



Centro de Investigación Científica de Yucatán A.C.

Posgrado en Ciencias Biológicas

**“Balance de energía y propiedades biomecánicas en
cuatro especies de árboles juveniles del arbolado en
la ciudad de Mérida”**

Tesis que presenta

Aarón René Casanova Domínguez

En opción al título de

MAESTRO EN CIENCIAS

(Ciencias Biológicas: Opción Recursos Naturales)

Mérida, Yucatán, México

2022

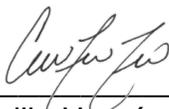
*CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA DE YUCATÁN, A. C.
POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS*



RECONOCIMIENTO

Por medio de la presente, hago constar que el trabajo de tesis de **Aarón René Casanova Domínguez** titulado “**Balance de energía y propiedades biomecánicas en cuatro especies de árboles juveniles del arbolado urbano de Mérida**”, fue realizado en la Unidad de Recursos Naturales, dentro de la línea de investigación “Servicios ambientales de la biodiversidad” y del laboratorio de Fisiología Vegetal del **Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.** bajo la dirección del **Dr. José Luis Andrade Torres**, dentro de la opción Recursos naturales, perteneciente al Programa de Posgrado en Ciencias Biológicas de este Centro.

Atentamente

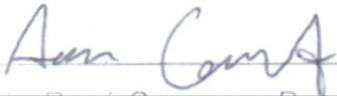


Dra. Cecilia Hernández Zepeda
Directora de Docencia

Mérida, Yucatán, México, a 014 de Enero de 2022

DECLARACIÓN DE PROPIEDAD

Declaro que la información contenida en la sección de Materiales y Métodos, los Resultados y Discusión de este documento proviene de las actividades de investigación realizadas durante el período que se me asignó para desarrollar mi trabajo de tesis, en las Unidades y Laboratorios del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., y que a razón de lo anterior y en contraprestación de los servicios educativos o de apoyo que me fueron brindados, dicha información, en términos de la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, le pertenece patrimonialmente a dicho Centro de Investigación. Por otra parte, en virtud de lo ya manifestado, reconozco que de igual manera los productos intelectuales o desarrollos tecnológicos que deriven o pudieran derivar de lo correspondiente a dicha información, le pertenecen patrimonialmente al Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., y en el mismo tenor, reconozco que si derivaren de este trabajo productos intelectuales o desarrollos tecnológicos, en lo especial, estos se registrarán en todo caso por lo dispuesto por la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, en el tenor de lo expuesto en la presente Declaración.



Aarón René Casanova Domínguez

Este trabajo se llevó a cabo en la Unidad de Recursos Naturales del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. bajo la dirección del Dr. José Luis Andrade Torres.

AGRADECIMIENTOS

Al CONACYT por la beca de maestría otorgada para el CVU 1005334.

Al Centro de Investigación Científica de Yucatán A.C. por aceptarme y en especial a la Unidad de Recursos Naturales por las instalaciones y las facilidades para el desarrollo del presente trabajo.

Al Laboratorio de Fisiología Vegetal de la Unidad de Recursos Naturales.

Al Laboratorio de Mecánica de la Unidad de Materiales Poliméricos.

A mi director de tesis, el Dr. José Luis Andrade Torres, por haberme aceptado como su estudiante, por su paciencia, por estar siempre disponible para cualquier duda y por su contribución tanto en mi desarrollo académico como en el personal.

A mi comité tutorial, la Dra. María Azucena Canto Aguilar, el Dr. José Carlos Cervera Herrera y el Dr. Emmanuel Alejandro Flores Johnson, por sus oportunas observaciones, sus valiosas aportaciones y dirección durante el desarrollo del trabajo.

A los doctores Manuel Jesús Cach Pérez y José Luis Hernández Stefanoni por sus aportaciones para mejorar el trabajo.

Al Ing. Roberth Armando Us Santamaría, por su valiosa asistencia en el laboratorio y el trabajo experimental, a pesar de las limitaciones por la pandemia.

Al Biól. Luis Simá por su aportación para la identificación de especies y selección de individuos.

Al Dr. Felipe Sánchez Teyer y la M. en C. Fabiola Escalante de la Unidad de Biotecnología, por el préstamo de la cámara infrarroja Fluke Ti-400.

Al Ayuntamiento de Mérida 2018-2021 y al banco de materiales del departamento de Vías Terrestres por su contribución con muestras de asfalto.

A los integrantes del Laboratorio de Fisiología Vegetal de la URN: Anaí Pereira, Fanny Arguello, Gabriela Cerón, Elizabeth González, Rosa Pérez, Gerardo Carrillo, Julio Salas, Francisco Paz, por su valiosa colaboración en mi desarrollo académico, sus

observaciones y sus sugerencias y especialmente por su amistad y camaradería durante todo este proceso.

A mi buen amigo, al fin M. en C. Alejandro Castellanos Dounis, por su valiosa guía a lo largo de toda la maestría.

Si he omitido a alguien, háganlo saber después.

DEDICATORIAS

A mis padres que nunca me han negado absolutamente nada y siempre han confiado en mí.

A mis hermanos, mis grandes tutores en la vida y siempre estaré en deuda con ellos.

A mi amiga Kelly González que me enseñó a tener más empatía y ser más comprensivo con la humanidad, estaría contenta de este logro.

A todas las personas que dedican su vida al trabajo científico para la conservación de este bello planeta y el bien de la sociedad, de igual forma a todos los que aportan y cooperan para la realización del trabajo científico.

ÍNDICE GENERAL	
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I	3
ANTECEDENTES	3
1.1 BALANCE DE ENERGÍA.....	3
1.2 RASGOS FISIOLÓGICOS RELACIONADOS CON EL BALANCE DE ENERGÍA	5
1.3 SUPERFICIES URBANAS Y SU EFECTO EN EL BALANCE DE ENERGÍA..	7
1.4 CRECIMIENTO Y ASIGNACIÓN DE BIOMASA VEGETAL.....	8
1.5 PROPIEDADES BIOMECÁNICAS DE LAS PLANTAS.....	9
1.6 ESPECIES SELECCIONADAS.....	10
JUSTIFICACIÓN	14
PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.....	14
HIPÓTESIS	15
OBJETIVOS	15
CAPITULO II.....	17
2.1 INTRODUCCIÓN.....	17
2.2 MATERIALES Y MÉTODOS.....	17
2.2.1 SUPERFICIES SELECCIONADAS COMO TRATAMIENTOS	17
2.2.3 CARACTERIZACIÓN DE LA RADIACIÓN INCIDENTE Y MICROAMBIENTE	19
2.2.4 DISEÑO EXPERIMENTAL.....	20
2.2.5 BALANCE DE ENERGÍA Y TRANSPIRACIÓN.....	22
2.2.6 TASA RELATIVA DE CRECIMIENTO	26
2.2.7 EFICIENCIA CUÁNTICA MÁXIMA DEL FOTOSISTEMA II	27
2.2.8 PRUEBA BIOMECÁNICA.....	28

2.3 ANÁLISIS DE DATOS	29
2.4 RESULTADOS.....	31
2.4.1 CARACTERIZACIÓN DE SUPERFICIES	31
2.4.2 CARACTERIZACIÓN DE LA RADIACIÓN INCIDENTE.....	31
2.4.3 CRECIMIENTO Y ASIGNACIÓN DE BIOMASA	34
2.4.4 TRANSPIRACIÓN.....	37
2.4.5 BALANCE DE ENERGÍA EN HOJAS.....	40
2.4.6 EFICIENCIA CUÁNTICA MÁXIMA DEL FOTOSISTEMA II	48
2.4.7 PRUEBA BIOMECÁNICA.....	49
2.5 DISCUSIÓN.....	51
CAPITULO III	54
CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS.....	54
3.1 CONCLUSIONES.....	54
3.2 PERSPECTIVAS	54
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57

LISTADO DE FIGURAS

- Figura 1.1.** Componentes del balance de energía de una hoja, incluyendo las posibles superficies que la rodean. Las flechas solo indican las direcciones de los flujos (rojas indican radiaciones, azules indican calor latente y sensible) y no representan ninguna cantidad. (modificación de Lambers, et al 2008 y Nobel, et al 2009). 4
- Figura 1.2.** En el centro se observa un pequeño árbol en una poceta, ejemplo de las condiciones extremas de crecimiento de árboles urbanos en un nuevo fraccionamiento del Norte de la ciudad de Mérida, Yucatán. 8
- Figura 1.3.** Las 4 especies elegidas: A) *Caesalpinia mollis* (Kunth) Spreng, B) *Cordia dodecandra* DC, C) *Brosimum alicastrum* Sw, D) *Azadirachta indica* A Juss..... 13
- Figura 2.1.** Imágenes térmicas de una sección de cada superficie en pruebas preliminares, tomadas a la misma hora (13:30 p.m.) con una cámara Fluke Ti-400, donde se observan las diferentes temperaturas de los sustratos. A) Asfalto. B) Corteza roja. C) Suelo (tierra café). El registro máximo de temperatura promedio lo obtuvo el asfalto (A) con 51.6 °C, seguido del suelo (B) 48.7 °C y la corteza (C) 42.6 °C, promedios tomados por la cámara. 18
- Figura 2.2.** Estructura final de las cajas con las plantas de las cuatro especies sobre los tres tratamientos en el sitio del experimento 21
- Figura 2.3.** Diagrama de las cajas divididas en las tres secciones con los tratamientos y con las plantas numeradas. En el recuadro de la derecha se señala que cada tratamiento tenía una planta de cada especie. La leyenda superior indica los tres tratamientos. En el lado izquierdo de la figura se señala el norte..... 22
- Figura 2.4.** Variación de las condiciones de microambiente en días consecutivos (03 al 10 de noviembre), donde se señalan tres de los días seleccionados (óvalos azules). En los ejes Y están graficados el flujo de fotones de luz ($\mu\text{mol m}^{-2}$), radiación incidente (W m^2), temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y humedad relativa (%) y el eje X las fechas de los días. Los óvalos azules representan tres de los días seleccionados para la estimación y el análisis de la transpiración y balance de energía. 33

