas a diferentes niveles de organización, desde biomoléculas hasta ecosistemas, señalando que estos contaminantes inducen la generación de especies reactivas de oxígeno que provocan daño oxidativo en lípidos, proteínas y ácidos nucleicos. Asimismo, reportó que los metales pesados afectan la integridad de las membranas celulares mediante procesos de peroxidación lipídica, alterando su permeabilidad y funcionalidad. Estos efectos se traducen en cambios fisiológicos y estructurales que limitan el crecimiento y desarrollo vegetal, aunque algunas especies pueden desarrollar mecanismos de tolerancia y detoxificación.

La conductividad eléctrica, junto con el pH foliar, puede considerarse un indicador temprano de deterioro fisiológico. Tripathi y Gautam (2007) evaluaron los efectos de la contaminación del aire en especies vegetales ubicadas en zonas con distinto tráfico vehicular reportando una disminución significativa en el contenido de pigmentos fotosintéticos en plantas expuestas a mayores niveles de contaminación atmosférica, así como alteraciones en parámetros bioquímicos utilizados para calcular el índice de tolerancia a la contaminación (APTI). Estos cambios fisiológicos fueron propuestos como indicadores sensibles del impacto de la contaminación del aire sobre el metabolismo vegetal.

En un estudio similar Joshi y Swami (2009) analizaron seis especies arbóreas afectadas por contaminación vehicular en la ciudad de Haridwar, India. Reportaron una disminución en la clorofila total y los carotenoides, lo que interpretaron como evidencia de acidificación foliar asociada a la deposición de contaminantes ácidos.

En un estudio más reciente, Vargas (2017) determinó parámetros bioquímicos utilizados como indicadores de contaminación atmosférica en especies como

Lafoensia acuminata, *Prunus serotina* y *Croton bogotanus* en Bogotá. Sus resultados mostraron variaciones significativas en el pH y contenido de pigmentos entre localidades, con valores más ácidos en zonas de mayor impacto ambiental.

II.V Efectos de la contaminación en los estomas y caracteres anatómicos

Un estudio relevante es el de Pourkhabbaz *et al.* (2010) describen que las estructuras estomáticas constituyen un componente fundamental en la respuesta de las plantas a la contaminación ambiental, principalmente la influencia del ambiente urbano sobre las propiedades foliares de *Platanus orientalis* en una megaciudad de Irán. Observaron que las hojas de áreas urbanas presentaron menor tamaño y densidad estomática en comparación con las de zonas rurales, además de una cutícula más delgada y una alta carga de partículas en la superficie. Otro estudio similar realizado por Rai y Panda (2014) analizaron los efectos de la contaminación atmosférica sobre la estructura foliar de especies comunes, comparando plantas recolectadas en zonas altamente contaminadas y en sitios limpios. Reportaron una reducción en la densidad estomática, deformación de estomas y epidermis, y pérdida parcial de la capa cerosa. Los autores concluyeron que tales modificaciones son manifestaciones directas del estrés ambiental y propusieron el uso de estas especies como bioindicadores económicos y efectivos de la calidad del aire. Uno de los estudios experimentales más citados es el de Qin *et al.* (2015), donde demostraron que el depósito de polvo sobre hojas de algodón provoca una reducción significativa de la conductancia estomática y un aumento de la temperatura foliar. Según los autores, la obstrucción de los estomas y el sombreado generado por la capa de partículas reducen la transpiración y modifican el balance térmico de la hoja, además de alterar la tasa fotosintética. Estos resultados concuerdan con investigaciones previas que indican que la acumulación de polvo puede interferir directamente con el funcionamiento estomático.

En una revisión amplia, Sharma y Dubey (2016) destacaron que la exposición continua al material particulado reduce la funcionalidad de los estomas, modifica su tamaño y densidad y altera la morfología general de la hoja. Además, señalaron que la acumulación de partículas finas puede inducir cierre estomático prolongado,

reducción del intercambio gaseoso y daño físico sobre la epidermis, lo que afecta la fotosíntesis y la transpiración.

Por su parte, Egas et al. (2018) estudiaron el efecto del material particulado urbano sobre características morfoanatómicas de cuatro especies arbóreas en Santiago de Chile. Evaluaron la densidad, largo y ancho estomático, encontrando que las especies expuestas a mayores concentraciones de material particulado presentaron estomas más reducidos y deformaciones estructurales. Los resultados demostraron que las plantas desarrollan adaptaciones anatómicas frente a la contaminación, y que ciertas especies pueden considerarse herramientas potenciales para la mitigación ambiental debido a su capacidad de retener contaminantes.

Hallazgos recientes de Chen et al. (2023) confirman que los árboles urbanos sometidos a altos niveles de aerosol presentan daño evidente en epidermis y estomas, junto con disminuciones en conductancia estomática y transpiración. En este trabajo se observó un aumento en rupturas epidérmicas y acumulación de PM en aberturas estomáticas, indicando que la contaminación afecta tanto la estructura como la función de los estomas.

Estudios sobre respuestas morfológicas a entornos altamente contaminados, como el de Fadhil et al. (2023), muestran que la exposición a dióxido de nitrógeno (NO_2), dióxido de azufre (SO_2) y material particulado altera la densidad estomática, el número de células epidérmicas y la distribución de los estomas en diversas especies. Dichos cambios se consideran un mecanismo adaptativo para reducir la entrada de contaminantes, pero conllevan un compromiso significativo en la eficiencia del intercambio gaseoso.

III. Justificación

La contaminación atmosférica es uno de los desafíos ambientales más críticos en la actualidad el material particulado sedimentado (MPS) es uno de los principales problemas que afecta no solo la salud humana sino también al ecosistema principalmente cuando queda depositado sobre la vegetación , existen diversos artículos que utilizan a la vegetación como un bioindicador de la contaminación principalmente en zonas urbanas, bajo estos antecedentes las plantas que

acumulan MPS también pueden sufrir alteraciones que modifican su anatomía y funcionamiento.

En este contexto, la presente investigación se justifica por la necesidad de comprender los efectos del polvo sedimentable sobre *Annona purpurea*, una especie nativa de amplia distribución en el occidente de México, que destaca por su capacidad de adaptarse a zonas perturbadas y su potencial como bioindicadora ambiental. Analizar sus características morfoanatómicas y fisicoquímicas permitirá aportar información sobre su respuesta frente a diferentes niveles de exposición a polvo producto de la extracción de material pétreo, contribuyendo al conocimiento de la tolerancia de especies tropicales a la contaminación y generando bases para su uso en programas de monitoreo y conservación ambiental. La presencia de *A. purpurea* en la región de estudio, así como su capacidad para desarrollarse en ambientes perturbados, como los presentes en el municipio de Minatitlán, Colima, donde la extracción de material pétreo genera zonas con alta exposición a material particulado sedimentable (MPS), la convierten en una especie adecuada para evaluar los efectos de este tipo de contaminación.

IV. Pregunta

¿Cómo afecta el material particulado sedimentable a las características morfoanatómicas de las hojas de *Annona purpurea* en tres sitios de impacto (Alto, Medio Y Bajo)?

V. Hipótesis

Annona purpurea presenta variaciones en características morfo anatómicas y fisicoquímicas en función del nivel de exposición al MPS por sitio, mostrando adaptaciones estructurales que podrían estar relacionadas con su capacidad de captura de contaminantes. Por lo anterior se espera que:

- Las hojas expuestas a mayores niveles de polvo sedimentado muestren pH foliar más ácido.
- La conductividad eléctrica foliar aumenta en hojas con mayor acumulación de polvo.
- A mayor acumulación de polvo, se produzca una disminución de la densidad estomática y se presenten posibles alteraciones en la forma de los estomas como en el tamaño.

- Las diferencias en la anatomía foliar entre poblaciones estarán asociadas a la cantidad de polvo acumulado.

VI. Objetivo general

- Evaluar el impacto del material particulado sedimentado (MPS), sobre las hojas de la especie *Annona purpurea*, en tres sitios con un gradiente de cercanía a la fuente emisora.

VI.I Objetivos específicos.

- Conocer la cantidad de material particulado sedimentable (MPS) depositado sobre la hoja de *Annona purpurea* en cada sitio de estudio.
- Evaluar la densidad y el tamaño de los estomas de las hojas de *Annona purpurea* entre los tres sitios.
- Analizar los parámetros pH y conductividad eléctrica del material particulado sedimentable (MPS) depositado sobre la hoja de *Annona purpurea*, en cada sitio.

VII. Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en el municipio de Minatitlán, Colima, México. Geográficamente, esta región forma parte de la Sierra Madre del Sur y presenta una topografía predominantemente montañosa, con elevaciones que oscilan entre los 400 y más de 2,000 m s.n.m., caracterizada por laderas pronunciadas y valles intermontanos (INEGI, 2017; Figura 1.).

En términos hidrológicos, el municipio se encuentra dentro de la región hidrológica Armería-Coahuayana, con presencia de arroyos intermitentes y escurrimientos superficiales que drenan principalmente hacia la cuenca del río Armería, los cuales presentan variaciones estacionales asociadas al régimen de lluvias (INEGI, 2017).

El clima de la zona es cálido subhúmedo siendo mayo el mes más caluroso, por otro lado, la temporada de lluvias está muy marcada entre los meses de junio a octubre (Figura 2), de acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García, con temperaturas medias anuales que oscilan entre los 22 y 26 °C y una precipitación promedio anual de 800 a 1,200 mm (García, E. 2004).

Geológicamente, Minatitlán es una región de alta importancia minera, caracterizada por la presencia de yacimientos de hierro asociados a formaciones ígneas y

metamórficas. Esta riqueza mineral ha propiciado el desarrollo de actividades extractivas, particularmente la minería a cielo abierto, lo que ha generado modificaciones en el paisaje y la emisión de material particulado sedimentable (MPS) (Servicio Geológico Mexicano, 2018).

En cuanto al uso de suelo, predominan las actividades mineras, agrícolas y ganaderas, así como áreas con vegetación secundaria derivada de la perturbación antrópica. La cobertura vegetal original corresponde principalmente a selva baja caducifolia y selva mediana subcaducifolia, aunque en la actualidad se observan mosaicos de vegetación natural y zonas intervenidas (CONABIO, 2010).

Esta combinación de factores ambientales y actividades antropogénicas convierte a Minatitlán en un sitio adecuado para evaluar el impacto del material particulado sedimentable sobre la vegetación, particularmente en especies como *A. purpurea*, que se desarrollan en condiciones de perturbación.

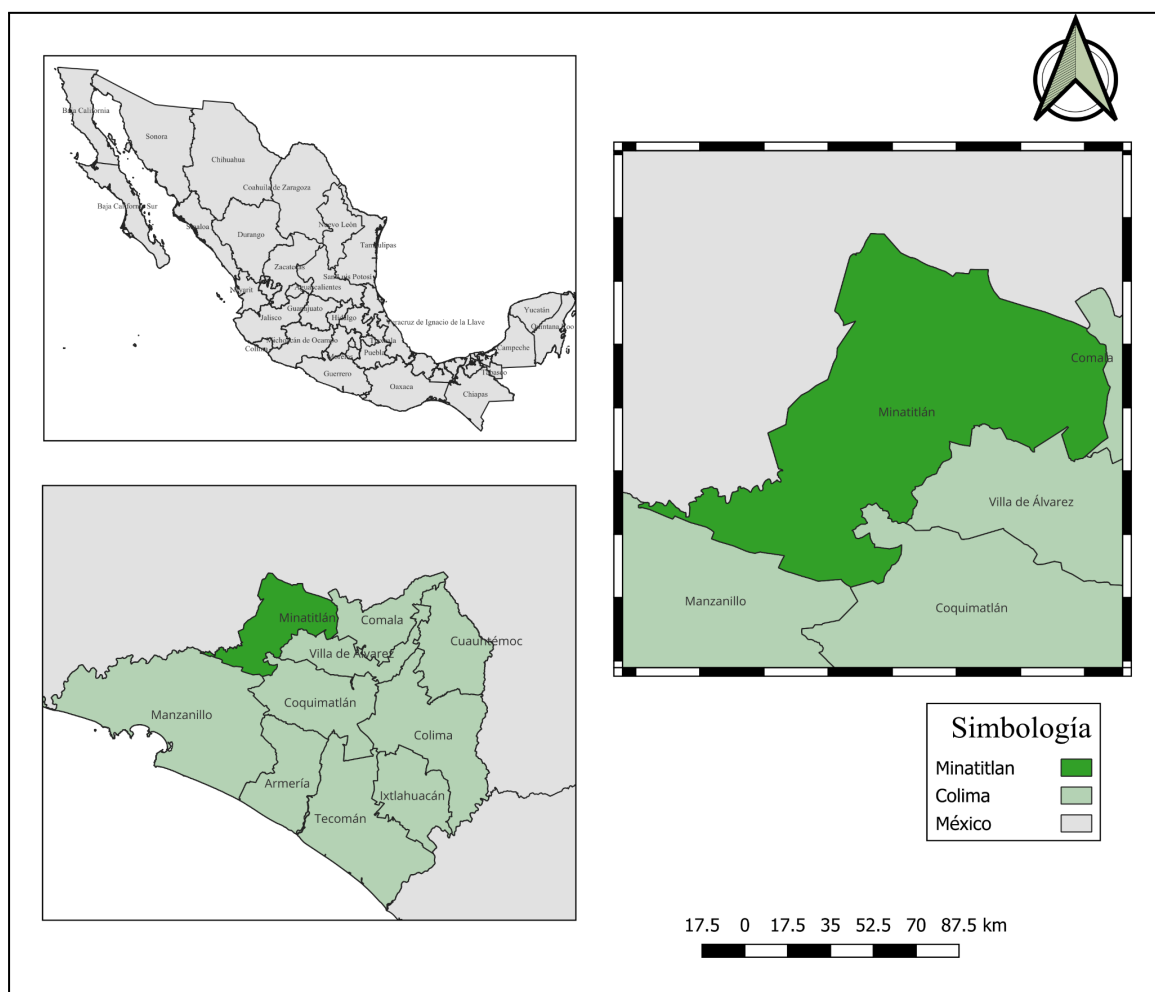


Figura 1. Ubicación geográfica del municipio de Minatitlán perteneciente al estado de Colima, México. (Elaboración propia datos obtenidos de INEGI).