Figura 2.5. Promedio de biomasa total inicial por especie. Letra mayúscula distinta indica diferente biomasa total entre especies. Tukey $\alpha=0.05$. Las barras superiores indican el error estándar.	34
Figura 2.6. Promedios del área foliar específica, fracción de masa foliar y tasa relativa de crecimiento correspondientes al final del experimento con sus unidades respectivas. Las barras superiores indican el error estándar.	37
Figura 2.7. Gráfica por especie del análisis de regresión para validar la ecuación alométrica de cada una.	38
Figura 2.8. Promedio de la eficiencia cuántica máxima del fotosistema II (PS-II) en pre-alba por especie y tratamiento (n=36). Las barras superiores indican la desviación estándar. Letra mayúscula distinta indica diferencias entre especies. Tukey ($\alpha=0.05$).	48
Figura 2.9. Gráfica de fuerza-deflexión de las 4 especies. Se eligió sólo una gráfica representativa por especie.	50

LISTADO DE CUADROS

Cuadro 2.1. Ecuaciones alométricas para estimar el área foliar en cm^2 para cada especie en cada semana de medición de transpiración.	26
Cuadro 2.2. Promedio de temperatura máxima y promedio de albedo máximo a las 12:00 h \pm desviación estándar. Las letras mayúsculas distintas indican temperaturas diferentes, letras minúsculas distintas indican albedos diferentes. Tukey $\alpha=0.05$	31
Cuadro 2.3. Se presentan las sumatorias totales del flujo de fotones totales diarios ($\mu\text{mol m}^{-2}$) en los días de medición del 03 de noviembre al 11 de diciembre. Los días con mayor cantidad de flujo de fotones en moles son los resaltados en color azul y fueron los que se tomaron en cuenta para los resultados presentados.	32
Cuadro 2.4. Promedios \pm desviación estándar de biomasa inicial por componente de cada especie. Letra minúscula distinta en la columna del componente señala diferencias significativas de los componentes entre especies de acuerdo a la prueba de Tukey ($\alpha=0.05$) (n=16).	34

Cuadro 2.5. Biomasa por componente por tratamiento \pm error estándar. Letra mayúscula distinta representa diferencias entre especie, letra minúscula distinta representa diferencias entre tratamientos de acuerdo a la prueba de Tukey ($\alpha=0.05$). (n=59). 35

Cuadro 2.6. Promedios de área foliar específica (SLA), fracción de masa foliar (LMF) y tasa relativa de crecimiento (RGR) de cada especie por tratamiento con \pm error estándar. Letra mayúscula distinta en cada columna indica diferencias entre especie de acuerdo a la prueba de Tukey ($\alpha=0.05$) (n=59). 36

Cuadro 2.7. Resultados del modelo de regresión lineal y del error cuadrado medio en cm^2 para la ecuación alométrica de cada especie. 38

Cuadro 2.8. Promedio \pm error estándar de transpiración en moles por metro cuadrado por día. Letras mayúsculas distintas representan diferencias entre especies, letras minúsculas distintas representan diferencias entre tratamientos. Tukey ($\alpha=0.05$). 39

Cuadro 2.9. Promedio \pm desviación estándar del ángulo de inclinación de las hojas de cada especie medidos en todos los individuos en 3 días diferentes (n=60). 40

Cuadro 2.10. Promedio \pm error estándar en W m^2 de cada componente del balance de energía y temperatura foliar ($^{\circ}\text{C}$) del día 04 de noviembre. Letras mayúsculas distintas en las columnas representan diferencias entre especies, letras minúsculas distintas representan diferencias entre tratamientos. Tukey ($\alpha=0.05$) (n=36)..... 41

Cuadro 2.11. Promedio \pm error estándar en W m^2 de cada componente del balance de energía y temperatura foliar ($^{\circ}\text{C}$) del día 06 de noviembre. Letras mayúsculas distintas en las columnas representan diferencias entre especies, letras minúsculas distintas representan diferencias entre tratamientos. Tukey ($\alpha=0.05$) (n=36)..... 42

Cuadro 2.12. Promedio \pm error estándar en W m^2 de cada componente del balance de energía y temperatura foliar ($^{\circ}\text{C}$) del día 10 de noviembre. Letras mayúsculas distintas en las columnas representan diferencias entre especies, letras minúsculas distintas representan diferencias entre tratamientos. Tukey ($\alpha=0.05$) (n=36)..... 43

Cuadro 2.13. Promedio \pm error estándar en W m^2 de cada componente del balance de energía y temperatura foliar ($^{\circ}\text{C}$) del día 13 de noviembre. Letras mayúsculas

distintas en las columnas representan diferencias entre especies, letras minúsculas distintas representan diferencias entre tratamientos. Tukey ($\alpha=0.05$) ($n=36$)..... 45

Cuadro 2.14. Promedio \pm error estándar en $W\ m^2$ de cada componente del balance de energía y temperatura foliar ($^{\circ}C$) del día 03 de diciembre. Letras mayúsculas distintas en las columnas representan diferencias entre especies, letras minúsculas distintas representan diferencias entre tratamientos. Tukey ($\alpha=0.05$) ($n=36$)..... 46

Cuadro 2.15. Promedio \pm error estándar en $W\ m^2$ de cada componente del balance de energía y temperatura foliar ($^{\circ}C$) del día 11 de diciembre. Letras mayúsculas distintas en las columnas representan diferencias entre especies, letras minúsculas distintas representan diferencias entre tratamientos. Tukey ($\alpha=0.05$) ($n=36$)..... 47

Cuadro 2.16. Módulo de flexión y máximo esfuerzo longitudinal de las especies probadas con desviación estándar ($n=16$). Tukey ($\alpha=0.05$). 49

ABREVIATURAS

a = Coeficiente de absorción de onda corta de la hoja

a_{IR} = Coeficiente de absorción de onda larga de la hoja

$C_{va}^{airelibre}$ = Concentración de vapor de agua del aire libre

C_{va}^{hoja} = Concentración de vapor de agua dentro de la hoja

D_{va} = Coeficiente de difusión del vapor de agua

e_{IR} = Coeficiente de emisividad de la hoja

E = Módulo de flexión

EA = Asimilación neta

EI = Rigidez a flexión

F_v/F_m = Eficiencia máxima del fotosistema II

HR = Humedad relativa

H_{vap} = Calor de vaporización del agua

I = Segundo momento de área

K_{aire} = Coeficiente de conductividad térmica del aire

LMF = Razón de peso foliar y peso total

M_{max} = Fuerza de pandeo

r = Valor del albedo

S = Radiación directa de onda corta

SLA = Área foliar específica

RGR = Tasa relativa de crecimiento

T = Temperatura

$T^{alrededor}$ = Temperatura de la superficie utilizada como tratamiento

$T^{ambiente}$ = Temperatura ambiental

T^{hoja} = Temperatura de la hoja

$T^{aire libre}$ = Temperatura del ambiente

δ_{cl} = Capa límite de la hoja

σ = Constante de Steffan-Boltzmann

σ_{Bmax} = Máximo esfuerzo longitudinal

RESUMEN

El arbolado urbano se considera un componente importante de las ciudades por los servicios ambientales que brinda. Sin embargo, los elementos de las ciudades como calles, aceras y construcciones tienen propiedades ópticas que, junto con la alta cantidad de radiación solar incidente, elevan la temperatura ambiental foliar afectando el desarrollo de los árboles en su etapa juvenil. A través del balance de energía, se evaluaron los efectos ocasionados por la radiación solar y el reflejo de la radiación de onda corta de tres superficies diferentes (suelo, corteza y asfalto) usados como tratamientos en cuatro especies presentes en el arbolado urbano de la ciudad de Mérida. Se encontraron diferencias en las temperaturas máximas y el albedo de las tres superficies, el asfalto tuvo la mayor temperatura máxima promedio (55 ± 5 °C) y la corteza el mayor albedo promedio ($15.5 \pm 3.8\%$). Al aplicar las superficies como tratamientos a las especies, no se encontraron diferencias entre tratamientos, pero sí existieron diferentes respuestas entre especies. Esto fue debido principalmente a los ángulos de inclinación de las hojas. Por ejemplo, en uno de los días de mayor radiación, *Caesalpinia mollis*, la especie con el mayor ángulo de inclinación hacia abajo en sus hojas con respecto a la horizontal ($58 \pm 21^\circ$), tuvo una cantidad de radiación neta de 816 ± 10 W m² (en asfalto), comparada con la radiación neta recibida por *Azadirachta indica* (1148 ± 15 W m² con ángulo de inclinación de $25 \pm 14^\circ$). Por esto, *C. mollis* tuvo un menor calor latente (678 ± 58 W m²) que *A. indica* (1063 ± 93 W m²). Por consecuencia *C. mollis* obtuvo una tasa relativa de crecimiento de 0.009 ± 0.002 mg g⁻¹ d⁻¹ contra 0.001 ± 0.003 mg g⁻¹ d⁻¹, 0.007 ± 0.003 mg g⁻¹ d⁻¹ y 0.008 ± 0.002 mg g⁻¹ d⁻¹ de *A. indica*, *Brosimum alicastrum* y *Cordia dodecandra*, respectivamente en el día 48 del experimento (tratamiento suelo). Estos resultados demuestran que el balance de energía de las hojas de estos árboles jóvenes se relaciona directamente con otras variables fisiológicas, lo que puede explicar las diferentes estrategias usadas por estas plantas contra el sobrecalentamiento ocasionado por las condiciones urbanas.

ABSTRACT

Urban trees are an important city component because of the environmental services they provide. However, urban constituents, such as streets, sidewalks and buildings have optical properties that, along with the high solar radiation, increases the environmental and leaf temperatures, affecting the development of the young trees. By the analysis of the energy balance of these young plants, we tested the effects of the short wave radiation albedo and the thermal radiation of three different substrates (soil, bark and asphalt), which were used as treatments to four different tree species, common as urban trees of the city of Mérida, Yucatán, México. Significant differences were found on maximum temperature and albedo percentage of the tested substrates, where asphalt had the highest surface temperature (55 ± 5 °C) and the bark the highest albedo percentage (15.5 ± 3.8). After applying the substrate treatments to the tree species, no differences were found among treatments, but there were differences for the species, mainly due to the leaf tilt angles. For instance, in a day with high radiation, *Caesalpinia mollis*, the species with the highest tilt angle from the horizontal ($58 \pm 21^\circ$), had an incoming net radiation of 816 ± 10 W m² (for the asphalt treatment) compared to the incoming net radiation of *Azadiractha indica* which was of 1148 ± 15 W m² (and a tilt angle of $25^\circ \pm 14$ in the same substrate). Because of this, *C. mollis* had a lower latent heat (678 ± 58 W m²) than *A. indica* (1063 ± 93 W m²). Consequently, *C. mollis* had a relative growth of 0.009 ± 0.002 mg g⁻¹ d¹ compared to 0.001 ± 0.003 mg g⁻¹ d¹, 0.007 ± 0.003 mg g⁻¹ d¹ and 0.008 ± 0.002 mg g⁻¹ d¹ of *A. indica*, *Brosimum alicastrum* and *Cordia dodecandra*, respectively (for the soil treatment). These results show that the leaf plants energy balance of these young trees is directly related to others physiological traits, and can help explaining the different plant's strategies against overheating induced by urban conditions.

INTRODUCCIÓN

Los árboles tienen un rol importante en el paisaje urbano, como componente ornamental para una vivienda o como componente de las áreas verdes para beneficio de una ciudad (Pérez, et al 2015). De hecho, el arbolado urbano y su conservación son elementos importantes para el desarrollo de una ciudad que apunta hacia la sustentabilidad. Esto porque los árboles contribuyen con servicios ambientales y beneficios a las poblaciones humanas de las ciudades como la captura del CO₂ (Pimienta Barrios et al., 2011), la producción de O₂, la sombra natural y la disminución de la temperatura generada por la actividad urbana y las construcciones (Pérez Medina & López Falfán, 2015; Shashua-Bar et al., 2009; Villanueva-Solis, 2017). Por esta razón el arbolado urbano ha sido motivo de estudio en cuestión de inventarios (Velasco Bautista et al., 2018), censos y diagnósticos en parques públicos para mejorar su manejo (Flores de la O et al., 2018). Tal es el caso de Mérida (Yucatán, México) donde se desarrolló un plan de infraestructura verde con varios ejes, que incluye documentos técnicos y un inventario del arbolado urbano de la ciudad de Mérida con su estudio diagnóstico en parques (Ayuntamiento de Mérida, 2018-2021). Otro ejemplo de estudio del arbolado urbano es la ciudad de Londres, que tiene inventariado cada árbol de la ciudad y cuenta con su ubicación en tiempo real en la web oficial de dicha ciudad (Mayor of London, 2020).

Durante 2017, mientras se realizó el inventario del arbolado urbano en la ciudad de Mérida, se reportó que un 56% de la superficie muestreada de la ciudad estaba cubierta de materiales impermeables como el cemento, el asfalto y las construcciones, un 15% representó al suelo (tierra) y un 5.1 % al césped (Ayuntamiento de Mérida, 2018-2021). Asimismo, el Ayuntamiento de Mérida 2018-2021 incluyó en el plan de infraestructura verde, una guía junto con una tabla de síntesis para plantación dirigida a los ciudadanos, donde se describen características como tipos de raíz, follaje, talla y tamaño de copa, para tomar en cuenta al momento de plantar un árbol tanto en la ciudad como en un domicilio. No obstante, no se conocen a la fecha estudios sobre el establecimiento de los árboles juveniles en parques de esta ciudad, y algunos estudios sobre la fisiología de árboles juveniles han sido realizados en jardín común (Luna Flores et al., 2012; Tamayo-Chim et al., 2012) pero con condiciones diferentes a las urbanas.

Así como en Mérida, gran parte de la superficie de las ciudades está cubierta por materiales que reflejan o absorben la radiación solar en grandes cantidades, estas condiciones a las que se someten los árboles en el paisaje urbano (camellones, aceras, calles asfaltadas, estacionamientos) pueden ser poco favorables para un árbol juvenil, disminuir la calidad de vida del árbol o incluso provocar su muerte. Por ello, estimar el balance de energía junto con el

crecimiento en árboles juveniles, podría ser de gran ayuda para la conservación del arbolado urbano recién plantado, seleccionando especies con características fisiológicas que respondan positivamente a dichas condiciones y que proporcionen distintos servicios ambientales una vez desarrollados, lo que contribuirá a mejorar la calidad del arbolado de la ciudad.

Los árboles juveniles poseen también propiedades biomecánicas que les ayudan a soportar diferentes fuerzas (gravitacionales o pandeos por el viento) tanto en sus hojas como en sus ramas y el tallo (Niklas, 1992). Así mismo, las especies pueden tener distintos tipos de estructuras internas en el tallo (van Casteren et al., 2012); las cuales podrían modificarse por cambios en la asignación de carbohidratos producto del exceso de energía incidente, consecuencia de las condiciones urbanas. De esta forma al estudiar una propiedad biomecánica como el módulo de elasticidad del tallo en una especie de árbol en su etapa juvenil, se podría evaluar que especie es más susceptible de modificar su crecimiento a consecuencia del estrés generado por las condiciones urbanas.

Este trabajo tuvo como objetivo analizar el balance de energía, la transpiración y el crecimiento de cuatro especies de árboles juveniles, en condiciones similares al ambiente urbano; es decir, expuestas a la radiación solar directa y estando rodeadas de superficies distintas al suelo natural, aplicadas como tratamiento, con propiedades ópticas distintas al sustrato natural. Las plantas se sometieron a estos distintos tratamientos por 48 días durante los meses de noviembre a diciembre del año 2020.

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES

1.1 BALANCE DE ENERGÍA

El balance de energía en una planta, específicamente en las hojas, se refiere a la suma de todos los flujos de radiación, transpiración o calor latente y las pérdidas por calor sensible (Schulze et al., 2019). Este balance involucra varios elementos en entradas y salidas ya que debe cumplir con la primera ley de la termodinámica, la cual dice que la energía no se crea ni se destruye, solo se transforma. Estudiar el balance de energía en las hojas es importante ya que son partes de la planta que están en contacto directo con los flujos de radiación solar y los cambios de temperatura del medio en el que se desarrolla (Oke 1988).

Las hojas son las partes de las plantas encargadas de realizar actividad fotosintética y recibir la luz proveniente del sol, pueden estar sometidas a varias fuentes de energía y de diferentes longitudes de onda que influyen en su temperatura y en su balance de energía (Nobel, 2009) (Figura 1.1). El rango de longitud de onda de la radiación que la hoja absorbe para su actividad fotosintética es la del espectro visible que va de 400 nm a 700 nm. Sin embargo, las hojas también reciben radiación solar en el espectro ultravioleta menor a 400 nm, e infrarrojo cercano que va de los 700 nm hasta los 1100 nm. Tanto la radiación ultravioleta como la infrarroja, tienen influencia en el aumento o disminución de la temperatura de la hoja. Los factores que principalmente afectan al balance de energía de una hoja son: entradas (irradiación solar absorbida, radiación infrarroja absorbida de alrededores), salidas (radiación infrarroja emitida, calor de conducción y convección y calor latente) y energía almacenada (fotosíntesis y actividad metabólica) (Figura 1.1), (Lambers et al., 2008; Nobel, 2009). La parte que corresponde a la energía almacenada (fotosíntesis y actividad metabólica) representa un 1% del balance de energía, por lo que puede no considerarse en este (Kume, 2017; Lambers et al., 2008). En resumen la temperatura de una hoja es el resultado de la radiación solar incidente, en su mayoría de onda corta, menos el calor sensible y menos la transpiración o calor latente (Kume, 2017).

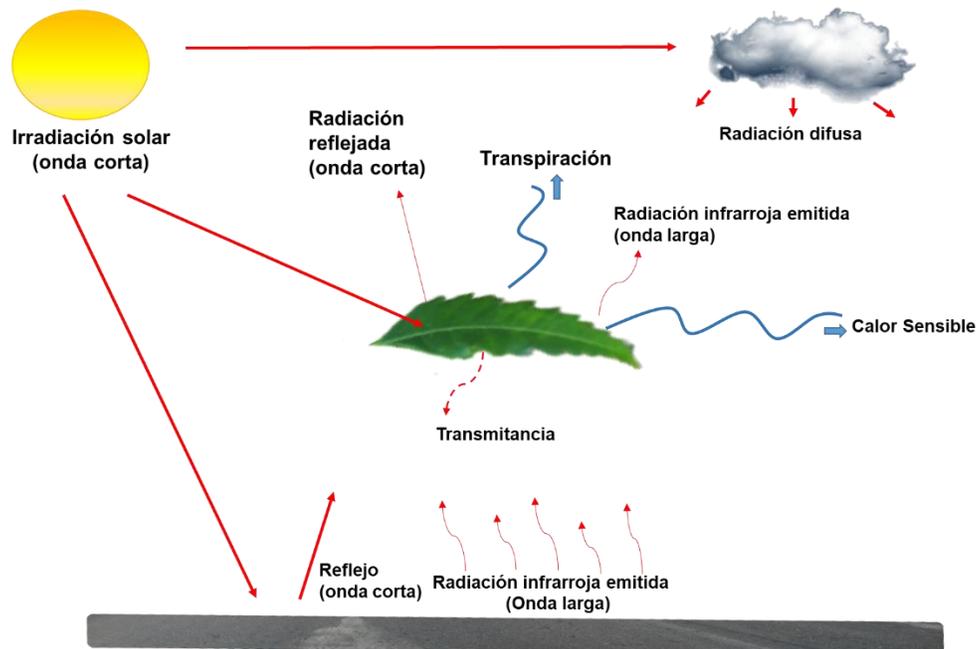


Figura 1.1. Componentes del balance de energía de una hoja, incluyendo las posibles superficies que la rodean. Las flechas solo indican las direcciones de los flujos (rojas indican radiaciones, azules indican calor latente y sensible) y no representan ninguna cantidad. (modificación de Lambers, et al 2008 y Nobel, et al 2009).

A continuación, se explica cada una de las partes a considerar en el balance de energía de una hoja (Lambers et al., 2008; Nobel, 2009):

Radiación solar incidente

Es la radiación proveniente del sol que puede afectar a una hoja, esta también puede ser reflejada por otros cuerpos de los alrededores (o la propia hoja) a lo que se le denomina reflexión o radiación reflejada. Del total de la radiación incidente, una hoja puede absorber entre 1-2% para su actividad fotosintética, otro porcentaje pasa a través de ella y lo demás se refleja de vuelta. Adicionalmente las distintas superficies terrestres reflejan un porcentaje de la radiación incidente, a lo que se le conoce como albedo. Estos flujos de energía de las superficies pueden afectar ambos lados de la hoja o solo uno, dependiendo de la posición de la hoja.

Radiación infrarroja absorbida

Todos los cuerpos u objetos con temperatura mayor a 0 K emiten radiación infrarroja, por lo tanto, los cuerpos u objetos de los alrededores de una hoja emiten radiación infrarroja (incluyendo el cielo), una fracción de esta radiación también es absorbida por ella. Se debe tomar en cuenta el

coeficiente de absorción del espectro infrarrojo en la hoja a la hora de estimar la radiación neta incidente, ya que es un elemento de la ecuación para estimarla.