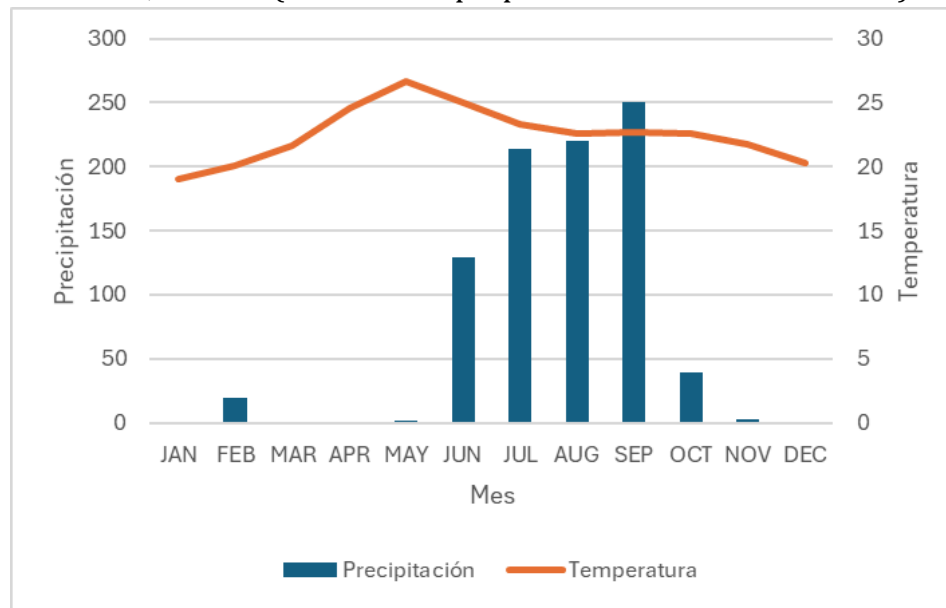


Figura 2. Climograma de Minatitlán, Colima. Elaboración propia datos obtenidos de NASA POWER (2024).

VIII. Sitios de trabajo

Se establecieron tres sitios de muestreo distribuidos a distinta distancia de la zona emisora de material particulado sedimentable (MPS), correspondientes a un gradiente de impacto ambiental. Estos sitios fueron denominados en campo como Alto (Otatitos), Medio (Las Truchas) y Bajo (Predio de Reforestación de Ismael Arias). Los sitios Otatitos y Las Truchas se ubican dentro de un entorno característico de selvas bajas y bosques tropicales subcaducifolios de la región, con variaciones en estructura vegetal, humedad, uso del suelo e influencia antropogénica; el sitio de Ismael Arias se localiza dentro de un bosque mesófilo de montaña, caracterizado por condiciones de alta humedad, presencia frecuente de neblina y una composición florística distinta (Figura 5).

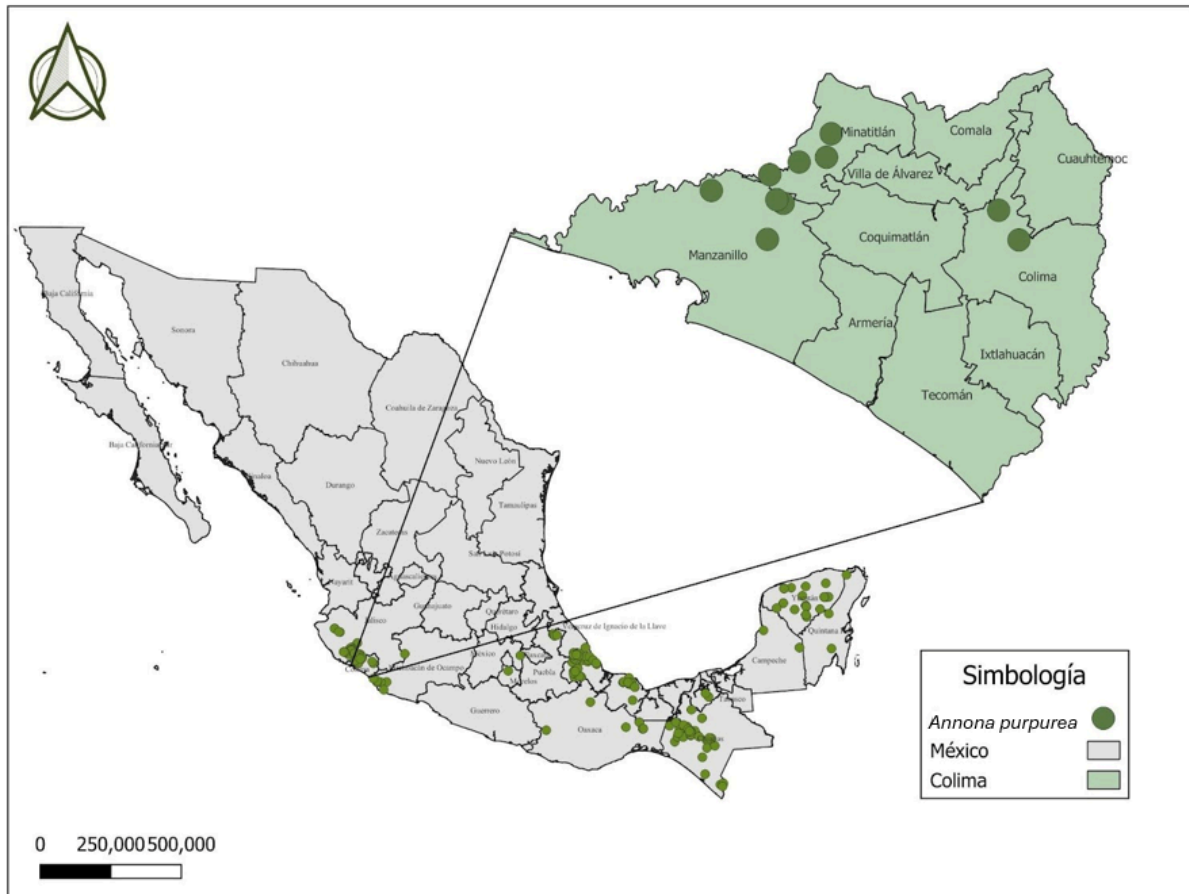


Figura 3. Distribución de *Annona purpurea* en México y el estado de Colima Elaboración propia datos obtenidos de INEGI.

Sitio 1. Alto impacto – “Otatitos”

El sitio de alto impacto se ubica en las inmediaciones de un banco de extracción de roca, donde la actividad minera genera abundante emisión de partículas. El área colinda con el cauce de un río estacional que, durante el trabajo de campo, se encontraba seco, lo que favorecía la re-suspensión de polvo (Figura 4). La vegetación corresponde a un mosaico de bosque tropical subcaducifolio, alternado con parches de vegetación secundaria derivada de perturbaciones previas. Se encuentran árboles medianos, arbustos y herbáceas que se distribuyen en zonas con sombra parcial y suelos con acumulación de sedimentos finos.

El paisaje presentaba zonas extensamente cubiertas por polvos grises densos, producto directo de la explotación minera (Figura 4), lo que representa una condición de alta carga de MPS Coordenadas: 19.31026, -104.12953.

Sitio 2. Impacto medio – “Las Truchas”

El sitio de impacto medio corresponde a un área relativamente plana cubierta por bosque tropical subcaducifolio, donde se observa la presencia destacada de árboles altos, incluyendo individuos abundantes de *Annona purpurea*. El microambiente incluye sectores muy húmedos, con suelos saturados en ciertos periodos, vegetación densa de arbustos pequeños, enredaderas y hierbas tropicales. La disponibilidad de agua superficial y la sombra abundante favorecen un sotobosque diverso. Coordenadas: 19.28051, --104.11126.

El área es utilizada como potrero, lo cual implica presencia de ganado, compactación moderada del suelo y tránsito ocasional de personas y animales, aunque sin actividades industriales directas. La exposición a MPS es intermedia debido a su cercanía relativa a la fuente emisora, pero con amortiguamiento por la densidad del bosque (Figura 4).

Sitio 3. Bajo impacto – “Predio de Reforestación de Ismael Areas”

El sitio de menor impacto se localiza en una zona conservada colindante con la Sierra de Manantlán, región reconocida por su biodiversidad. Predomina el bosque mesófilo de montaña, acompañada por especies arbóreas, arbustivas, trepadoras y herbáceas características de ambientes tropicales subhúmedos. Los suelos son relativamente fértiles, con niveles moderados de humedad y sombra parcial. El sitio se encuentra cerca de un río y no presenta tránsito de maquinaria ni actividades extractivas, por lo que la deposición de MPS es mínima. Esto permite considerarlo como un punto de referencia dentro del gradiente de impacto ambiental. Coordenadas: 19.29576, --104.08396 (Figura 4).

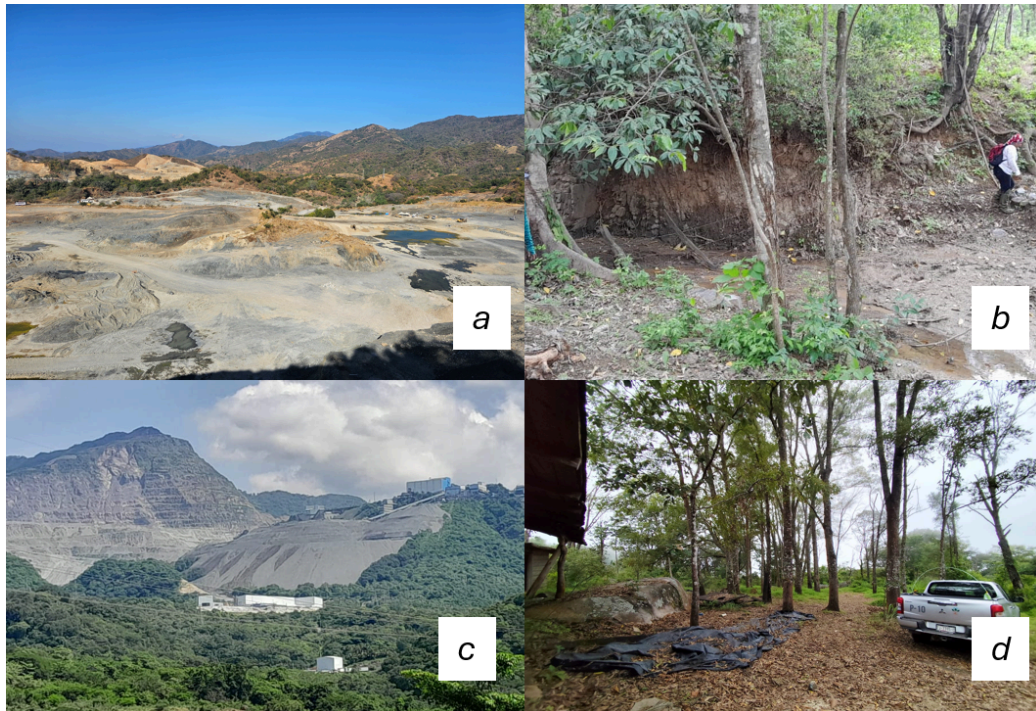


Figura 4. Sitios de muestreo, a) Fuente emisora, b) Impacto Alto, c) Impacto Medio, d) Impacto Bajo.

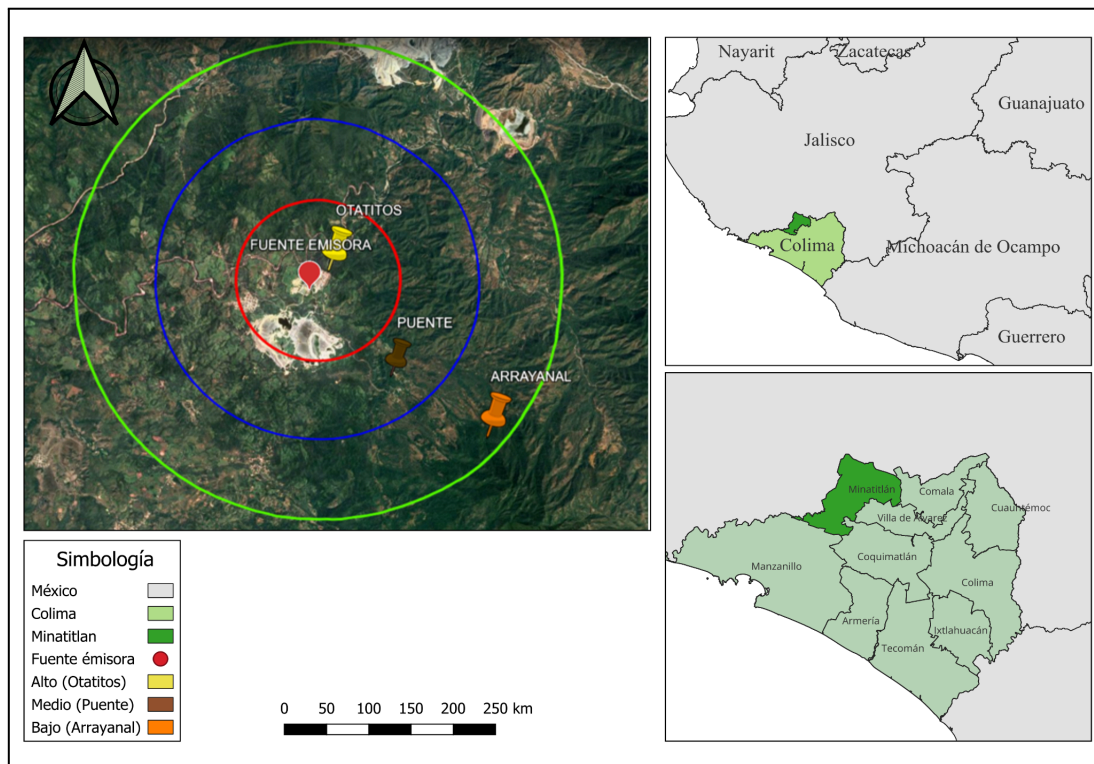


Figura 5. Mapa de localización de las zonas de estudio en el municipio de Minatitlán, Colima, México. Con los tres sitios de muestreo con diferente nivel de impacto por polvo sedimentable (alto, medio y bajo). Elaboración propia datos obtenidos de INEGI.

En cada sitio se realizaron dos transectos de 20m x 20m en el que aleatoriamente se seleccionaron cuatro individuos. Cada individuo fue analizado, para recolectar con ayuda de unas tijeras de jardinero, 50gr de hojas maduras, todas orientadas hacia la fuente de exposición del polvo para las pruebas de pH y conductividad. Mientras que para las técnicas de inclusión en parafina y la diafanización se tomaron 4 hojas de cada individuo.

***Annona purpurea* Moc. & Sessé ex Dunal**

Annona purpurea, conocida comúnmente como chincuya o cabeza de negro, es un árbol de tamaño mediano a grande que puede alcanzar alturas entre 4 y 15 m, con un tronco recto de hasta 40 cm de diámetro, corteza fisurada de color marrón grisáceo y ramas jóvenes con tricomas cortos pardo-amarillentos (Topete-Corona, 2018; León, 2003). Las hojas son simples, alternas, elípticas a ovadas, de 10–25 cm de largo por 5–12 cm de ancho, con ápice acuminado, base cuneada o redondeada y venación broquidódroma prominente en ambas superficies (León, 2003). Las flores son solitarias o dispuestas en pares, axilares, con tres sépalos pequeños y seis pétalos carnosos, de color rojo vinoso, dispuestos en dos verticilos; presentan numerosos estambres y carpelos apocárpicos (Topete-Corona et al., 2020). El fruto es un sincarpo carnoso de forma ovoide o subglobosa, recubierto de estructuras piramidales salientes, de color verde a púrpura oscuro en la madurez, con pulpa fibrosa amarilla comestible y sabor agridulce. El fruto puede alcanzar de 15 a 20 cm de diámetro y pesar más de 2 kg (Vidal-Lezama et al., 2019). Las semillas son numerosas, marrones, elípticas, lisas y de consistencia dura.