Radiación infrarroja emitida

Es la emitida por la hoja, como se dijo anteriormente, todos los cuerpos emiten radiación infrarroja. Se debe tomar en cuenta el coeficiente de emisividad del cuerpo u objeto ya que no todos los cuerpos absorben o emiten la misma cantidad de infrarrojo. De acuerdo con la Ley de Kirchoff el coeficiente de emisividad puede ser igual al de absorción.

Calor de conducción/convección

También conocido como el calor sensible. Es el calor intercambiado entre la superficie de la hoja y el aire adyacente a la superficie foliar. Pueden existir dos casos: donde el calor se transfiere del interior de la hoja hacia el exterior, o donde el calor del exterior se transfiere a la hoja, por lo que puede ser positivo o negativo a la hora de estimar el balance. Puede ser convección forzada (por la velocidad del viento) o libre (movimiento por diferencias en la temperatura del aire).

Calor latente

Se usa para representar el flujo de vapor de agua o transpiración de la hoja. A través de la evaporación la hoja regula su temperatura durante el día, lo cual beneficia a la planta. Puede existir el caso en que la hoja (al amanecer o por la noche) tenga una temperatura menor que la del ambiente, donde ganaría calor debido al rocío o la escarcha (en noches húmedas). En la transpiración influye la apertura de estomas ya que se relaciona directamente con el intercambio de gases con el ambiente.

Capa Límite

Es la región inmediata de fluido (en este caso aire) que está en contacto con la hoja y en donde las concentraciones de gases (CO_2 , H_2O) temperatura y aire son modificados por la superficie foliar. El tamaño o grosor de la capa límite depende de la velocidad del viento y las dimensiones y forma de la superficie de la hoja.

1.2 RASGOS FISIOLÓGICOS RELACIONADOS CON EL BALANCE DE ENERGÍA

Estrés por alta temperatura

Para evitar un daño en la hoja, las plantas deben mantener un equilibrio entre los elementos del balance para no alcanzar temperaturas dañinas, incluso por períodos cortos de tiempo (Schulze

et al., 2019). Procesos como la fotosíntesis son muy sensibles al aumento de temperatura; a altas temperaturas la fijación del carbono disminuye y la fotorrespiración aumenta. Arriba de los 35°C se pueden detectar pequeñas reacciones de estrés en plantas, al aumentar a los 40°C se dan reacciones estresantes más notorias y a los 45°C puede ser letal (Bhatla & A. Lal, 2018).

Existe el estrés a corto plazo y a largo plazo. El estrés a largo plazo es una condición que se mantiene durante un mayor período de tiempo aunque con menor intensidad, a corto plazo se refiere a un aumento súbito pero momentáneo (Schulze et al., 2019). En este caso, el estrés sería provocado por la alta radiación solar en su mayoría de onda corta. Una planta expuesta a condiciones urbanas puede estar sometida a ambos casos; una condición estresante como estar cerca de una superficie que refleja una alta cantidad de radiación de onda corta durante un período corto del día o emite una alta cantidad de radiación infrarroja por un período mayor. En ambos casos existirá una respuesta de la planta que dependerá de la especie. Por lo que las condiciones urbanas sí podrían causar un efecto negativo en la fisiología, la fijación de carbono y por lo tanto en el desarrollo de una planta, esto debido al aumento en su temperatura foliar, consecuencia de las altas temperaturas ambientales ocasionadas por materiales como el asfalto (Ikechukwu, 2015), el cual retiene gran parte de la radiación solar de onda corta que recibe y por lo tanto aumenta su temperatura y se mantiene con alta por mucho tiempo, incluso durante las noches (Mohajerani et al., 2017), lo que podría derivar en un estrés a largo plazo en una planta cercana a una superficie como el asfalto.

Eficiencia cuántica máxima del fotosistema II

El análisis de la emisión de fluorescencia de la clorofila *a* del fotosistema II del aparato fotosintético de las plantas hace posible caracterizar tipos de estrés ambiental como el ocasionado por la temperatura del ambiente (González Moreno et al., 2008). La exposición a altas temperaturas por períodos largos de tiempo puede causar daños celulares irreversibles en los cloroplastos de las hojas (Hu et al., 2020; Murchie & Lawson, 2013). Como consecuencia, la asimilación del carbono para la planta disminuye y por lo tanto puede ser un factor limitante para el crecimiento. En climas tropicales, el estrés por altas temperaturas es un factor limitante en los cultivos (Hu et al., 2020), aunque no hay reportes con respecto al arbolado urbano aún. Con las mediciones y datos del rendimiento del fotosistema II (yield), eficiencia cuántica máxima (F_v/F_m) y el NPQ (disipación no fotoquímica de la energía) se puede tener un indicador de posible daño a las hojas causado por altas temperaturas (Gamon & Pearcy, 1990; Hu et al., 2020; Maxwell & Johnson, 2000).

Transpiración

El intercambio de agua por el gradiente de presión de vapor que existe entre el agua del interior de la hoja y la humedad del ambiente se conoce como la transpiración de una planta (Schulze et al., 2019). Eso sucede en los espacios intercelulares conocidos como estomas y este intercambio se logra mediante difusión. La disponibilidad del agua en el sustrato y las condiciones climáticas como la cantidad de radiación solar incidente y el déficit de presión de vapor de agua atmosférico son factores que pueden controlar la apertura de estomas (Jones, 2014). La transpiración puede aumentar al grado de que la hoja tenga una menor temperatura que el ambiente (Nobel, 2009), aunque esto ocurriría siempre y cuando exista una alta disponibilidad de agua en el sustrato. Una poca disponibilidad de agua ocasionaría que la transpiración exceda el agua absorbida por las raíces y causar un estrés hídrico cuyos efectos pueden ser disminución en el crecimiento de la planta (Luna Flores et al., 2012).

Por último, la transpiración también puede disminuir cuando aumenta el déficit de presión de vapor en el ambiente, previniendo una transpiración alta y una mayor pérdida de agua, por ejemplo esta disminución es más sensible en plantas caducifolias o de climas templados (Jones, 2014).

1.3 SUPERFICIES URBANAS Y SU EFECTO EN EL BALANCE DE ENERGÍA

La isla calórica es un fenómeno causado por el cambio de uso de suelo de la superficie terrestre a causa del desarrollo urbano, dichos cambios aumentan la retención de radiación solar incidente y ocasionan un aumento de temperatura en comparación con zonas aledañas (Ballinas & Barradas, 2016). Los materiales usados comúnmente en las ciudades como el asfalto y el concreto tienen propiedades físicas y ópticas muy distintas a las del suelo natural, como son la capacidad calórica y el porcentaje de albedo (Ikechukwu, 2015; Mohajerani et al., 2017). Además de que son impermeables, superficies claras como el concreto redirigen la radiación en mayor cantidad hacia otros objetos por sus diferentes propiedades de emisividad y porcentaje de albedo. Superficies oscuras como el asfalto retienen más tiempo el calor por su bajo albedo (Mohajerani et al., 2017; Sen & Roesler, 2019). Tales características ocasionan un cambio en el balance de energía del área y concentran el calor en las zonas con más urbanización (Ikechukwu, 2015; Oke, 1988). Si además existe una pequeña cantidad de árboles, también disminuye la disipación del calor por evapotranspiración en el medio urbano (Shashua-Bar et al., 2009).

Adicionado a lo anterior, no darle el espacio adecuado a un árbol puede llevar a limitar la intercepción o captación de agua en el suelo (Figura 1.2) y si la disponibilidad de agua es baja y

supera la transpiración del árbol debido a la alteración del balance de energía tanto de sus hojas como de su ambiente, puede ocasionar un estrés hídrico, teniendo consecuencias sobre el crecimiento (Luna Flores et al., 2012).



Figura 1.2. En el centro se observa un pequeño árbol en una poceta, ejemplo de las condiciones extremas de crecimiento de árboles urbanos en un nuevo fraccionamiento del Norte de la ciudad de Mérida, Yucatán.

En Mérida se han reportado altas temperaturas en zonas con mayor urbanización, donde existen más superficies de concreto y asfalto; además de que las menores temperaturas en la ciudad se reportan donde hay más áreas verdes (Cerón-Palma et al., 2013). El modelo de vivienda unifamiliar y la ausencia de una normatividad clara ocasionan que no se cumpla con los 9 m² de área verde mínima por habitante que establece la OMS (Pérez Medina & López Falfán, 2015). Además, de acuerdo al inventario de arbolado urbano de Mérida del Ayuntamiento 2018-2021, 56% de las superficies muestreadas están compuestas de cemento (21%), asfalto (18%) y edificios (17%).

1.4 CRECIMIENTO Y ASIGNACIÓN DE BIOMASA VEGETAL

El análisis del crecimiento de una planta puede mostrar una perspectiva de cómo se desarrolla en su ambiente (Lambers et al., 2008) y si este podría ser estresante para ella. Las especies muestran respuestas específicas en el crecimiento ante condiciones como sequía, alta demanda de evaporación o alta radiación solar (Tamayo-Chim et al., 2012), variables que se relacionan

directamente con los componentes del balance de energía (radiación neta y transpiración), por lo que condiciones urbanas con alta radiación y alta temperatura ambiental podrían influir en el crecimiento y la asignación de la biomasa a los componentes de una planta (hojas, tallo, raíz). Por ejemplo, plantas que crecen en la sombra responden asignando mayor biomasa a los órganos fotosintéticos, mientras que las plantas que crecen con alta disponibilidad de luz presentan mayor asignación de biomasa a las raíces (Poorter, 2001). Por lo anterior, el área foliar y la asimilación neta son variables usadas como indicadores para el crecimiento vegetal en distintas condiciones (García Castro et al., 2018; Tamayo-Chim et al., 2012), en este caso sería las condiciones urbanas.

El área foliar específica (SLA, por sus siglas en inglés), es la cantidad de área foliar (LA, siglas en inglés) por unidad de masa total de la planta (LW, siglas en inglés) y la asimilación neta (EA, siglas en inglés) es la tasa de incremento de biomasa por unidad de área foliar, asimismo estas variables son base para estimar la tasa relativa de crecimiento (RGR, siglas en inglés), la cual puede explicarse como la tasa de incremento de biomasa en la planta por unidad de biomasa y tiempo (García Castro et al., 2018). Finalmente, la razón de área foliar (LAR, siglas en inglés) es el resultado de la multiplicación del área foliar específica (LA/LW , siglas en inglés) por la razón de biomasa foliar con la biomasa total (Lw/W , siglas en inglés).

1.5 PROPIEDADES BIOMECÁNICAS DE LAS PLANTAS

Las plantas en general han sido sometidas a cargas dinámicas como la gravedad y la presión del viento a lo largo de su historia evolutiva (Niklas, 1992). Un árbol juvenil estará sometido a fuerzas de pandeo o de doblez porque los tallos y ramas se prolongan más allá de su punto de apoyo. Los tallos de las plantas están compuestos de distintas células y tejidos que les confieren propiedades mecánicas tales como el módulo de elasticidad o de flexión (Sorieu et al., 2016). El módulo de elasticidad o de flexión es el intervalo de fuerza aplicado a un material sin que este sufra una deformación permanente (Shah et al., 2017). Entonces, el módulo de elasticidad de un tallo muestra la combinación de sus propiedades y su contribución a la resistencia a una deformación, ya que la teoría de la elasticidad explica cómo se deforma un material por la aplicación de una presión. En el caso de las plantas, el colénquima y el esclerénquima son las principales estructuras de soporte ante las fuerzas de tensión y pandeo (Shah et al., 2017; van Casteren et al., 2012). Los tallos pueden considerarse como estructuras compuestas con fibras de esclerénquima en una matriz de células de parénquima y a su vez estas fibras sean un compuesto de capas múltiples de celulosa, por lo que los tallos pueden ser analizados como si fueran un material compuesto de fibras laminadas (Shah et al., 2017)

También los tallos pueden tener diferentes densidades de sus tejidos siendo los tallos menos densos más flexibles y los más densos menos flexibles. Lo anterior se puede relacionar con las condiciones ambientales de su crecimiento, siendo los tallos de plantas sombreadas los de menor densidad y los expuestos a mayores cantidades de luz tener mayor densidad (Shah et al., 2017). Si las plantas están expuestas a condiciones estresantes, anteriormente se ha explicado que se podría modificar su crecimiento, por lo que condiciones urbanas con altas temperaturas sí podrían tener influencia en las propiedades biomecánicas de las plantas.

Prueba de flexión a tres puntos

La prueba de flexión a tres puntos se utiliza para determinar las propiedades mecánicas de un material sometido a fuerzas que flexionan. Esta es la prueba mecánica más común aplicada a los tallos para estimar el módulo de elasticidad, donde la deformación está caracterizada por un solo punto de desplazamiento ubicado en el punto medio de la muestra, donde se encuentra el punto máximo de pandeo (Shah et al., 2017). La muestra de tallo se asienta entre dos soportes y va a estar sometida a una carga o fuerza en la parte media hasta el punto de ruptura. Esta prueba se puede aplicar en muestras con longitudes de algunos milímetros o de varios metros. Es importante que la muestra sea lo suficientemente homogénea para que no exista una sobreestimación del valor del módulo de elasticidad al momento de la prueba; en resumen, mientras más recta y homogénea sea la muestra, mejores serán los resultados obtenidos ya que estas pruebas están diseñadas para materiales isotrópicos (por ejemplo un lápiz).

Los estándares para mediciones en maderas consideran una proporción de largo/grueso de 20 como mínimo para los tallos sólidos no huecos (Shah et al., 2017; van Casteren et al., 2012). El largo se considera la distancia que habrá entre los soportes de la máquina de pruebas y el grueso es un diámetro o grosor representativo de la sección de tallo, es decir, si se tiene un diámetro de 1 cm, el largo debe ser de al menos 20 cm. Esta proporción es importante para no sobreestimar la elasticidad. También se debe considerar que la parte media donde se aplicará la fuerza no sea un nodo, ya que puede cambiar el valor de las mediciones. Por último, debe considerarse que el contrapeso de la máquina no sea con un borde afilado, ya que también podría alterar las mediciones.

1.6 ESPECIES SELECCIONADAS

Se seleccionaron cuatro especies de árboles juveniles con base en la revisión del libro Árboles recomendables para las calles de las ciudades de la península de Yucatán (Orellana et al., 2007)

con 41 especies mencionadas, el Álbum informativo de árboles y palmas del ayuntamiento de Mérida y el Inventario de arbolado urbano de Mérida (134 especies), estos dos últimos publicados por el Ayuntamiento de Mérida 2018-2021 en su plan de infraestructura verde. Tres especies son nativas y una es exótica.

Los criterios para seleccionar las especies fueron los distintos tamaños de las hojas y en el caso de las hojas compuestas, los tamaños de los folíolos, siendo características directamente relacionadas con los elementos del balance de energía (calor latente, calor sensible). Para la estimación del balance de energía se tomó como hoja a un folíolo de las hojas compuestas, debido a que cumple con las características de una hoja para fines de cálculos para el balance. Además, cada especie proporciona distintos servicios ambientales en su etapa adulta, si bien no se evaluaron individuos adultos, se tomó en cuenta el potencial de cada especie como elemento del arbolado urbano para una ciudad tropical como Mérida. Con respecto a la especie exótica, además de los criterios anteriores, se seleccionó para compararla con las nativas y si las condiciones urbanas la afectarían de la misma forma.

Azadirachta indica. A Juss. Familia: Meliaceae. Nombre común en Yucatán: nim o neem (Figura 1.3). Árbol comúnmente de alrededor de 10 m de altura, el diámetro a la altura del pecho llega hasta 40 cm. La especie es perennifolia, se adapta y crece bien en zonas de clima tropical y subtropical. Las hojuelas son pecioladas de forma aserrada y de alrededor de 7 a 10 cm de largo, y ancho de 3 a 4 cm; cuando son jóvenes (retoños) son de color rojo cobrizo, al madurar cambian a verde oscuro. Las hojas se agrupan en folíolos de 35 cm de largo, con una separación entre hojas de 3 a 4 cm. Los árboles jóvenes son susceptibles a las heladas, pero los árboles maduros pueden soportarlas, también es tolerante a las sequías (Cruz Fernandez & Sánchez, 2004). Los frutos, flores, hojas, y corteza poseen propiedades insecticidas por la presencia de dos alcaloides, paraisina y azadiractina; productos que se han estado utilizando para el control de plagas. El tipo de raíz es somera ramificada. Es originaria del sur y del este de Asia, se encuentra cultivada en algunas regiones tropicales y subtropicales de México, también en Centroamérica y las Antillas. Es utilizada como planta de sombra y ornato en parques.

Brosimum alicastrum Sw Familia: Moraceae Nombre común en Yucatán: ramón (Figura 1.3). Árbol perennifolio de porte mediano a grande, crece de 12 a 20 metros de altura con un diámetro a la altura del pecho de hasta 1 metro. El tronco es derecho, contrafuerte con ramas ascendentes y después colgantes. Presenta una copa piramidal y densa. La corteza externa es lisa en árboles jóvenes y en adultos es áspera, frecuentemente escamosa en piezas grandes, de color gris clara a parda (Morales Ortiz & Herrera Tuz, 2009b). La corteza interna es de color crema amarillenta,

de fibrosa a granulosa. Las hojas son alternas simples de color verde oscuro y brillante en el haz y verde grisáceas en el envés, láminas de 4 a 18 cm de largo por 2 a 7.5cm de ancho, ovado-lanceoladas a ovadas o elípticas. La madera tiene albura de color crema amarillenta. Cuando se le hacen incisiones produce un látex pegajoso. El tipo de raíz es pivotante profunda. En Yucatán es apreciado por ser un árbol forrajero, las hojas son digeribles y contienen un 13% de proteína. Se usa como árbol de ornato para producir sombra. Además, prospera en los suelos del norte de Yucatán. Con respecto a su crecimiento, necesita de alta disponibilidad de agua cuando está en sus primeras etapas de crecimiento (primeros 2 años), ya que sus raíces necesitan profundizar el suelo pedregoso de la península de Yucatán (Hernández-González et al., 2014). Originaria de América tropical, su extensión va desde el sur de México a través de Centroamérica hasta Colombia, Perú y Venezuela y en las Islas del Caribe: Cuba, Jamaica y Trinidad. Su distribución natural en Yucatán va desde la parte central hasta la parte sur y oriente, forma parte de la selva baja subcaducifolia y selva mediana subcaducifolia.

Cordia dodecandra DC. Familia: Cordiaceae. Nombre común en Yucatán: ciricote (Figura 1.3) Árbol caducifolio en época de sequía, de porte mediano, crece de 8 a 12 metros de altura, con un diámetro a la altura del pecho de 40 a 60 centímetros (Morales Ortiz & Herrera Tuz, 2009a). El tronco es derecho, cilíndrico y con ramas ascendentes. Es importante en la composición florística en las selvas bajas y medianas. Presenta una copa redondeada muy densa y redondeada en árboles jóvenes, menos densa en árboles maduros. Su corteza externa es fisurada. Tiene hojas simples de color verde oscuro en el haz y verde pálido en el envés, son de superficie muy áspera pecioladas y alternas, elíptico-oblongas a amplio-obovadas (3-8 cm de ancho, 7-15 cm de longitud). Están dispuestas en espiral aglomeradas en las puntas de las ramas. La madera es dura y de albura color amarillento y duramen color café oscuro. Es de crecimiento relativamente lento. Su raíz es pivotante ramificada. En Yucatán es un árbol de usos múltiples, apreciado por la dureza y durabilidad de su madera. Se encontraba distribuido en todo el estado ya que formaba parte de la selva baja caducifolia, subcaducifolia y mediana subcaducifolia pero la sobreexplotación redujo los ejemplares silvestres. Su distribución en América va desde el sureste de México hasta el Norte de Guatemala. Actualmente se pueden encontrar como árboles de ornato en parques, áreas verdes y camellones de la ciudad, así como en los patios de las casas.

Caesalpinia mollis (Kunth) Spreng. Familia: Fabaceae. Nombre común en Yucatán: chacté (Figura 1.3). Es una especie caducifolia en época de sequía con altura de hasta 15 m y diámetros de hasta 55 cm. Posee hojas bipinnadas de entre 20 y 30 cm de largo con 2 a 3 pinnas ovadas

de 12 a 16 foliolos cada una. Cada foliolo mide entre 3 cm y 4.5 cm de largo y 1.2 a 2 cm de ancho. Posee inflorescencias, las flores son amarillas de 0.8 cm a 1 cm. Es una especie maderable y se emplea comúnmente en la elaboración de postes para viviendas. La albura es de color crema y el duramen de color café oscuro. Su distribución es discontinua, se encuentra en Venezuela y México, en este último solamente en la península de Yucatán. Se encuentra principalmente en selva bajas y medianas subcaducifolias y a veces en medianas subperennifolias. Su polinización es por abejas y es conocida como melífera, tiene flores entre abril y mayo. Presenta un crecimiento del diámetro de unos 0.13 cm al año. El tipo de raíz es pivotante ramificada.