A. purpurea se asocia a sitios con alta temperatura y precipitación, baja pedregosidad y niveles de perturbación frecuentes, condiciones que parecen favorecer la estructura y dinámica de sus poblaciones (Topete-Corona et al. 2020) por lo anterior se le considera una especie Bioindicadora.

Biogeográficamente, *A. purpurea* habita en bosques tropicales caducifolios, subcaducifolios y perennifolios, entre los 0 y 1,200 m s.n.m., en climas cálido-subhúmedos a húmedos (Topete-Corona et al., 2020; Hilje, 2018). Se distribuye desde México hasta Centroamérica, especialmente en estados como

Jalisco, Colima y Oaxaca (Figura 1) y prefiere suelos profundos, fértiles y bien drenados.

Es una especie que puede desarrollarse tanto en hábitats naturales como en zonas perturbadas por actividad humana, mostrando capacidad de rebrote y regeneración natural en claros y áreas degradadas (Topete-Corona, 2018). Desde una perspectiva económica y ecológica, la especie posee múltiples usos: sus frutos son comestibles y apreciados en mercados locales; además, se ha documentado la presencia de compuestos fitoquímicos (Figura 6).

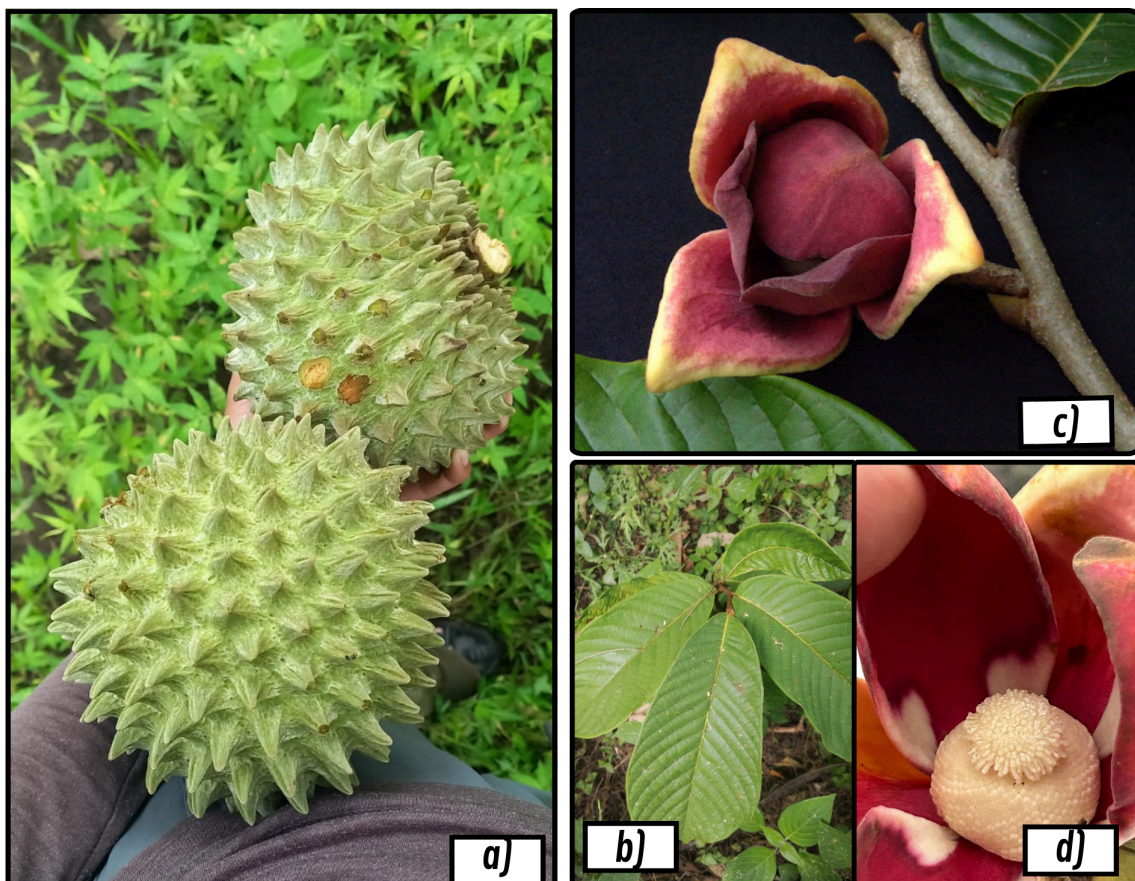


Figura 6. Lamina de *Annona purpurea*. a) fruto, b) hoja c) y d) flor.

IX. Metodología

IX.I Evaluación de pH y conductividad eléctrica.

En cada sitio de muestreo se trazaron dos transectos de 20m x 20m. En cada uno se eligieron cuatro individuos, de los cuales se recolectaron 50gr de hojas maduras. Las hojas recolectadas se lavaron con agua destilada en vasos de precipitados de 500ml frotando con una brocha para favorecer el desprendimiento de los polvos y las partículas depositadas sobre la hoja, se frotaron hasta que la hoja quedará sin residuos visibles, las hojas se desecharon; posteriormente con el agua resultante se registraron los parámetros de pH y conductividad con un potenciómetro de mesa multiparamétrico marca Hanna, modelo HI5522. Esta metodología sigue el criterio de Dalmasso *et al.* (1997); (Figura 7).

IX.II Variables estomáticas.

Para observar los estomas se realizó la técnica de diafanización. Se tomaron cuatro hojas por individuo cada transecto de cada uno de los tres sitios teniendo un total de 12 muestras. Se recortaron las hojas de la parte media en rectángulos de aproximadamente cuatro centímetros de largo por dos de ancho, y se pusieron en cajas Petri con hidróxido de sodio (NaOH) al 5% donde se quedaron cuatro días para rehidratarse; las muestras fueron lavadas para quitar el exceso de NaOH. Posteriormente las muestras fueron lavadas una por una con agua y se pasaron a cajas Petri de vidrio, se les añadió solución de cloro 1:1 de 24 a 72 hrs., hasta que obtuvieron un color blanco. Se enjuagaron con agua para retirar todo el exceso de cloro (Johansen, 1940; Ruzin, 1999).

Se deshidrataron en alcoholes graduales cada 24 hrs, se empezó con el alcohol al 30%, sucesivamente paso al 50%, 70%, 96% y finalmente al 100%. Se aclararon con una solución (solución de nueve partes 4:2:2:1 ácido láctico, aceite de clavo, xilol, fenol y benzil benzoato). Una vez aclaradas se lavaron con alcohol absoluto. Procedimos a la tinción con safranina alcohólica y montadas en resina sintética.

En cada preparación microscópica se evaluaron 25 campos para estimar la densidad estomática, expresada como número de estomas por mm². Para el análisis morfométrico, se midieron 50 estomas por lámina, registrando el largo polar y el diámetro ecuatorial de las células oclusivas.

IX.III Toma de muestra de polvos

La determinación de la cantidad de material particulado sedimentable (MPS) acumulado sobre la superficie foliar se realizó siguiendo un procedimiento adaptado de metodologías empleadas en estudios de contaminación atmosférica en plantas (Pourkhabbaz et al., 2010; Rai y Panda, 2014).

La colecta se llevó a cabo en tres sitios con diferente grado de exposición a partículas sedimentables. En cada sitio se seleccionaron hojas de *Annona purpurea*, preferentemente maduras y sin daños visibles. La recolección se efectuó con tijeras de jardín a una altura aproximada de 1.5 a 2 m desde el nivel del suelo, procurando evitar el contacto directo con las manos para no alterar la cantidad de polvo presente. Los ejemplares se colocaron en bolsas herméticas tipo Ziploc y se trasladaron al laboratorio para su análisis.

En el laboratorio, las hojas fueron lavadas individualmente con agua destilada, utilizando los dedos o un pincel suave con el fin de desprender el polvo adherido a ambas superficies foliares. El agua resultante del lavado se colectó en recipientes limpios para su posterior procesamiento.

El agua de lavado fue filtrada utilizando papel filtro Whatman Núm. 42, previamente secado y pesado en una balanza analítica. Este paso permitió retener el polvo depositado originalmente sobre las hojas.

Los papeles filtro con el material particulado retenido fueron colocados en una estufa a una temperatura constante de 60–70 °C durante un periodo de 48 a 72 horas, hasta alcanzar un peso constante, asegurando la eliminación completa de la humedad.

Finalmente, los filtros fueron pesados nuevamente en una balanza analítica de precisión marca Velar modelo VE-100. La cantidad total de polvo depositado sobre las hojas se determinó mediante la diferencia entre el peso final del papel filtro (con el polvo) y el peso inicial del filtro vacío (Fig 7). El resultado se expresa en miligramos de polvo por sitio.

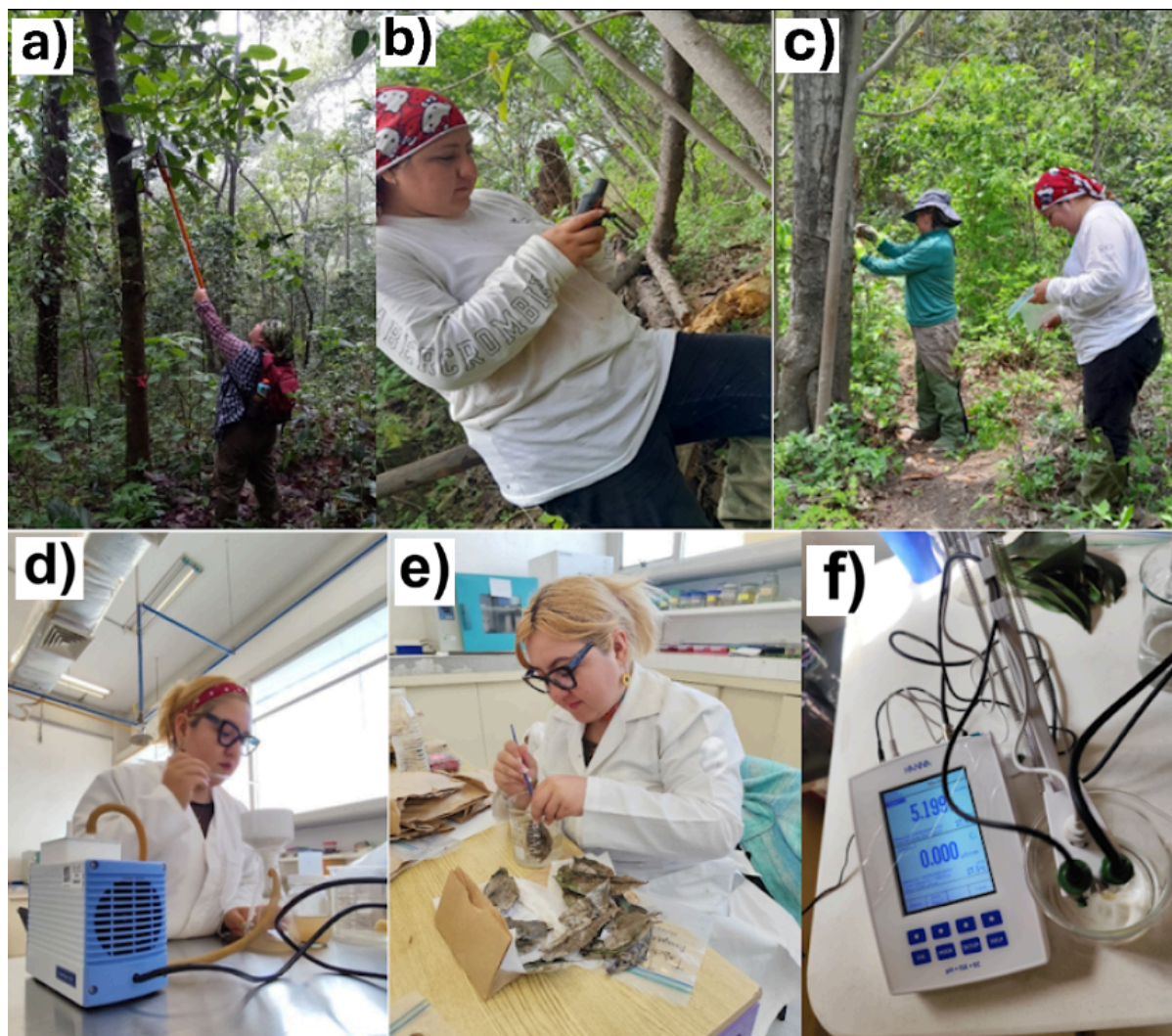


Figura 7. Trabajo de campo y de laboratorio para el procesamiento de hojas de *Annona purpurea*, a) recolectade hojas, b) toma de georreferencias, c) empacado de hojas en bolsas tipo ziploc, d) filtrado del agua para toma de pH y conductividad, e) Lavado de hojas para el desprendimiento de polvo, f) toma de muestras de pH y conductividad.

IX.IV Microtecnia Histología vegetal.

En cada uno de los tres sitios, se recolectaron hojas de cuatro individuos de *Annona purpurea* al menos cuatro hojas por individuo, por transecto, todas orientadas hacia la fuente de exposición. Las hojas y pecíolos se fijaron en FAA (formaldehído–ácido acético–alcohol etílico al 70 %) en proporción 5:5:90 (v/v) durante 48 h. Posteriormente las muestras se colocaron en cassettes de inclusión, fueron lavadas con agua para quitar todo el residuo de FAA.

Una vez lavados, los cassettes de inclusión pasaron por una serie de alcoholes graduales (30%,50%,70%,96%100%) cada 24 hrs., posteriormente xilol-alcohol y finalmente xilol puro; hasta ser incluidos en bloques de parafina Johansen, D. A. (1940).

Los hojas y pecíolos se cortaron transversalmente con un microtomo de rotación marca Leica modelo RM2125. Las muestras cortadas se tiñeron con safranina-verde rápido y montadas en resina sintética sobre portaobjetos, posteriormente fueron analizadas en microscopio óptico con ayuda del programa Motic Images Plus 2.0.

Los caracteres anatómicos evaluados de la hoja fueron: lumen del elemento de vaso y pared, largo del parénquima empalizada, amplitud del parénquima esponjoso. Del pecíolo se midió: lumen del elemento de vaso y pared.

IX. Análisis estadísticos.

Los datos obtenidos de las variables pH foliar, conductividad eléctrica, largo y ancho estomático, densidad estomática, peso de polvo sedimentable, así como los caracteres anatómicos de la vena media (lumen del vaso, espesor de pared, largo del parénquima empalizada y amplitud del parénquima esponjoso) y del pecíolo (lumen del vaso y espesor de pared), fueron analizados estadísticamente con el objetivo de evaluar diferencias entre los tres sitios de muestreo (alto, medio y bajo impacto).