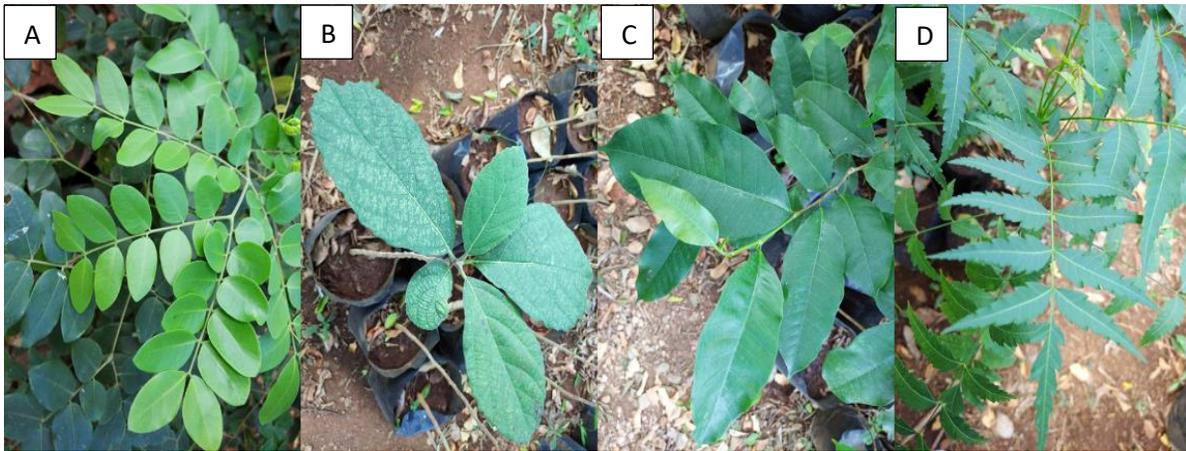


Figura 1.3. Las 4 especies elegidas: A) *Caesalpinia mollis* (Kunth) Spreng, B) *Cordia dodecandra* DC, C) *Brosimum alicastrum* Sw, D) *Azadirachta indica* A Juss.

Características de los árboles juveniles

No hay estudios de árboles en etapa juvenil en el arbolado urbano y menos en climas tropicales, solo hay estudios de la fisiología en plántulas en climas tropicales (Dzib-castillo et al., 2012; Montero Solís et al., 2011; Tzuc et al., 2019), sin embargo estos no se hicieron en el arbolado urbano. Los árboles juveniles se encuentran en una etapa de desarrollo en la cual poseen pocas hojas y en algunas especies, esas hojas no están desarrolladas por completo. El sistema radicular está poco desarrollado y por consiguiente su acceso al agua del suelo es limitado (Luna Flores et al., 2012) por lo que pueden ser más susceptibles a un estrés hídrico. La radiación solar también es un factor que afecta a las plantas en crecimiento, tanto la ausencia como el exceso pueden generar cambios morfológicos en las hojas (Yam-Chin et al., 2014).

JUSTIFICACIÓN

No existen estudios acerca de cómo el tipo de superficies que rodean a un árbol juvenil en el medio urbano afectan a su fisiología en las ciudades tropicales. Sólo existen estudios del aumento de temperatura a causa de las islas de calor (Villanueva-Solis, 2017) y diferencias de temperatura entre zonas con sombra de árboles y zonas sin sombra de árboles (Shashua-Bar et al., 2009). La gran cantidad de radiación solar que absorben o reflejan tales superficies urbanas podría generar condiciones de estrés a los árboles recién trasplantados, algo que además podría afectar su crecimiento en especial en una ciudad tropical como Mérida, debido a las altas temperaturas que se registran en el ambiente a lo largo del año y las marcadas épocas de sequía.

Además, no solamente en un espacio público, también en el espacio de una vivienda (como el jardín o el patio) pueden encontrarse las superficies urbanas y si su influencia llegara a ser negativa para las especies, sería importante tomarlo en cuenta para conservar un arbolado urbano en buenas condiciones, ya que además de mantener los árboles existentes, también se deben tomar en cuenta los individuos que conformarán parte del futuro arbolado, todo lo anterior para el beneficio de los habitantes de una ciudad.

Es por ello que se propone estudiar a los árboles en su etapa temprana o juvenil, ya que en esta etapa aún no han desarrollado un sistema radicular extenso ni profundo y su acceso al agua del suelo es limitado. Estas limitaciones pueden condicionar el establecimiento de los individuos, ocasionar un crecimiento más lento o causarles la muerte. Al aumentar la temperatura de sus hojas pueden aumentar la transpiración y por ende utilizan más agua, lo cual puede ser diferente entre especies debido, en parte, a los diferentes tamaños de las hojas. Por esta razón, un estudio del balance de energía en momentos de alta radiación solar podría dar una idea de las respuestas de distintas especies a las altas temperaturas de una ciudad.

Por otra parte, el estudio de alguna de las propiedades biomecánicas como el módulo de elasticidad, puede ser de utilidad para observar alguna modificación en el crecimiento y asignación de biomasa, en este caso, de un tallo de un árbol juvenil sometido a un estrés por alta temperatura, y sí por causa de dicho estrés los individuos se volverán más frágiles a posibles daños físicos.

PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

¿De cuatro especies seleccionadas del arbolado urbano, cuál tendrá una mayor transpiración y cuál transpirará menos, tomando en cuenta el tamaño y la forma de la hoja?

¿De las especies seleccionadas, cuál se verá menos afectada en su balance de energía foliar por la influencia de la radiación reflejada y la energía emitida por algunas superficies presentes en el medio urbano?

Al verse afectado de forma negativo el balance de energía de las hojas de las plantas por las condiciones urbanas ¿Alguna especie de las seleccionadas modificará su crecimiento y asignación de biomasa y por consiguiente también sus propiedades biomecánicas del tallo?

HIPÓTESIS

Hipótesis 1

Debido al exceso de temperatura ocasionado por la radiación infrarroja emitida y la reflejada por ciertas superficies urbanas, las especies de hoja grande como *Cordia dodecandra* y *Brosimum alicastrum* sufrirán un efecto negativo en su fisiología por mayor transpiración y un menor crecimiento, que las especies de hoja pequeña (*Azadirachta Indica* y *Casesalpinia Mollis*).

Hipótesis 2

Debido a la disminución y modificación del crecimiento y asignación de la biomasa a los componentes de los individuos sometidos a exceso de temperatura ocasionada por la radiación emitida y la reflejada de superficies urbanas, las propiedades biomecánicas, como el módulo de elasticidad del tallo, disminuirá en las especies de hoja grande expuestas a la superficie que retenga mayor temperatura, haciendo más débiles a los individuos.

OBJETIVOS

Objetivo General

Analizar la respuesta en los componentes del balance de energía foliar (radiación neta, capa límite, calor latente y calor sensible) y en los rasgos fisiológicos relacionados (transpiración, crecimiento y eficiencia cuántica máxima del fotosistema II), de árboles juveniles de cuatro especies durante los momentos de mayor radiación solar en el día y expuestos a tres superficies urbanas diferentes.

Objetivos específicos

-Caracterizar varias superficies que están presentes en el medio urbano, mediante la estimación del albedo y la temperatura máxima que alcanzan en el punto de mayor radiación solar del día,

para después seleccionar tres de ellas y utilizarlas como tratamientos en un experimento con una selección de cuatro especies de árboles juveniles presentes en el arbolado urbano.

-Caracterizar y estimar los componentes del balance de energía de cuatro especies de árboles juveniles del arbolado urbano expuestas a los tratamientos antes mencionados.

-Cuantificar la biomasa vegetal de las cuatro especies en sus tres componentes (hojas, tallo y raíz) en dos momentos del experimento, al día 0 y al 48 después de estar expuestas a los tratamientos antes mencionados.

-Estimar el módulo de elasticidad de cada especie mediante la prueba de flexión a tres puntos, antes y después de estar expuestas a los tratamientos para observar si tuvieron una modificación en la propiedad biomecánica a causa de las condiciones urbanas.

CAPITULO II

2.1 INTRODUCCIÓN

Las superficies características de un medio urbano poseen propiedades ópticas que ocasionan que la radiación solar incidente pueda reflejarse hacia otros cuerpos y calentarlos, o retener la energía de tal radiación y aumentar la temperatura de un sitio en el cual pudieran estar árboles de distintas especies. Además, elementos decorativos o complementarios de jardines como la gravilla, roca volcánica o cortezas trituradas de árboles pudieran afectar negativamente a las plantas si se toma en cuenta que tienen propiedades ópticas distintas al suelo natural. Como se explicó anteriormente, las altas temperaturas y reflejos de radiación podrían generar condiciones estresantes que afecten el balance de energía de las hojas de una planta o árbol juvenil, debido a que deben compensar toda la radiación neta recibida para no dañarse y no comprometer su desarrollo. Incluso el estrés podría ser a largo plazo, ya que las altas temperaturas en superficies oscuras como el asfalto, se mantienen más allá de las horas de radiación solar directa.

Estudiar el balance de energía en las hojas de los individuos resultaría importante para el arbolado urbano ya que los estudios acerca del arbolado urbano se limitan a los aspectos de islas de calor (Ballinas & Barradas, 2016; Flores de la O et al., 2018; Su et al., 2020; Villanueva-Solis, 2017), pero no existen estudios del balance de energía en árboles urbanos. En una ciudad tropical como Mérida, resultaría importante el estudio del balance de energía en hojas de árboles juveniles, debido a las altas temperaturas que se suelen alcanzar durante el verano como consecuencia de la urbanización (Cerón-Palma et al., 2013).

2.2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.2.1 SUPERFICIES SELECCIONADAS COMO TRATAMIENTOS

Selección preliminar

Se realizaron pruebas preliminares con distintas superficies para después seleccionar tres de ellas. Las superficies probadas fueron seis: roca volcánica roja y negra, corteza de árbol negra y roja, asfalto y suelo natural (tierra). Las pruebas consistieron en exponer cada superficie a la radiación solar en el sitio donde se realizaría el experimento. Durante dos semanas se monitoreó cada una con instrumentos manuales (termómetro infrarrojo y piranómetro) y se tomaron imágenes térmicas con una cámara infrarroja (Figura 2.1) de cada superficie al mediodía, descartando días nublados. No se realizó ningún análisis estadístico, únicamente se hizo la

selección con base en el análisis de las imágenes térmicas. Finalmente se seleccionaron tres superficies:

Asfalto: Tiene gran presencia en el medio urbano por su uso para infraestructura vehicular. En el experimento preliminar, el asfalto resultó con la mayor temperatura máxima promedio registrada (51.6 °C) en un día con alta radiación (991 W m², 13:00 pm) y temperatura ambiental de 37.7 °C. Su albedo es bajo (3%). A pesar de ser rocoso, no presenta espacios aéreos debido a la combinación con el compuesto pétreo que le da el color negro (Figura 2.1).

Suelo: Es usado como sustrato tanto en parques y jardines como en camellones y pocetas. Tuvo un albedo del 11.9 % y registró una temperatura máxima promedio de 48.5 °C (991 W m², 13:00 pm) en la medición preliminar. No tiene espacios aéreos por su textura polvosa (Figura 2.1). El tipo de suelo que se utilizó es conocido como ek lu'um o tierra café, clasificado como rendzina.

Corteza de árbol o corteza tezontle: Es utilizada como sustrato ornamental en áreas verdes y jardines particulares. Se puede adquirir a granel en tiendas de jardinería. Es de color rojo, fue seleccionada por tener un porcentaje de albedo mayor a la tierra y al asfalto (16%) (Figura 2.2) en las mediciones preliminares (1167 W m², 13:00 pm).

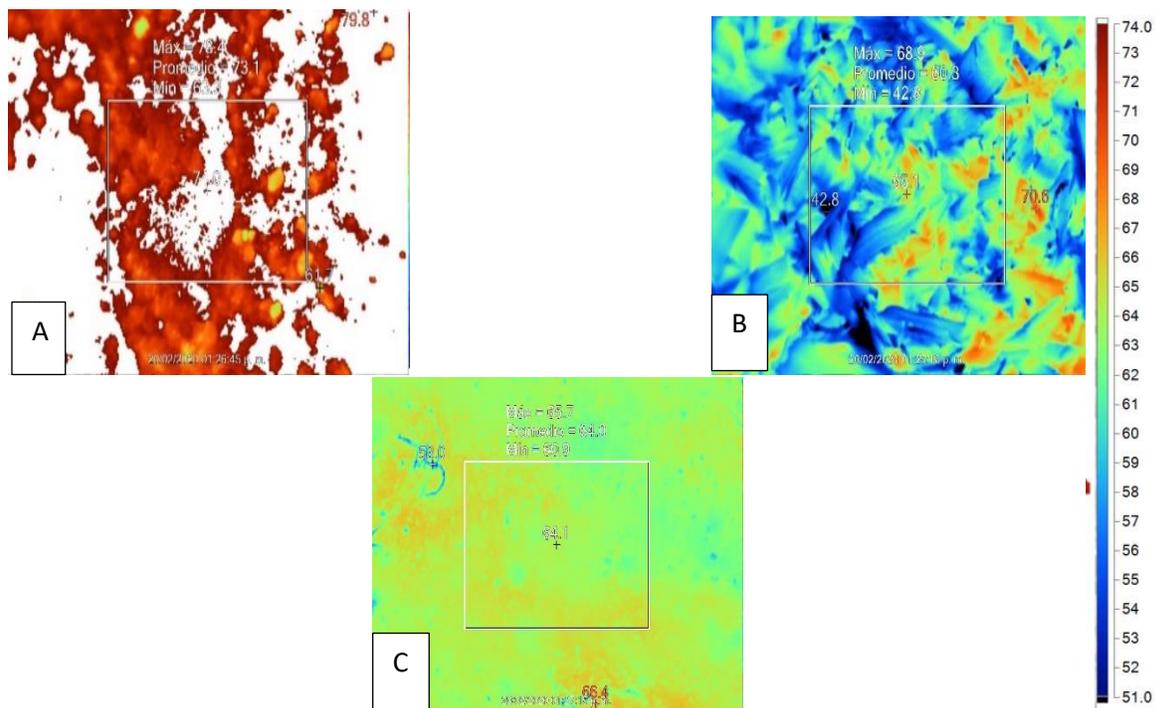


Figura 2.1. Imágenes térmicas de una sección de cada superficie en pruebas preliminares, tomadas a la misma hora (13:30 p.m.) con una cámara Fluke Ti-400, donde se observan las diferentes temperaturas de los sustratos. A) Asfalto. B) Corteza roja. C) Suelo (tierra café). El registro máximo de temperatura promedio lo obtuvo el asfalto (A) con 51.6 °C, seguido del suelo (B) 48.7 °C y la corteza (C) 42.6 °C, promedios tomados por la cámara.

Caracterización para el experimento

Para el experimento donde ya se utilizaron las cuatro especies y las tres superficies seleccionadas como tratamientos, se tomaron mediciones en 6 días soleados: 26 y 27 de noviembre, 01, 02, 03 y 10 de diciembre para el albedo de las superficies, 25 y 27 de noviembre, 02, 03, 04 y 10 de diciembre para la temperatura de las superficies. La hora para las mediciones fue entre las 11:30 a.m. y 12:00 p.m. Estas mediciones se tomaron directamente con instrumentos manuales (piranómetro y sensor de cuantos) en las superficies con el experimento ya armado.

2.2.3 CARACTERIZACIÓN DE LA RADIACIÓN INCIDENTE Y MICROAMBIENTE

Para obtener datos del microambiente del área del experimento, se instaló una estación meteorológica portátil (Onset HOBO, modelo H21-001 marca Onset Computer Corporation, Bourne, MA) con sensor de temperatura y humedad del aire (modelo S-THB-M002, marca Onset Computer Corporation), sensor de cuantos (modelo S-LIA-M003 marca Onset Computer Corporation), piranómetro (modelo S-LIB-M003 marca Onset Computer Corporation), sensor de velocidad y dirección de viento (modelo S-WCA-M003, Onset Computer Corporation) instalado a un metro de altura con respecto al piso del sitio y un pluviómetro (modelo S-RGB-M002, marca Onset Computer Corporation) también instalado a un metro de altura. Sólo se instaló una estación para el sitio.

Cada uno de los sensores de la estación meteorológica estuvo programado para la captura de datos cada 10 segundos y realizar el promedio cada 10 min, del 3 de noviembre al 14 de diciembre. Para la medición de la temperatura foliar se instalaron termopares (tipo T, marca Omega) en una hoja en 36 individuos diferentes. Los termopares se conectaron a otro registrador (modelo CR1000, marca Campbell Scientific, Logan, UT) programado de la misma forma que el anterior. Así mismo, se utilizaron instrumentos manuales como un sensor de cuantos (modelo LI-250A, marca LI-COR, Lincoln, NE), un piranómetro (modelo LI-189, marca LI-COR) y un termómetro infrarrojo (modelo 62 mini, marca FLUKE, Everett, WA), estos instrumentos manuales se utilizaron para las mediciones en las superficies usadas como tratamiento de la sección 2.2.2 y para corroborar las mediciones de los sensores automatizados.

Para que la información fuera representativa, se analizó gráficamente el flujo de fotones totales diarios ($\mu\text{mol m}^{-2}$), radiación incidente en W m^{-2} , temperatura ambiente en $^{\circ}\text{C}$ y porcentaje de humedad relativa del aire (%). Se hizo una selección de los días más soleados, de acuerdo con la sumatoria total de micromoles de fotones por día. Tal sumatoria se multiplicó por 600 (60 segundos de cada intervalo de 10 minutos registrados por la estación) y se convirtió a moles.

2.2.4 DISEÑO EXPERIMENTAL

Para evaluar los efectos que podrían ocasionar las superficies urbanas en los árboles juveniles y sus aspectos fisiológicos antes mencionados (transpiración, balance de energía y crecimiento) se realizó un experimento con una duración de 6 semanas (03 noviembre-14 de diciembre). El experimento consistió en colocar 60 individuos de las cuatro especies seleccionadas, en tres superficies utilizadas como tratamientos, teniendo cada individuo su bolsa con suelo (tierra).

El sitio del experimento fue un techo de la Unidad de Recursos Naturales del Centro de Investigación Científica de Yucatán A.C, elegido por las condiciones de luz solar que mantiene durante el día, además de tener poca sombra de grandes objetos y otros árboles y tener el espacio y acceso suficiente para colocar los tratamientos y realizar las mediciones.

Las plantas se aclimataron 4 semanas antes de tomar las primeras mediciones. Ingresaron al CICY el 28 de septiembre y el experimento comenzó el 28 de octubre. Existieron retrasos en la realización del experimento por el ambiente nublado resultado de las tormentas tropicales que afectaron a la ciudad, en este caso Gamma y Delta, además de ciertas restricciones por los nuevos protocolos sanitarios.

Se adquirieron 15 plantas por cada especie, las cuales se distribuyeron en cinco cajas que contenían como base a las superficies (Figura 2.2) y (Figura 2.3). Cada caja tuvo unas dimensiones de 1.25 m de ancho por 2.50 m de largo, se dividieron en tres secciones iguales donde cada sección tenía un tratamiento y una planta por especie. Cada tratamiento consistió en una extensión de 3 cm de grosor de las superficies seleccionadas anteriormente, con lo que se cubrió completamente el fondo de la sección que le correspondía en cada caja, posteriormente se colocó un individuo de cada especie en orden aleatorio sobre cada tratamiento, es decir cuatro individuos por tratamiento. El tamaño aproximado de las plantas fue de 60 a 70 cm de altura, rango de tamaño tomado de la guía para plantación de árboles para la ciudad de Mérida (Ayuntamiento de Mérida, 2018-2021); independientemente de la edad de cada especie, en este caso se estableció un rango de altura para todas ya que no había suficientes ejemplares exactamente del mismo tamaño. Los tamaños y biomasa iniciales se presentan en la sección 2.4.3.

Cada individuo estaba contenido en una bolsa de plástico de polietileno negro, todos con el mismo sustrato (ek lu'um o rendzina). Las bolsas de *Azadirachta indica* y de *Brosimum alicastrum* tenían 6 kg de capacidad, mientras que las de *Cordia dodecandra* y las de *Caesalpinia mollis* tenían 9 kg. Finalmente, las bolsas de las plantas se cubrieron con un nylon para minimizar cualquier

cantidad de agua que ingrese del exterior y únicamente ingrese agua de riego. Se estableció un ciclo de riego para evitar interferencia con las mediciones, lo que se explicará en la sección 2.2.5.