Inicialmente, se realizó un análisis de estadística descriptiva que incluyó el cálculo de media, desviación estándar, valores máximos y mínimos, con el fin de caracterizar la variabilidad de cada variable por sitio. Posteriormente, se evaluaron los supuestos de normalidad mediante la prueba de Shapiro–Wilk. Las variables que cumplieron con los supuestos de normalidad de varianzas fueron analizadas mediante un análisis de varianza (ANOVA) de una vía, seguido de la prueba post hoc de Tukey ($\alpha = 0.05$) para la comparación de medias entre sitios.

En el caso de las variables que no cumplieron con los supuestos paramétricos, incluso después de aplicar transformaciones, se empleó la prueba no paramétrica de Kruskal–Wallis. Cuando se detectaron diferencias significativas, se realizaron comparaciones múltiples mediante la prueba de Dunn con corrección de Bonferroni, con el fin de identificar diferencias entre pares de sitios.

Los datos obtenidos de las variables pH foliar, conductividad eléctrica, largo y ancho estomático, densidad estomática, peso de polvo sedimentable, así como los caracteres anatómicos de la vena media (lumen del vaso, espesor de pared, largo del parénquima empalizada y amplitud del parénquima esponjoso) y del pecíolo (lumen del vaso y espesor de pared), fueron analizados estadísticamente con el objetivo de evaluar diferencias entre los tres sitios de muestreo (alto, medio y bajo impacto).

X. Resultados

XI.I pH y conductividad

Se obtuvieron 48 datos de pH y conductividad (Tabla.1) de los tres sitios estudiados, datos que se obtuvieron después de 2 salidas de campo en temporada de lluvia.

El análisis del pH foliar en hojas de *Annona purpurea* mostró diferencias significativas entre los sitios evaluados. Se aplicó un análisis de varianza (ANOVA), el cual mostró diferencias significativas entre sitios ($F(2, 19) = 28.54$, $p < 0.0001$).

La prueba de Tukey indicó que el Sitio Alto presentó el pH promedio más alto (7.83 ± 0.15 , grupo "a"), mientras que los sitios Bajo (7.04 ± 0.35) y Medio (6.80 ± 0.27) mostraron valores más bajos y similares entre sí, agrupados en el grupo "b", sin diferencias significativas entre ellos.

El análisis de la conductividad eléctrica foliar no evidenció diferencias entre los sitios de muestreo. Debido a que los datos no cumplieron con el supuesto de normalidad, se empleó la prueba no paramétrica de Kruskal–Wallis, la cual mostró diferencias significativas entre los sitios ($\chi^2 = 9.79$, $gl = 2$, $p = 0.0075$).

Las comparaciones múltiples post hoc indicaron que no todos los pares de sitios difirieron significativamente entre sí, lo que se reflejó en la asignación de grupos estadísticos compartidos (Figura 8).

En términos descriptivos, el Sitio Medio presentó el mayor valor promedio de conductividad eléctrica ($41.74 \pm 26.08 \mu\text{S/cm}$), seguido del Sitio Bajo ($39.34 \pm 34.15 \mu\text{S/cm}$), mientras que el Sitio Alto registró el valor más bajo ($14.30 \pm 5.35 \mu\text{S/cm}$).

Tabla 1. Datos de pH y Conductividad del polvo en la hoja de *Annona purpurea*.

<i>Individuo</i>	<i>Sitio</i>	<i>Transecto</i>	<i>pH</i>	<i>Conductividad</i>
1	<i>Bajo</i>	<i>1</i>	7.35	108.1
2	<i>Bajo</i>	<i>1</i>	7.2	55
3	<i>Bajo</i>	<i>1</i>	7.3	42.1
4	<i>Bajo</i>	<i>1</i>	0	0
1	<i>Bajo</i>	<i>2</i>	7.4	15.52
2	<i>Bajo</i>	<i>2</i>	6.7	10.9
3	<i>Bajo</i>	<i>2</i>	6.7	17.98
4	<i>Bajo</i>	<i>2</i>	6.6	25.78
1	<i>Alto</i>	<i>1</i>	7.7	19.79
2	<i>Alto</i>	<i>1</i>	0	0
3	<i>Alto</i>	<i>1</i>	7.8	16.32
4	<i>Alto</i>	<i>1</i>	7.7	20.6
1	<i>Alto</i>	<i>2</i>	7.9	15.3
2	<i>Alto</i>	<i>2</i>	7.7	13.21
3	<i>Alto</i>	<i>2</i>	8.1	6.71
4	<i>Alto</i>	<i>2</i>	7.9	8.14
1	<i>Medio</i>	<i>1</i>	7.43	30.05
2	<i>Medio</i>	<i>1</i>	6.8	31.64
3	<i>Medio</i>	<i>1</i>	6.7	33.21
4	<i>Medio</i>	<i>1</i>	6.61	103.7
1	<i>Medio</i>	<i>2</i>	6.84	25.75
2	<i>Medio</i>	<i>2</i>	6.76	32.62
3	<i>Medio</i>	<i>2</i>	6.76	27.27
4	<i>Medio</i>	<i>2</i>	6.52	49.69

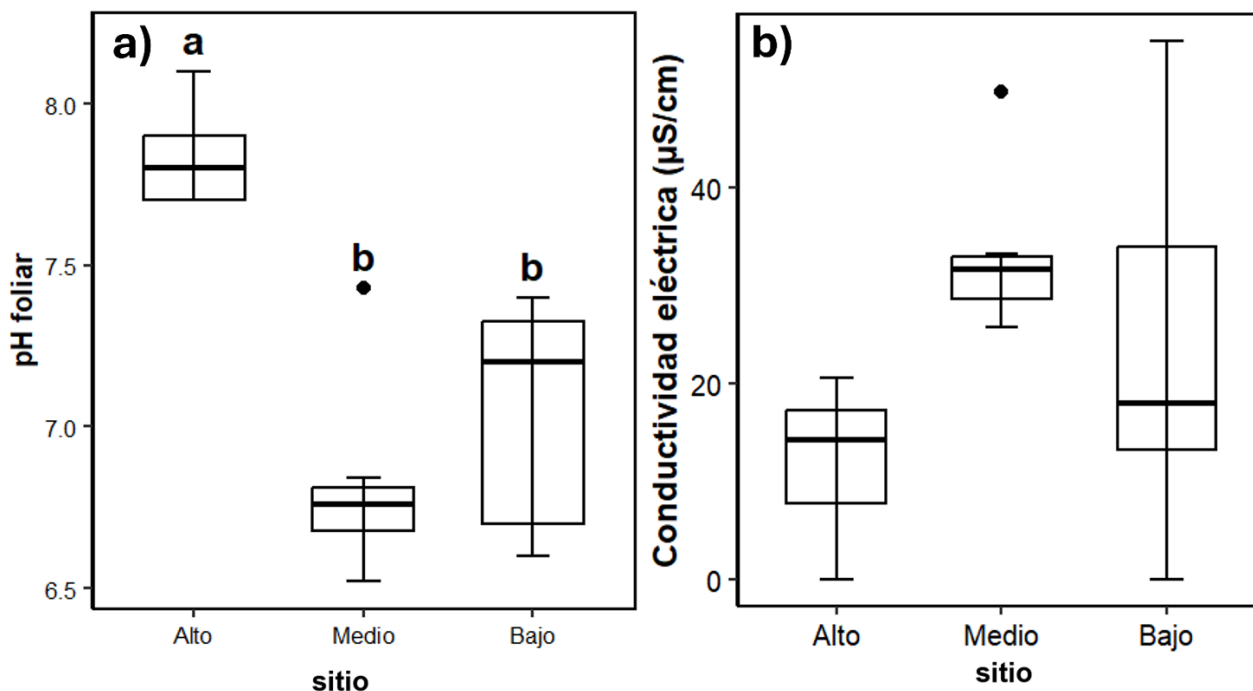


Figura 8. Datos de pH a) y conductividad b) eléctrica en hojas de *Annona purpurea* en los tres sitios de estudio.

XI.II Tamaño de los estomas.

Largo. El análisis del largo estomático en hojas de *Annona purpurea* evidenció diferencias significativas entre los tres sitios evaluados. Se realizó un análisis de ANOVA, el cual mostró diferencias significativas entre los sitios ($F(2, 997) = 43.08$, $p < 0.0001$). La prueba de Tukey identificó diferencias significativas entre todos los sitios. El Sitio Alto presentó el mayor promedio (31.37 μm , grupo "a"), seguido del Sitio Bajo (28.26 μm) y el Sitio Medio (27.18 μm), ambos pertenecientes al grupo "b" (Tabla. 2).

Ancho. El análisis de varianza (ANOVA) evidenció diferencias altamente significativas entre los sitios ($F(2, 997) = 13.86$, $p < 0.0001$). La prueba de Tukey confirmó que todas las comparaciones entre sitios presentaron diferencias significativas, el Sitio Alto registró el mayor promedio (15.77 μm , grupo "a"), aunque mostró una dispersión considerable y presencia de valores atípicos, le seguido del Sitio Medio (14.94 μm , grupo "b"), mientras que el Sitio Bajo presentó el valor más bajo (13.76 μm , grupo "c") (Tabla. 2).

XI.III Densidad estomática

El análisis de la densidad estomática en hojas de *Annona purpurea* mostró diferencias significativas entre los tres sitios evaluados. El análisis de varianza (ANOVA) mostró efectos significativos ($F(2, 491) = 12.12, p < 0.0001$). La prueba de Tukey indicó que el Sitio Bajo presentó la mayor densidad estomática promedio ($95.25 \text{ estomas} \cdot \text{mm}^{-2}$, grupo "a"), significativamente diferente de los sitios Alto ($83.76 \text{ estomas} \cdot \text{mm}^{-2}$) y Medio ($80.15 \text{ estomas} \cdot \text{mm}^{-2}$), los cuales no difirieron entre sí (grupo "b") ver Tabla. 2. Gráficamente, se observa que el Sitio Bajo presentó los valores más altos y concentrados de densidad estomática, mientras que los sitios Alto y Medio mostraron una dispersión más amplia (Figura.9).

Tabla 2. Valores promedio de densidad, largo y ancho de los estomas de *Annona purpurea*.

<i>Sitio</i>	<i>Densidad</i>	<i>Largo</i>	<i>Ancho</i>
<i>Bajo</i>	95.25	28.26	13.76
<i>Medio</i>	80.15	27.18	14.94
<i>Alto</i>	83.76	31.37	15.77

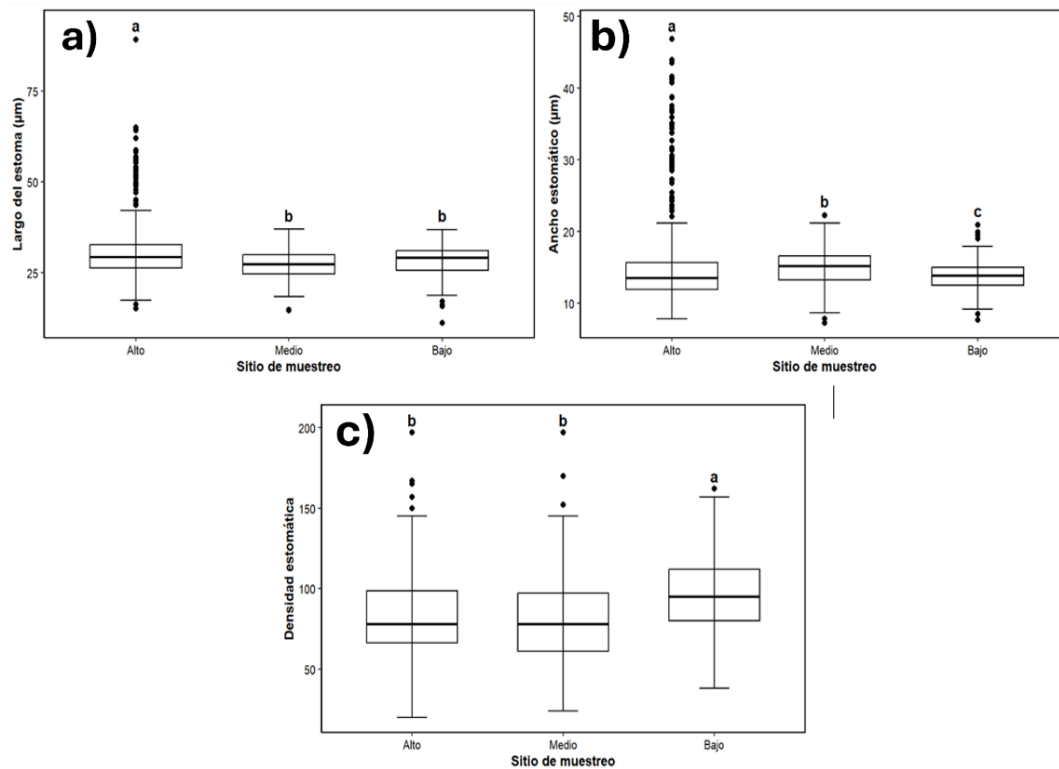


Figura 9. (a) Largo, (b) ancho y (c) densidad estomática en hojas de *Annona purpurea* en los tres sitios.

XI.IV Relación entre la densidad estomática y los polvos.

Se evaluó la relación entre la densidad estomática y la cantidad de polvo depositado, debido a que los datos no cumplieron con los supuestos de normalidad (evaluados mediante la prueba de Shapiro), se procedió a realizar un análisis de correlación no paramétrico de Spearman. Los resultados indicaron una correlación negativa muy débil entre ambas variables ($p = -0.09$), la cual resultó estadísticamente significativa ($p = 0.037$).

No obstante, el valor del coeficiente sugiere que la asociación entre la densidad estomática y el peso del polvo es prácticamente inexistente. Gráficamente, se observa una ligera tendencia negativa; sin embargo, la dispersión de los datos es amplia y no evidencia un patrón claro (Figura 10).

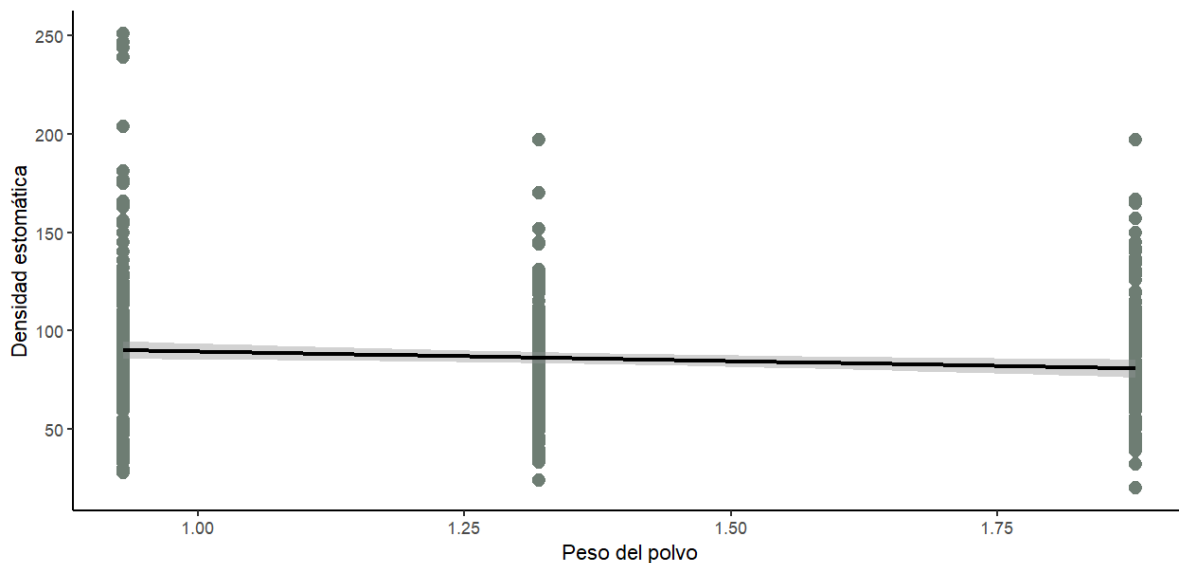


Figura 10. Relación entre el peso del polvo (gr/sitio) y la densidad estomática (estomas/mm²) en hojas de *Annona purpurea*.

XI.V Anatomía de la hoja

En los cortes transversales de hoja de *Annona purpurea* se observó una estructura dorsiventral, parénquima empalizada formado por una o dos capas de células alargadas y compactas. El parénquima esponjoso, constituido por varias capas de células irregulares con amplios espacios intercelulares. Entre ambos tejidos se distribuyen haces vasculares colaterales, rodeados por una vaina parenquimática poco conspicua. Vasos de lumen amplio y paredes engrosadas, acompañados por fibras y parénquima xilemático, mientras que el floema está constituido por elementos cribosos y células acompañantes. Los estomas se localizaron predominantemente en la epidermis abaxial de la hoja. Cada estoma estaba conformado por dos células oclusivas de forma arriñonada que delimitan el ostiolo. Las células epidérmicas circundantes no mostraron diferenciación evidente como células subsidiarias, correspondiendo a un tipo estomático anomocítico. Se registró variación en el largo y ancho de los estomas (Figura 11).

XI.VI Anatomía del pecíolo

El pecíolo muestra una sección transversal generalmente ovalada a ligeramente elíptica, con una epidermis simple recubierta por una cutícula delgada. Debajo de la epidermis se observa una banda de colénquima angular que aporta soporte estructural. Los vasos presentan lumen de tamaño variable y paredes relativamente engrosadas.

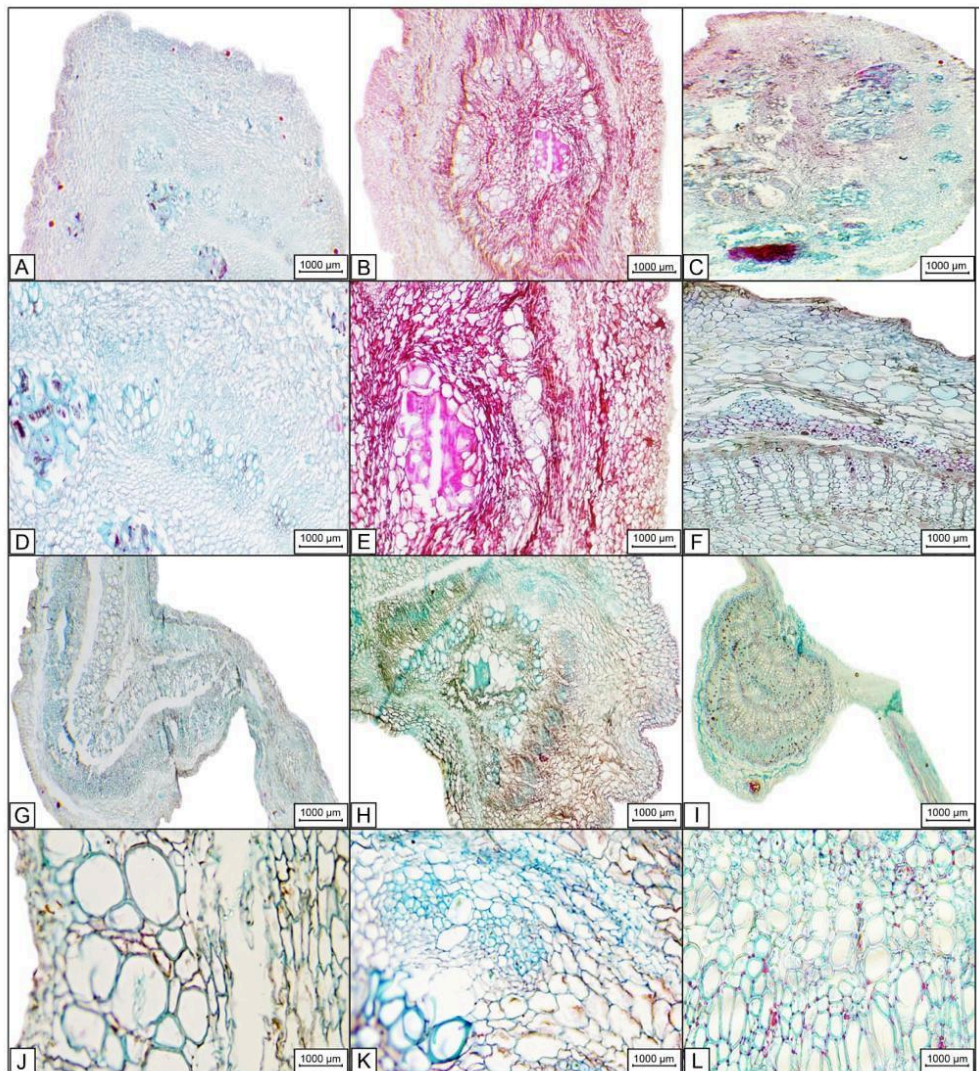


Figura 11. Cortes transversales de pecíolo y vena media de la hoja de *Annona purpurea* en tres sitios, A), D) Pecíolo del sitio Otatitos, B), E) Pecíolo del sitio Puente, C), F) Pecíolo del sitio Arrayanal, G), J) Vena media en Otatitos, H), K) Vena media en Puente, I) L) Vena media en Arrayanal.

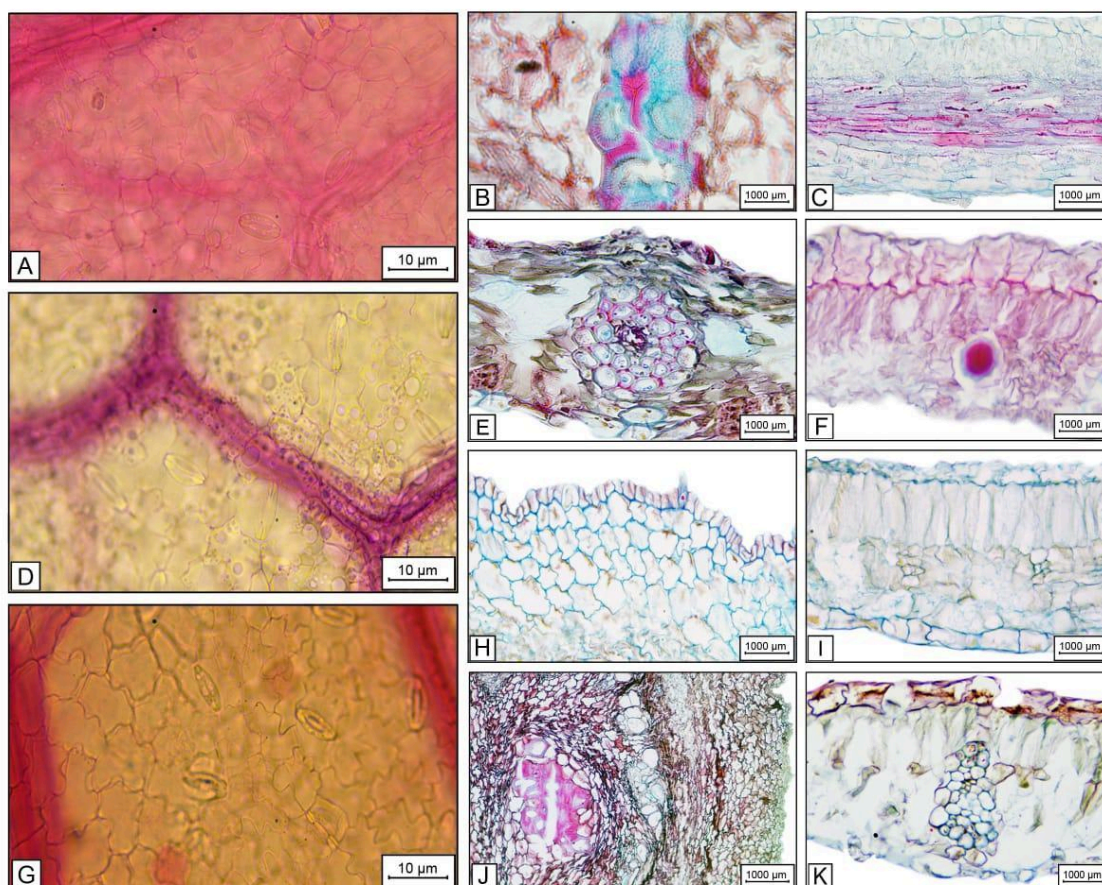


Figura 12. Características morfoanatómicas foliares observadas en cortes superficiales y transversales. (A, D, I) Vista superficial de la epidermis mostrando estomas y patrón de células epidérmicas. (B) Detalle de estoma en vista superficial. (C) Corte transversal de lámina foliar evidenciando epidermis y tejido subepidérmico. (E) Haz vascular en corte transversal. (F) Presencia de idioblasto/cristal. (G) Parénquima esponjoso. (H) Corte longitudinal de tejido vascular. (J) Detalle de haz vascular con xilema y floema diferenciados. (K) Corte transversal de nervadura secundaria. Barras de escala indicadas en cada imagen.

XI.VII Lumen del vaso de la hoja

El análisis para el lumen del vaso de la hoja en *Annona purpurea* mostró diferencias significativas entre los tres sitios evaluados el ANOVA mostró diferencias altamente significativas entre los sitios ($F(2, 147) = 50.66, p < 0.0001$). La prueba de Tukey mostró diferencias significativas en todas las comparaciones entre sitios. El sitio Alto presentó el mayor lumen promedio (35.57, grupo “a”), siendo significativamente diferente de los sitios Medio (21.86) y Bajo (21.04), los cuales no mostraron diferencias entre sí (grupo “b”), ver Tabla. 3.

XI.VIII Lumen de la pared del vaso de la hoja

El análisis para el lumen de la pared del vaso de la hoja en *Annona purpurea* no mostró diferencias entre los tres sitios evaluados. Después de analizar los datos no se encontró normalidad por lo que se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal–Wallis la cual mostró diferencias significativas entre los sitios ($\chi^2 = 12.31$, gl = 2, $p = 0.0021$). Los valores del espesor de la pared del vaso se concentran entre 2 y 5 μm en los tres sitios; sin embargo, el Sitio Medio presentó valores más altos (Tabla. 3).

Tabla 3. Valores promedio del Lumen del vaso de la hoja y Lumen de la pared del vaso de la hoja de *Annona purpurea*.

<i>Sitio</i>	<i>Lum.Vaso Hoja</i>	<i>Lum.Pared Vaso de la Hoja.</i>
<i>Bajo</i>	25.59	2.97
<i>Medio</i>	21.86	3.55
<i>Alto</i>	35.57	3.03

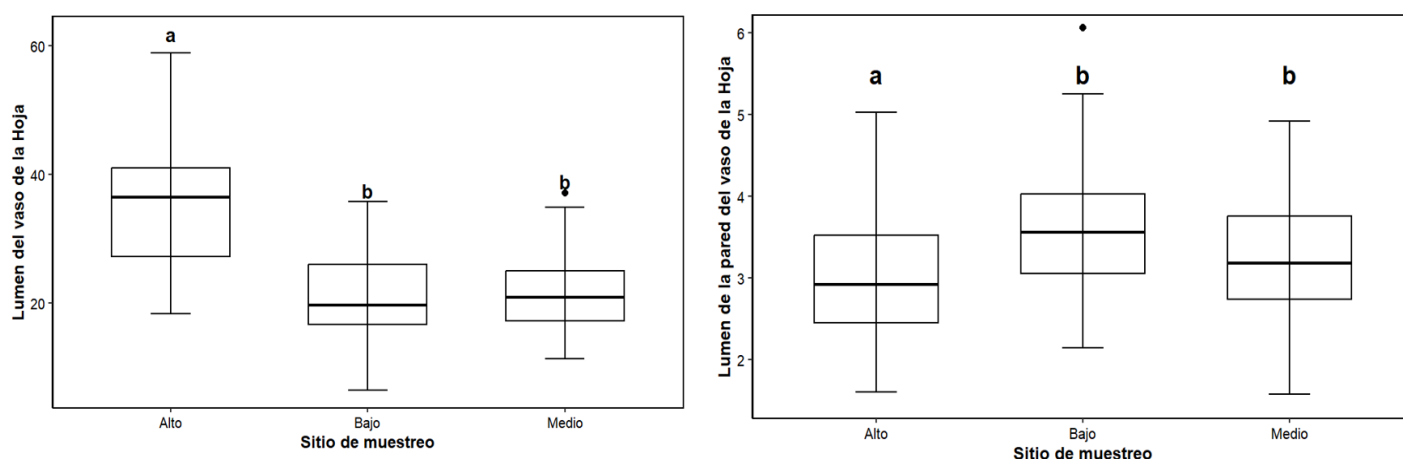


Figura 13. Lumen del vaso y de la pared del vaso de la hoja de *Annona purpurea* en los tres sitios de estudio.

XI.IX Parénquima empalizada.

El análisis para el parénquima empalizada de la vena media de la hoja en *Annona purpurea* mostró diferencias entre los tres sitios evaluados (Figura. 11), el ANOVA mostró diferencias significativas entre los sitios ($F(2, 147) = 17.16, p < 0.0001$). El Sitio Bajo presentó el mayor espesor promedio ($36.28 \mu\text{m}$, grupo “a”), seguido del Sitio Alto ($32.41 \mu\text{m}$, grupo “b”), mientras que el Sitio Medio presentó los valores más bajos ($29.37 \mu\text{m}$, grupo “c”, Tabla. 4).

XI.X Parénquima esponjoso.

El análisis del espesor del parénquima esponjoso en hojas de *Annona purpurea* mostró que los datos no siguieron una distribución normal, por lo que se aplicó la prueba de Kruskal–Wallis, encontrando diferencias significativas entre los sitios ($p < 0.0001$).

Las comparaciones múltiples indicaron que el Sitio Bajo presentó valores significativamente mayores, mientras que los sitios Alto y Medio no difirieron entre sí.

El coeficiente de variación (38.61%) indica una alta heterogeneidad estructural. Gráficamente, se observa que el Sitio Bajo presentó valores más elevados y una mayor dispersión, mientras que los sitios Alto y Medio mostraron valores más bajos y concentrados (Figura 14).

Tabla 4. Valores promedio del Parénquima Empalizada y el Parénquima Esponjoso de *Annona purpurea* en los tres sitios.

<i>Sitio</i>	<i>Parénquima empalizada</i>	<i>Parénquima Esponjoso</i>
<i>Bajo</i>	21.9	12.12
<i>Medio</i>	29.37	10.78
<i>Alto</i>	32.41	10.83

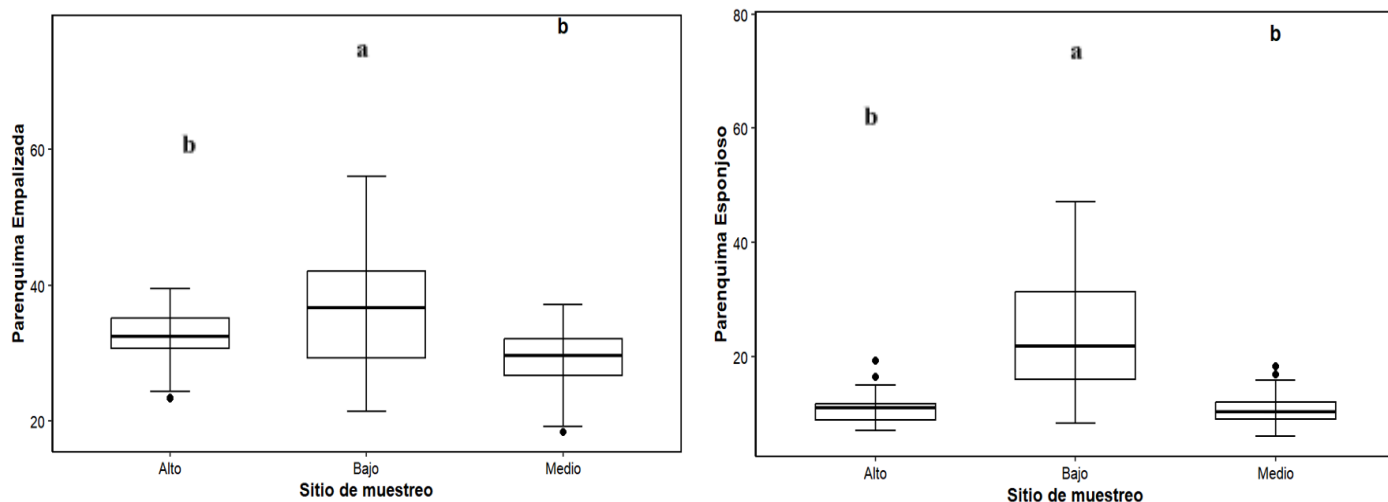


Figura 14. Parénquima empalizada y parénquima Esponjoso en la vena media de la hoja de *Annona purpurea* en tres sitios de estudio.

XI.XI Largo del lumen del vaso del peciolo.

El análisis del largo del vaso del peciolo en *Annona purpurea* en la prueba de normalidad indicó que los datos no siguen una distribución normal.

Por lo tanto, se aplicó la prueba de Kruskal–Wallis, la cual mostró diferencias significativas entre los sitios ($p < 0.0001$). Las comparaciones múltiples indicaron que todos los sitios difirieron significativamente entre sí, presentando el Sitio Alto el mayor valor promedio (130.24, grupo “a”), seguido por el Sitio Medio (64.06, grupo “b”) y el Sitio Bajo (32.86, grupo “c”) (Tabla 5).

XI.XII Lumen del vaso del peciolo.

El análisis del lumen del vaso del peciolo en *Annona purpurea* no mostró diferencias significativas entre los tres sitios evaluados. La prueba de normalidad indicó que los datos no siguen una distribución normal.

Debido a la falta de normalidad, se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, la cual mostró diferencias significativas entre los sitios ($\chi^2 = 9.05$, $gl = 2$, $p = 0.0108$).

XI.XIII Pared del vaso del peciolo.

El análisis del espesor de la pared del vaso del peciolo en *Annona purpurea* mostró que los datos no siguen una distribución normal.

Por lo que se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal–Wallis, la cual mostró diferencias significativas entre los sitios ($\chi^2 (2) = 21.56$, $p = 2.09 \times 10^{-5}$). (Figura. 14).

Tabla 5. Valores promedio del Largo, Lumen y Pared del vaso del peciolo de *Annona purpurea* en los sitios de estudio.

<i>Sitio</i>	<i>Largo del vaso del peciolo.</i>	<i>Lumen del vaso del peciolo.</i>	<i>Pared del vaso del peciolo.</i>
<i>Bajo</i>	130.24	28.17	4.55
<i>Medio</i>	64.05	29.2	3.79
<i>Alto</i>	130.24	28.57	3.9

c

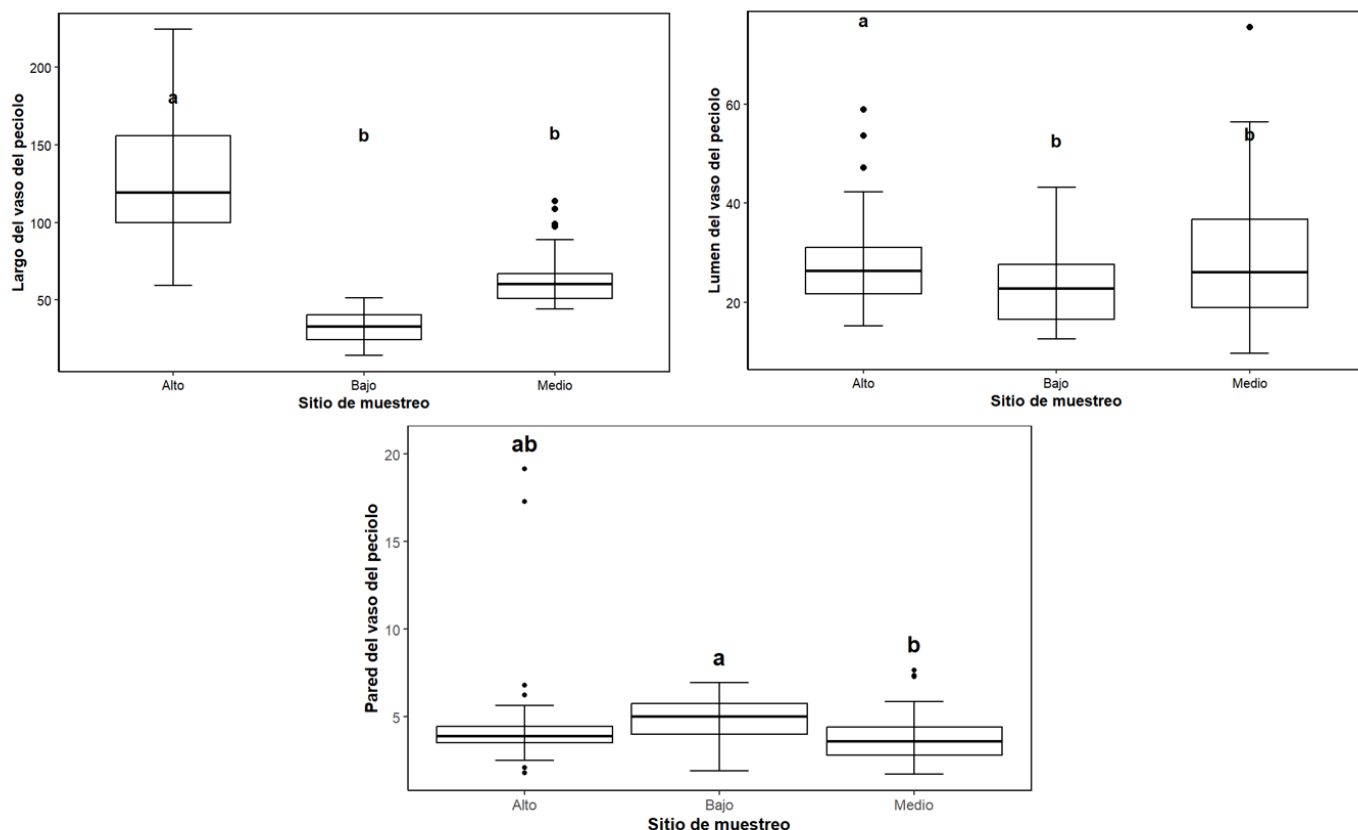


Figura 15. Largo, Lumen y Pared del vaso del peciolo de *Annona purpurea* en los tres sitios de estudio.

XI.XIV Análisis de componentes principales (PCA)

El análisis de componentes principales (PCA) permitió identificar los principales patrones de variación entre los sitios de estudio en función de las variables morfoanatómicas y fisicoquímicas evaluadas. Los dos primeros componentes explicaron el 40.8% de la variación total (Dim1 = 26.6% y Dim2 = 14.2%).

El primer componente (Dim1) separa los sitios en función de un gradiente asociado a la deposición de polvo y variables relacionadas. Hacia valores positivos de Dim1 se agrupan variables como polvo, conductividad eléctrica, ancho y largo estomático, y parénquima esponjoso. En contraste, hacia valores negativos se relacionan variables como el pH y la densidad estomática.

El segundo componente (Dim2) con variables anatómicas como el lumen de vaso (hoja) y el parénquima esponjoso.

En cuanto a la distribución de los individuos, se observa una separación clara entre los sitios. El sitio Otatitos se asocia principalmente con valores altos de polvo, mientras que Arrayanal se relaciona con mayor densidad estomática y pH. Por su parte, Puente con variables anatómicas del sistema vascular, como lumen y pared de vasos.

La orientación de los vectores indica la relación entre variables, donde aquellas con direcciones similares están positivamente correlacionadas (por ejemplo, polvo, conductividad y tamaño estomático), mientras que vectores en direcciones opuestas sugieren relaciones negativas (por ejemplo, polvo vs pH y densidad estomática).

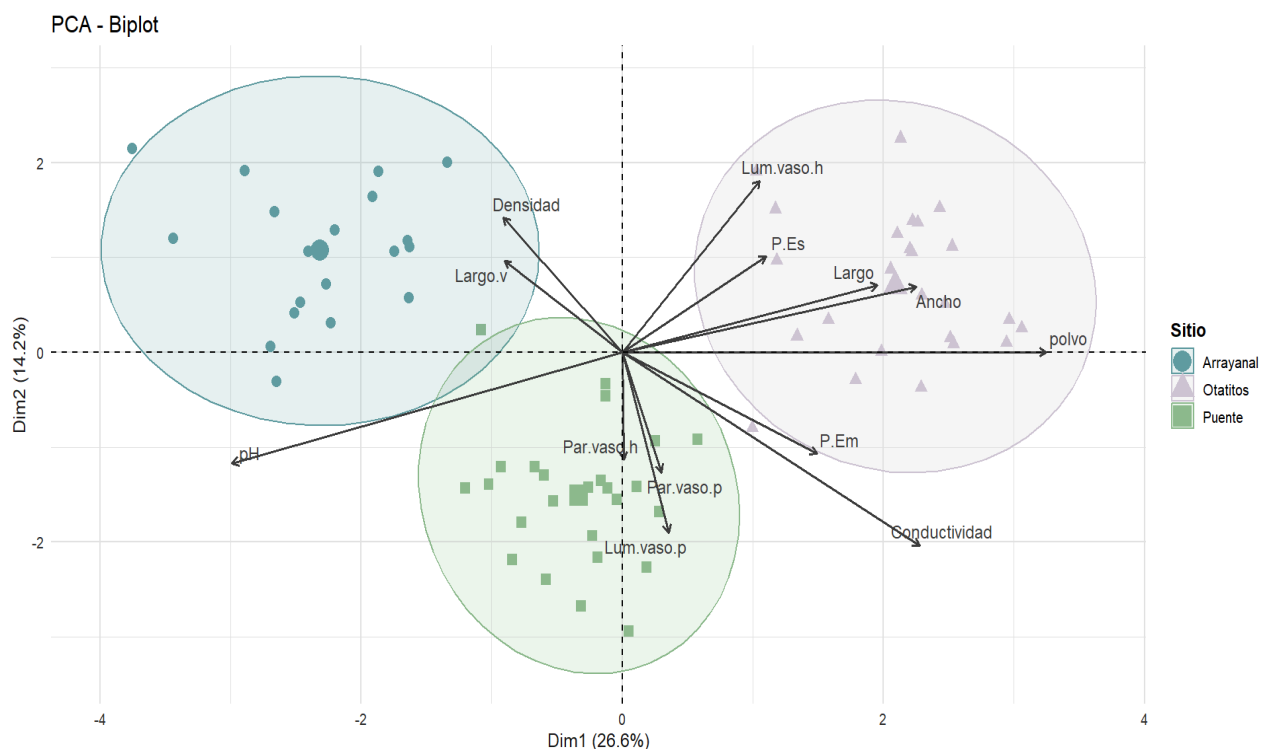


Figura 16. Análisis de Componentes Principales (PCA) basado en caracteres morfoanatómicos en hoja y del pecíolo de *Annona purpurea* en tres poblaciones.

XI. Discusión.

XII.I pH foliar

Los resultados obtenidos para el pH foliar mostraron una tendencia distinta a la reportada en la literatura clásica sobre contaminación industrial o vehicular. Mientras que diversos autores (Vargas, 2017; Tak & Kakde, 2017) reportan disminución del pH en hojas expuestas a ambientes ácidos o ricos en gases oxidantes, como fue el caso de *Lafoensia acuminata* que mantuvo valores de entre 4 y 6, mientras que en otras zonas con especies como *Prunus serotina* y *Croton bogotanus* obtuvieron valores de entre 5 y 7 en una de las seis zonas urbanas, otra especie es *Annona squamosa* que tuvo valor promedio de 6 en el sitio control y 6.5 en la zona perturbada, *Azadirachta indica* 6.3 y 5.9 respectivamente; valores más ácidos son asociados a mayor contaminación, en este estudio *Annona purpurea* registró valores alcalinos en el sitio más expuesto alto con valor promedio de 7.83 en comparación con los sitios medio 6.80 y bajo 7.04, aunque los sitios medio y bajo no tuvieron valores menores a 6 como en otros estudios, si se encuentran dentro de rangos más ácidos.

Los pH ácidos pueden explicarse por la composición mineral del polvo sedimentado, que puede contener carbonatos, materiales calcáreos, silicatos u otros compuestos alcalinos propios de suelos volcánicos o de zonas con actividad minera. Estudios como el de Vargas (2017) señalan que, cuando el polvo es rico en partículas minerales no ácidas, las hojas pueden incorporar dichos materiales en su superficie o cutícula, generando una alcalinización aparente del pH foliar.

Esto indica que el pH no solo refleja la exposición a contaminantes, sino también su naturaleza química. En otras palabras, el pH bajo suele asociarse a contaminación urbana o industria, el pH alto como en este estudio, podría asociarse a polvo de origen geológico y mineral, con efectos posiblemente menos agresivos para la fisiología foliar. Este comportamiento resalta la importancia de considerar la composición química del polvo cuando se interpreta el pH como indicador de estrés vegetal.

XII.II Conductividad eléctrica

La prueba de Kruskal-Wallis sí indicó variación entre sitios, destacando al Sitio Medio como aquel con mayor conductividad $41.74 \pm 26.08 \mu\text{S}/\text{cm}$. Este parámetro se relaciona con la pérdida de iones y la ruptura de membranas celulares, por lo que suele aumentar bajo estrés contaminante.

En trigo (*Triticum aestivum*), Blum y Ebercon (1981) reportaron que plantas con mayor tolerancia al estrés presentaron niveles de fuga de electrolitos entre 10 y 25 %, mientras que genotipos susceptibles alcanzaron valores superiores al 40 %, reflejando menor estabilidad de membranas. De manera similar, en arroz (*Oryza sativa*), Lutts et al. (1996) documentaron que bajo condiciones de estrés salino severo la fuga de electrolitos superó el 60 %, asociándose con daño estructural significativo en las membranas celulares. En contraste, en el presente estudio los valores de conductividad eléctrica en *Annona purpurea* presentaron una tendencia mayor en el sitio medio. Esto sugiere que, aunque se detectaron diferencias entre sitios, la magnitud de la liberación de electrolitos no indica una desestabilización crítica. La comparación se realiza de manera interpretativa y no como equivalencia directa de unidades, en este estudio se reportan valores absolutos de conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$), en la literatura los estudios expresan los resultados como porcentaje de fuga de electrolitos, lo cual estandariza la medición respecto a la conductividad total del tejido.

En este estudio el Sitio Alto presentó la menor conductividad, pese a ser el de mayor deposición de polvo. Esto sugiere que el polvo del Sitio Alto podría contener menos solutos móviles o sales, reduciendo la fuga iónica típica de ambientes más contaminados. Así también, *Annona purpurea* podría presentar respuestas fisiológicas compensatorias, como reforzamiento de membranas o cutícula, que disminuyen la pérdida de electrolitos, tal como ha sido reportado en diversas especies vegetales sometidas a estrés abiótico (Larcher, 2003; Taiz et al., 2015). En el Sitio Medio podría haber mayor concentración de partículas finas más solubles o componentes orgánicos transportados por humedad, lo cual incrementa la conductividad.

XII.III Variables estomáticas.

Densidad estomática. La densidad estomática presentó diferencias claras entre los tres sitios, evidenciando que *Annona purpurea* responde anatómicamente a la presencia de polvo sedimentado en el ambiente. El patrón observado fue una mayor densidad en el Sitio Bajo 95.25 estomas·mm⁻², con valores más bajos en los sitios Alto con 83.76 estomas·mm⁻² y Medio con 80.15 estomas·mm⁻², lo que coincide con los resultados documentados en múltiples especies sometidas a estrés por material particulado. Pourkhabbaz et al. (2010) y Egas (2018) demostraron que la deposición de MPS interfiere en el proceso de diferenciación epidérmica durante la expansión foliar, lo que puede reducir el número de células oclusivas formadas y, por consiguiente, la densidad estomática, como en *Platanus orientalis* L. donde se obtuvieron 227 estomas ·mm⁻² en la zona urbana y 314 ·mm⁻² en la zona rural, de la misma forma *Schinus molle* en el área de mayor impacto tuvo 8.593 ·mm⁻², en el área de impacto medio 10.20 ·mm⁻² y en la de bajo impacto 10.17 ·mm⁻².

Desde la perspectiva ecológica, una menor densidad estomática también puede constituir una estrategia de ajuste fisiológico. Rai y Panda (2014) plantean que, ante ambientes agresivos, las plantas pueden disminuir el número de estomas como mecanismo para: Reducir la transpiración, evitando pérdida excesiva de agua cuando las partículas bloquean parcialmente la luz o generan micro calentamiento foliar y limitar la entrada de contaminantes gaseosos, actuando como una forma de protección anatómica frente a la infiltración de partículas finas a través de los poros estomáticos.

En este sentido, la menor densidad estomática en los sitios Alto y Medio podría interpretarse como una respuesta adaptativa a ambientes con mayor carga de polvo y potencial estrés fisicoquímico.

Tamaño de los estomas. Los análisis revelaron diferencias significativas en el tamaño estomático entre sitios en *Annona purpurea*, con los estomas más grandes en el sitio de alto impacto: largo. Este patrón difiere de lo reportado para especies urbanas expuestas a contaminación, donde es común observar una reducción estomática por colapso de células oclusivas en los sitios de mayor perturbación (Pourkhabbaz et al., 2010; Egas 2018). *Schinus molle* en el área de mayor impacto

tuvo un largo de 17.51 μm , la de impacto medio 18.09 μm , y bajo impacto 17.50 μm y en *Platanus orientalis* L. Se obtuvieron 5.2 μm en la zona urbana y 7.6 μm en la zona rural.

Sin embargo, la respuesta observada en *Annona purpurea* podría tener varias explicaciones: un incremento compensatorio del tamaño del poro para mantener el intercambio gaseoso cuando la densidad estomática disminuye; una respuesta anatómica específica de la especie, cuyo comportamiento podría diferir del patrón general descrito para ambientes altamente contaminados. La influencia de partículas minerales no tóxicas, que no inducen colapso celular sino solo deposición superficial, permitiendo mantener o ampliar el tamaño estomático.

El hecho de que el Sitio Alto presente una mayor dispersión en los valores de ancho estomático sugiere que las condiciones micro ambientales o la variabilidad entre individuos, posiblemente asociadas a distintos niveles de exposición al polvo, influyen en esta característica.

XII.IV Hojas

Lumen del vaso de la vena media. En cuanto al tamaño del lumen del vaso de la vena media, El sitio Alto presentó el mayor lumen promedio 35.57, siendo significativamente diferente de los sitios Medio 21.86 y Bajo 21.04, Un mayor diámetro del lumen implica una mayor eficiencia hidráulica, pero también una mayor vulnerabilidad a la cavitación (Hacke et al., 2001). En ambientes sometidos a estrés por partículas y contaminación atmosférica, este patrón puede reflejar un compromiso entre eficiencia en el transporte de agua y seguridad hidráulica, donde plantas en sitios más impactados desarrollan vasos más anchos para compensar posibles limitaciones fisiológicas (Carlquist, 2001). Estos valores se encuentran por debajo de los rangos comúnmente reportados para especies difuso-porosas como *Fagus sylvatica* 40–100 μm o *Betula pendula* 50–120 μm , y muy por debajo de especies anillo-porosas como *Quercus robur*, que pueden superar los 200 μm (Carlquist, 2001). Así también la pared de los elementos de vaso en *Annona purpurea* mostró diferencias significativas entre los tres sitios evaluados, lo que indica una respuesta anatómica sensible a las condiciones ambientales locales. Este patrón sugiere que en los sitios con mayor impacto ambiental o mayor

deposición de polvo sedimentable se favorece el desarrollo de paredes vasculares más gruesas como un mecanismo de refuerzo estructural. Un mayor grosor de pared está asociado con una mayor resistencia mecánica y menor riesgo de colapso del vaso bajo tensiones hídricas (Hacke et al., 2001; Carlquist, 2001).

La anatomía es sensible a las condiciones ambientales. Estudios en especies de *Magnolia* que habitan bosques mesófilos de montaña han demostrado que, durante años con menor disponibilidad de agua, los vasos presentan diámetros más pequeños y una reducción en el área total destinada a la conducción (Rodríguez-Ramírez et al., 2020). Esta disminución del lumen vascular se interpreta como una estrategia funcional que favorece la seguridad hidráulica, ya que vasos más estrechos reducen el riesgo de embolismos bajo estrés hídrico. En este sentido, los cambios en el tamaño del lumen y en el grosor de las paredes pueden representar mecanismos de ajuste estructural frente a condiciones ambientales adversas.

Parénquima empalizada. El tamaño de las células del parénquima empalizada presentó diferencias altamente significativas entre sitios, El Sitio Bajo presentó el mayor espesor promedio 36.28 μm , seguido del Sitio Alto 32.41 μm , mientras que el Sitio Medio presentó los valores más bajos 29.37 μm . Estos valores se ubican dentro del rango reportado para dicotiledóneas mesofíticas (30–80 μm) según Larcher (2003). La mayor amplitud observada en el sitio Bajo podría estar asociada a una mayor disponibilidad lumínica o a condiciones ambientales menos restrictivas, ya que el parénquima en empalizada es altamente plástico y responde tanto a la intensidad de luz como a factores de estrés. En ambientes contaminados se ha reportado tanto reducción como modificación compensatoria del mesófilo, dependiendo de la intensidad y naturaleza del contaminante (Pourkhabbaz et al., 2010; Gostin, 2009). Por lo tanto, las diferencias observadas podrían reflejar una combinación de efectos lumínicos, altitudinales y de deposición de partículas.

Parénquima esponjoso. La amplitud de zona del tejido de parénquima esponjoso indica diferencias en el espesor del parénquima esponjoso, El Sitio Bajo presentó el mayor espesor promedio 23.67, siendo significativamente diferente de los sitios Alto 10.84 y Medio 10.78, los cuales no mostraron diferencias entre sí. En hojas

mesofíticas, el parénquima esponjoso suele oscilar entre 15 y 60 μm ; por lo tanto, los valores reducidos observados en Alto y Medio podrían indicar compactación del mesófilo o disminución de espacios intercelulares. Estudios en especies urbanas como *Platanus orientalis* han reportado adelgazamiento del mesófilo en ambientes contaminados, asociado a estrés fisiológico y alteraciones en el desarrollo tisular (Pourkhabbaz et al., 2010).

No obstante, las diferencias observadas en este estudio fueron moderadas, lo que podría deberse a la menor agresividad química del polvo local, la tolerancia de *Annona purpurea*, su capacidad de la especie para mantener el desarrollo del tejido fotosintético incluso bajo deposición de partículas, o la naturaleza del polvo, que puede generar estrés físico, pero no necesariamente daño químico directo. La variación observada en el espesor del mesófilo podría estar relacionada no solo con el gradiente de deposición de polvo, sino también con rasgos morfológicos como la densidad de tricomas y el tamaño foliar. Los tricomas pueden actuar como estructuras protectoras al interceptar partículas y reducir la radiación incidente, lo que modula el microclima foliar y puede contribuir a mantener la integridad del tejido fotosintético. Asimismo, el tamaño de la hoja influye en la relación entre área fotosintética y espesor del mesófilo, ya que hojas de mayor superficie pueden compensar un menor espesor tisular mediante mayor captación lumínica total. En conjunto, estos factores podrían explicar las diferencias anatómicas observadas entre sitios.

Pecíolo. Largo del lumen del vaso indica una fuerte respuesta anatómica al gradiente ambiental. El Sitio Alto presentó el mayor largo promedio 130.24, seguido por el Sitio Medio 64.06, mientras que el Sitio Bajo presentó el menor valor 32.86. Este patrón refleja una reducción progresiva en la longitud de los vasos conforme aumentan las condiciones de estrés ambiental.

De acuerdo con (Carlquist 2001), la longitud de los vasos es un rasgo clave de la eficiencia hidráulica, ya que vasos más largos reducen la resistencia al flujo de agua al disminuir el número de placas de perforación por unidad de longitud del xilema. En este contexto, los valores elevados observados en el sitio Alto sugieren una mayor eficiencia en el transporte hídrico hacia la lámina foliar, lo que podría estar

asociado a condiciones micro ambientales menos restrictivas. Sin embargo, (Hacke *et al.* 2001) señalan que una mayor eficiencia hidráulica conlleva un mayor riesgo de cavitación y embolismo, especialmente bajo condiciones de estrés hídrico o ambiental. Por ello, los vasos más largos registrados en el sitio Alto también podrían implicar una mayor vulnerabilidad estructural del sistema vascular frente a fluctuaciones ambientales.

En cuanto al ancho del lumen del vaso del pecíolo en *Annona purpurea* mostró diferencias significativas entre los tres sitios evaluados. El valor promedio general fue de $26.85 \pm 10.36 \mu\text{m}$, con un rango de 9.75 a 75.45 μm . Este patrón indica que el tamaño interno de los vasos del pecíolo cambia dependiendo del sitio donde crecen las plantas. Aunque existen pocos estudios que analicen de manera específica las características anatómicas del pecíolo en respuesta a gradientes de contaminación, no puede considerarse de forma aislada. El pecíolo forma parte integral del sistema vascular de la hoja y mantiene una continuidad anatómica y funcional con la vena media de la lámina foliar, compartiendo principios estructurales y fisiológicos relacionados con el transporte de agua y solutos.

La pared del vaso del pecíolo mostró diferencias significativas entre los tres sitios evaluados. El valor promedio general fue de $4.40 \pm 2.04 \mu\text{m}$, con un rango de 1.73 a 19.16 μm . Un mayor grosor de la pared del vaso, como el observado en el sitio Bajo, está relacionado con una mayor resistencia mecánica y una mayor seguridad hidráulica, ya que ayuda a evitar que los vasos colapsen o se dañen cuando hay estrés hídrico o ambiental (Hacke *et al.*, 2001). Esto sugiere que en este sitio las plantas desarrollan vasos más reforzados como una forma de protección frente a condiciones más estresantes, como una mayor deposición de polvo sedimentable.

En términos funcionales, tanto el pecíolo como la vena media constituyen componentes del continuum hidráulico de la planta, por lo que variaciones en el diámetro del lumen, la longitud de los elementos vasculares o el grosor de la pared celular influyen directamente en la eficiencia y seguridad del transporte hídrico hacia los tejidos fotosintéticos

XII. Conclusiones

Los resultados de este estudio muestran que *Annona purpurea* presenta respuestas anatómicas y morfológicas diferenciadas entre los sitios con distinto impacto. En conjunto, las variables evaluadas presentan una marcada adaptabilidad estructural de la especie, lo que sugiere una capacidad de ajuste al cambio ambiental asociado a la deposición de partículas.

La densidad estomática disminuyó en los sitios con mayor exposición al polvo, lo que coincide con lo reportado en la literatura para especies sometidas a contaminación atmosférica. Sin embargo, la relación entre el peso de polvo por sitio y la densidad estomática no fue realmente fuerte. Este patrón sugiere que la especie adopta estrategias de ajuste anatómico orientadas a reducir la entrada de contaminantes y limitar la transpiración en ambientes contaminados, sin ser precisamente la cantidad de polvo lo que afecta de forma directa. El largo y ancho estomático fueron mayores en el sitio de mayor exposición, en contraste con lo documentado para muchas especies contaminadas. Este comportamiento podría representar una estrategia compensatoria ante la reducción en densidad estomática o una consecuencia de la composición y del tipo de polvo que se encuentra en los sitios.

El pH foliar mostró valores más alcalinos en los sitios altamente expuestos, lo que indica que la composición mineral del polvo juega un papel determinante en este parámetro. Esto resalta la necesidad de incluir análisis químicos del polvo para interpretar adecuadamente los cambios de pH observados. Por su parte, la conductividad eléctrica no siguió un patrón directamente proporcional al polvo sedimentado, lo que sugiere que la conductividad depende no solo de la cantidad de polvo depositado, sino también de su solubilidad y composición química. En este sentido, el Sitio Medio, caracterizado por mayor humedad y posiblemente por partículas más solubles, presentó la mayor conductividad.

A nivel anatómico, el parénquima empalizada mostró diferencias altamente significativas entre sitios, con mayores espesores en el sitio Bajo y menores en el sitio Medio, lo que indica una respuesta a las condiciones de cada sitio. Este patrón sugiere un cambio estructural posiblemente relacionado con la disponibilidad

lumínica y con el estrés generado por la deposición de polvo. El parénquima esponjoso, por su parte, presentó una reducción moderada en los sitios con mayor deposición de polvo, lo que muestra una sensibilidad anatómica, aunque con menor severidad que la observada en otros ambientes más agresivos.

En cuanto al sistema vascular, el lumen del vaso de la hoja presentó sus valores más altos en el sitio Alto, mientras que la pared del vaso de la hoja fue más gruesa en el sitio Bajo y más delgada en el sitio Alto. Este patrón muestra un cambio en la eficiencia hídrica, donde ambientes con menos polvo favorecen vasos con mayor lumen y paredes más delgadas, y ambientes más estresantes (más polvo) promueven vasos con menor lumen y paredes más gruesas como mecanismo de protección.

De forma similar, en el pecíolo se observaron respuestas anatómicas de acuerdo al sitio. El lumen del vaso del pecíolo fue mayor en el sitio Alto y menor en los sitios Medio y Bajo, lo que sugiere una mayor eficiencia hídrica en ambientes menos perturbados. La pared del vaso del pecíolo presentó su mayor grosor en el sitio Bajo, valores intermedios en el sitio Alto y los más bajos en el sitio Medio, lo que refuerza la hipótesis de un cambio vascular como respuesta al estrés ambiental. Asimismo, el largo del vaso del pecíolo fue significativamente mayor en el sitio Alto, intermedio en el sitio Medio y menor en el sitio Bajo, lo que indica una reducción progresiva de la eficiencia hídrica conforme aumentan las condiciones de estrés ambiental.

El análisis de componentes principales permitió sintetizar la variación conjunta de las variables morfoanatómicas y fisicoquímicas evaluadas en *Annona purpurea*, evidenciando una diferenciación clara entre los sitios de muestreo. Los dos primeros componentes explicaron el 40.76% de la varianza total, lo que permitió identificar los principales gradientes ambientales asociados a la deposición de polvo.

En este contexto, se observó que variables como la acumulación de polvo, la conductividad eléctrica y el tamaño estomático se agrupan en un mismo eje, mientras que variables como el pH y la densidad estomática se distribuyen en dirección opuesta, sugiriendo respuestas fisiológicas contrastantes. Asimismo, las

variables anatómicas relacionadas con el sistema vascular y los tejidos foliares contribuyeron a la diferenciación estructural entre los sitios.

En conjunto, el PCA confirma que las características evaluadas no actúan de manera independiente, sino que responden de forma integrada a las condiciones ambientales

En conjunto, estos resultados nos muestran que *Annona purpurea* posee una respuesta variable, a lo ya reportado al polvo sedimentable, en la que intervienen tanto aspectos estructurales como fisiológicos. La naturaleza mineral del polvo de la región aunado a las actividades de transporte y explosiones, su tamaño de partícula y su solubilidad parecen influir significativamente en las características anatómicas y morfológicas de las hojas de *Annona purpurea*, sin embargo, habría que analizar los impactos de estas mismas en el crecimiento y desarrollo de la planta.

XIII. Recomendaciones

Finalmente, se recomienda que estudios futuros incluyan análisis químicos detallados del polvo, particularmente la identificación y cuantificación de metales pesados (como Pb, Cd, Zn, entre otros), así como la determinación de pH y carbonatos, con el fin de comprender no solo la cantidad, sino también la composición del material particulado y su posible efecto tóxico sobre la vegetación.

Asimismo, se sugiere realizar muestreos en distintas estaciones del año para evaluar la variación temporal en la deposición de partículas, así como ampliar el análisis hacia otros caracteres anatómicos, como el grosor de la cutícula, la presencia de ceras epicuticulares y la densidad de tricomas, los cuales pueden desempeñar un papel importante en la captura y tolerancia al polvo.

De igual manera, es recomendable incrementar el tamaño de muestra y considerar mediciones individuales del polvo por hoja o por individuo, con el objetivo de mejorar la variabilidad de los datos y permitir análisis estadísticos más robustos.

En general, los resultados indican que la hipótesis planteada se cumple de manera parcial, ya que algunas variables respondieron conforme a lo esperado, mientras que otras mostraron patrones distintos a los reportados en la literatura, lo que

resalta la complejidad de las respuestas morfoanatómicas y fisiológicas frente a factores ambientales múltiples.

XIV. Referencias

- Adeniran, S. A., Kadiri, A. B., & Olowokudejo, J. D. (2020). Taxonomic significance of some leaf anatomical features of the species of *Annona* L. (Annonaceae) from Nigeria. *Journal of Research in Forestry, Wildlife and Environment*, 12(1), 27–35.
- Alcalá, J. A. (2010). *Evaluación de las alteraciones anatómicas foliares en especies urbanas expuestas a contaminación atmosférica en la Ciudad de México* (Tesis de maestría, UNAM).
- Appleman, C. O. (1917). Effect of dust on photosynthesis. *Botanical Gazette*, 64(4), 349. <https://www.jstor.org/stable/2469023>
- Blum, A., & Ebercon, A. (1981). Cell membrane stability as a measure of drought and heat tolerance in wheat. *Crop Science*, 21, 43–47. <https://doi.org/10.2135/cropsci1981.0011183X002100010013x>
- Carlquist, S. (2001). *Comparative wood anatomy: Systematic, ecological, and evolutionary aspects of dicotyledon wood* (2nd ed.). Springer.
- Chatrou, L. W., et al. (2012). A new subfamilial and tribal classification of the pantropical flowering plant family Annonaceae. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 169, 5–40.
- Chaudhary, I. J., Rathore, D., & Kumar, N. (2018). Suspended particulate matter deposition and its impact on plant physiology and structure: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(32), 32318–32335. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3206-6>

- Chen, L., Huang, T., Zhang, Y., Li, X., & Chen, R. (2023). Characterizing accumulation and negative effects of aerosol particles on the leaves of urban trees. *Environmental Pollution*, 329, 122035.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.122035>
- CONABIO. (2010). *La biodiversidad en Colima: Estudio de estado*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Couvreur, T. L. P., et al. (2021). Molecular phylogenetics and historical biogeography of Annonaceae. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 50, 125611.
- Dalmaso, A. D., González, C. M., & Bachmeier, O. S. (2001). Anatomía foliar de *Ligustrum lucidum* y *Ligustrum sinense* cultivadas en ambientes urbanos y rurales. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*, 36(1–2), 93–100.
- Devkota, A., et al. (2025). Effects of dust pollution on leaf morphology and chlorophyll content: A comparative study across two seasons in Biratnagar, Nepal. *Banko Janakari*, 35(1), 45–61.
- Egas, C., Naulin, P. I., & Préndez, M. (2018). Contaminación urbana por material particulado y su efecto sobre las características morfoanatómicas de cuatro especies arbóreas de Santiago de Chile. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 34(3), 541–554.
- Esau, K. (1985). *Anatomía vegetal*. Omega.
- Fadhil, A. A., Mohammed, S. J., & Al-Abboodi, A. (2023). Morphological responses of plants to air pollutants: A comparative study on leaf changes in five species. *Iranian Journal of Ichthyology*, 10(Special Issue 1), 286–293.
- Fahn, A. (1990). *Plant anatomy*. Pergamon Press.

- Farmer, A. M. (1993). The effects of dust on vegetation — A review. *Environmental Pollution*, 79(1), 63–75.
[https://doi.org/10.1016/0269-7491\(93\)90179-R](https://doi.org/10.1016/0269-7491(93)90179-R)
- Flückiger, W., Braun, S., & Blaser, P. (2002). Forests under pressure: Air pollution and climate change. En *Forest in a changing environment* (pp. 67–86). Kluwer Academic Publishers.
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Instituto de Geografía, UNAM.
- Ghose, M. K. (2007). Generation and quantification of hazardous dusts from coal mining in the Indian context. *Environmental Monitoring and Assessment*, 130(1–3), 35–45.
- Gostin, I. N. (2009). Air pollution effects on the leaf structure of some Fabaceae species. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 37(2), 57–63.
- Grantz, D. A., Zinsmeister, D., & Burkhardt, J. (2018). Ambient aerosol increases minimum leaf conductance. *New Phytologist*, 219(1), 275–286.
- Gupta, D., & Prasad, M. N. V. (2020). Physiological responses of urban trees. *Urban Forestry & Urban Greening*, 49, 126638.
- Hacke, U. G., et al. (2001). Trends in wood density and structure. *Plant Physiology*, 126(3), 899–909.
- Hernández, A., & Lozada, M. (2012). *Evaluación de la estructura foliar como respuesta a la contaminación urbana en especies nativas*. Instituto Nacional de Ecología.
- Hirano, T., Kiyota, M., & Aiga, I. (1995). Physical effects of dust on leaf physiology. *Environmental Pollution*, 89(3), 255–261.

- INEGI. (2017). *Anuario estadístico y geográfico de Colima*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI. (2020). *Anuario estadístico y geográfico de Guerrero 2020*.
<https://www.inegi.org.mx/programas/anuario/2020/>
- Irwe, R. R., et al. (2016). Study of dust deposition on leaves. *International Journal of Life Sciences*, 4(4), 537–541.
- Johansen, D. A. (1940). *Plant microtechnique*. McGraw-Hill.
- Joshi, N., & Swami, A. (2009). Physiological responses under pollution stress. *Environmentalist*, 29(4), 409–412.
- Kassambara, A. (2023). *ggpubr: ggplot2 based publication ready plots* (R package).
- Khan, F. I., & Abbasi, S. A. (2000). Biomonitoring of air pollution. *Environmental Monitoring and Assessment*, 61(3), 383–398.
- Khan, S., & Ahmad, I. (2018). Foliar biochemical alterations. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190.
- Larcher, W. (2003). *Physiological plant ecology* (4th ed.). Springer.
- Lovett, G. M. (1994). Atmospheric deposition of nutrients. *Ecological Applications*, 4(4), 629–650.
- Lutts, S., et al. (1996). NaCl-induced senescence in rice. *Annals of Botany*, 78(3), 389–398.
- Marimuthu, K. V., & Lavanya, K. (2014). Air pollution tolerance index of plants. *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 6(5), 320–324.
- McGranahan, D. A., & Poling, B. N. (2021). Fugitive road dust alters plant physiology. *Plant Ecology*, 222(4), 485–497.

- Metcalfe, C. R., & Chalk, L. (1979). *Anatomy of the dicotyledons*. Oxford University Press.
- NASA POWER. (2024). *Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER): Data Access Viewer*. <https://power.larc.nasa.gov/>
- Neinhuis, C., & Barthlott, W. (1998). Leaf surface contamination. *New Phytologist*, 138(1), 91–98.
- Padilla Velarde, E., et al. (2008). Vegetación de Minatitlán. *Acta Botanica Mexicana*, 84, 25–72.
- Peirce, G. J. (1909). Effect of cement dust. *Science*, 30(775), 652–654.
- Peña Colorada. (s. f.). *Sobre Peña Colorada*.
<https://www.pcolorada.com/sobre-pena-colorada/>
- Pinto, F., Silva, L., & Araújo, J. (2011). Leaf epidermal traits. *Acta Botanica Brasilica*, 25(3), 569–580.
- Prasad, M. N. V. (2004). *Heavy metal stress in plants*. Springer.
- Pourkhabbaz, A., et al. (2010). Pollution effects on leaves. *Environmental Pollution*, 158(8), 2763–2768.
- Qin, Y., et al. (2015). Dust deposition effects. *Water*, 7(1), 116–130.
- Rai, P. K., & Panda, L. L. S. (2014). Leaf dust deposition. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(6), 3720–3733.
- R Core Team. (2023). *R: A language and environment for statistical computing* (Version 4.3.1).
- Rainer, H., & Chatrou, L. W. (2006). Annonaceae. En *The Families and Genera of Vascular Plants*. Springer.
- Reed, R. H. (1989). Metal tolerance in algae. En J. Shaw (Ed.), *Metal tolerance in plants*.

- Rivas, M., & Lozano, S. (2010). Anatomía foliar y contaminación. *Revista Mexicana de Ciencias Ambientales*, 1(1), 45–53.
- Ruzin, S. E. (1999). *Plant microtechnique and microscopy*. Oxford University Press.
- Rzedowski, J., & Rzedowski, G. C. (2005). *Flora fanerogámica de México*. Instituto de Ecología.
- Sauquet, H., et al. (2017). The ancestral flower. *Nature Communications*, 8, 16047.
- Servicio Geológico Mexicano. (2018). *Panorama minero del estado de Colima*.
- Sborato, A. D. A., et al. (2007). Anatomía foliar y contaminación. *Revista Brasileira de Biociências*, 5(2), 113–120.
- Sharifi, M. R., et al. (1997). Dust impacts on gas exchange. *Journal of Applied Ecology*, 34(4), 837–846.
- Sharma, P., & Dubey, R. S. (2016). Impacts of particulate matter. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(5).
- Sharma, P., & Tripathi, B. D. (2009). Dust deposition and leaves. *Environmental Monitoring and Assessment*, 146, 343–351.
- Singh, R. P., & Verma, A. (2021). Air pollutants impact. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 51312–51325.
- Singh, S., & Verma, A. (2007). Phytotoxic effects. *Environmental Monitoring and Assessment*, 129, 1–11.
- Standley, P. C., et al. (1946). *Flora of Guatemala*.
- Taiz, L., et al. (2015). *Plant physiology and development*. Sinauer.

- Tak, A. A., & Kakde, U. B. (2017). Air pollution tolerance index. *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 9(7), 83–89.
- Topete-Corona, C., et al. (2020). Estructura poblacional de *Annona purpurea*. *Revista de Biología Tropical*, 68(4), 1171–1184.
- Tripathi, A. K., & Gautam, M. (2007). Biochemical parameters. *Journal of Environmental Biology*, 28(1), 127–132.
- Tyree, M. T., & Zimmermann, M. H. (2002). *Xylem structure and the ascent of sap*. Springer.
- Vargas, M. C. (2017). *Cambios fisiológicos y anatómicos*. Tesis de maestría.
- Wickham, H. (2016). *ggplot2: Elegant graphics for data analysis*. Springer.
- Zia-Khan, S., et al. (2014). Dust deposition effects. *Water*, 7(1), 116.