La distancia de separación entre plantas fue de 20 cm, solo para que la copa de cada individuo no afecte a las hojas monitoreadas por los termopares. Adicionalmente se colocó un perímetro de sustrato de corteza tezontle alrededor del área total de las cajas para minimizar en lo posible el efecto del concreto del techo. El registrador de los termopares y la estación meteorológica fueron colocados como se muestra en la Figura 2.2.



Figura 2.2. Estructura final de las cajas con las plantas de las cuatro especies sobre los tres tratamientos en el sitio del experimento

El anemómetro fue colocado a 1 m de altura para obtener un dato más cercano a la altura de las plantas. Los termopares fueron colocados en una hoja por individuo, seleccionando hojas que estaban exactamente encima de cada tratamiento y evitando las hojas que estuvieran cerca de los bordes, además de que fueron hojas expuestas sin sombra de otras para tener el mayor efecto posible de la radiación solar incidente. Ya instalados los sensores tanto termopares como la estación meteorológica, fueron puestos a prueba por tres días para verificar que funcionan adecuadamente.

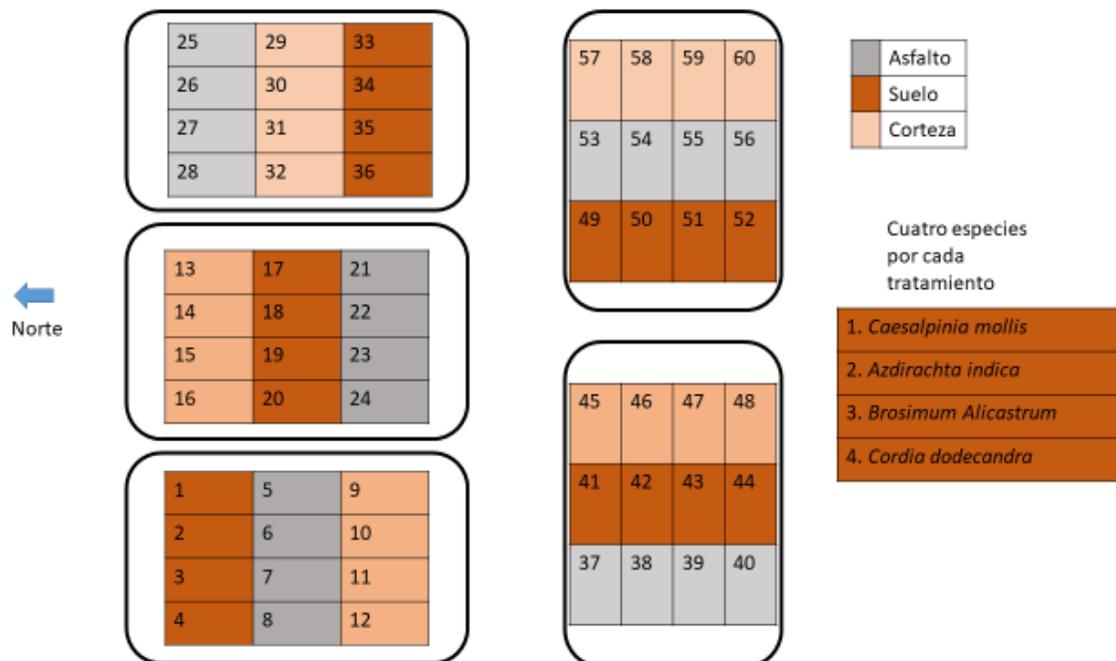


Figura 2.3. Diagrama de las cajas divididas en las tres secciones con los tratamientos y con las plantas numeradas. En el recuadro de la derecha se señala que cada tratamiento tenía una planta de cada especie. La leyenda superior indica los tres tratamientos. En el lado izquierdo de la figura se señala el norte.

2.2.5 BALANCE DE ENERGÍA Y TRANSPIRACIÓN

Balance de energía

Durante 24 horas se tomaron datos de temperatura foliar de las 36 plantas con los termopares por 48 días. Este registro comenzó a partir del 3 de noviembre, día en el cual se aseguró que los equipos estén funcionando correctamente. También se tomaron temperaturas puntuales de las hojas con el termómetro infrarrojo manual, solo para corroborar los datos de los termopares por lo que al final no se tomaron en cuenta las lecturas del termómetro manual para la base de datos final.

Los datos de la temperatura ambiente, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, así como la radiación incidente, fueron tomados por la estación meteorológica para después utilizarlos en las estimaciones de acuerdo a las ecuaciones 1, 2 y 3 para el balance de energía (Nobel, 2009). Únicamente la temperatura del cielo fue medida con un termómetro infrarrojo manual en la hora elegida para la estimación.

Descripción de los componentes de las ecuaciones

La radiación neta se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$a(1+r)S + a_{IR}\sigma[(T^{\text{alrededor}})^4 + (T^{\text{cielo}})^4 + (T^{\text{ambiente}})^4] - 2e_{IR}\sigma(T^{\text{hoja}})^4 \quad (1)$$

Donde a es el coeficiente de absorción de onda corta de la hoja, r es el valor del albedo. En este caso será el albedo del tratamiento donde se encuentre la planta, S es la Radiación directa de onda corta proveniente del sol, a_{IR} es el coeficiente de absorción de la hoja (onda larga), el valor varía de 0.94 a 0.98 (se usó 0.96), σ es la constante de Steffan-Boltzmann. De acuerdo con la Ley de Steffan-Boltzmann, la cantidad de radiación emitida por un cuerpo depende de su temperatura, e_{IR} es el coeficiente de emisividad de la hoja. La Ley de Kirchoff indica que este coeficiente es igual al de absorción (sería 0.96) y por último, T es la temperatura en K, siendo $T^{\text{alrededor}}$ la temperatura de la superficie utilizada como tratamiento y T^{ambiente} la que corresponde a la ambiental. Finalmente, al tomar en cuenta el ángulo de inclinación de las hojas y folíolos (en caso de las hojas compuestas), la parte correspondiente a la radiación de onda corta de la ecuación 1, quedaría dividida de la siguiente forma:

$$a_{\text{haz}}[S (\cos (\text{ángulo de inclinación}))] + a_{\text{envés}}[r \cos (\text{ángulo complementario})] \quad (1.1)$$

Donde a_{haz} es el coeficiente de absorción foliar del haz de la hoja, $a_{\text{envés}}$ el coeficiente de absorción del envés, *cos del ángulo de inclinación* sería el valor correspondiente al coseno del ángulo de inclinación del haz de la hoja, *cos del ángulo complementario* sería el valor correspondiente al coseno del ángulo complementario del haz, es decir $90^\circ - \text{ángulo del haz}$.

El calor sensible:

$$\frac{2k_{\text{aire}} (T^{\text{hoja}} - T^{\text{aire libre}})}{\delta_{\text{cl}}} \quad (2)$$

Donde K_{aire} es el coeficiente de conductividad térmica del aire (valor de tablas de acuerdo a la temperatura del ambiente), T^{hoja} es la temperatura de la hoja, $T^{aire libre}$ es la temperatura del ambiente y δ_{cl} es la capa límite de la hoja.

El calor latente:

$$H_{va} \frac{D_{va} (C_{va}^{hoja} - C_{va}^{aire libre})}{\delta_{cl}} \quad (3)$$

Donde H_{vap} es la energía necesaria para convertir un mol de agua a la temperatura de la hoja, D_{va} es el coeficiente de difusión del vapor de agua, δ_{cl} es la capa límite, C_{va}^{hoja} es la concentración de vapor dentro de la hoja y $C_{va}^{aire libre}$ es la concentración de vapor del aire libre. Para la estimación de la capa límite se utilizó la siguiente fórmula:

$$\delta_{cl} = 4 \text{ mm} \sqrt{\frac{L}{V}} \quad (3.1)$$

Donde L es la longitud o ancho de la hoja y V la velocidad del viento del sitio.

Al final se integran en una ecuación general:

$$\text{Radiación neta} + (- \text{Calor sensible}) + (- \text{Calor latente}) \quad (4)$$

Adicionalmente se realizó una estimación del calor latente esperado, siendo el que se necesitaría para que la sumatoria del balance sea igual a cero, se obtuvo restándole el calor sensible a la radiación neta.

El balance se estimó sólo para un momento del día, en este caso el mediodía (12:00 h), esta hora fue elegida por la posición del sol que queda exactamente arriba con respecto a los individuos, además es el momento donde la cantidad de radiación incidente es mayor. Se utilizó el dato del termopar correspondiente a cada individuo con ayuda de su número de identificación, en la hora elegida. Para el cálculo de la capa límite se tomó en cuenta el ancho de la hoja que coincida en su mayoría con la dirección del viento en ese instante, sea la parte transversal o longitudinal de la hoja.

Estimación de la transpiración por diferencia de peso.

Se utilizó un método de diferencia de peso, con la finalidad de estimar los moles de agua transpirada por los individuos durante 24 horas ($\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$) y posteriormente hacer una estimación de los moles por unidad de área foliar de acuerdo al método usado por el autor Luna

Flores et al., (2012), además este método se seleccionó ya que los individuos estaban contenidos en bolsas y se podían manipular y pesar de forma independiente.

Las mediciones se realizaron en días con el mínimo de nubes para comparar la transpiración máxima entre las especies, posteriormente para las estimaciones del balance de energía y la transpiración se hizo otra selección de días (entre 22 y 24 moles de fotones por metro cuadrado por día) esta vez tomando en cuenta la suma total del flujo de fotones de luz durante el día, estos datos se obtendrían de los sensores de la estación meteorológica.

Se seleccionaron 36 individuos de tres cajas distintas (tres por especie) para tener un promedio de cada especie por cada tratamiento, durante una semana. Los individuos medidos se alternaron durante todo el experimento para no pesar siempre los mismos 36. Cada individuo se pesaba con una balanza analógica (Marca: Nuevo León, capacidad 10 kg, México) un día para obtener un peso inicial y 24 horas después para obtener la diferencia de agua transpirada.

Los individuos se regaban tres días a la semana, esto de acuerdo a los días que se necesitaban para estimar la diferencia de peso (dos días), la cantidad añadida como riego fueron 500 ml de agua por cada individuo. Se regaba lunes a las 9:00 h y se dejaba escurrir, después se estimaba el peso inicial a las 13:00 h, al día siguiente se estimaba el peso final a la misma hora y al día siguiente se regaba de nuevo (miércoles). Los viernes siempre se regaba al final del día, debido al fin de semana que no hay actividades. Los días para estimar el peso inicial podían cambiar dependiendo de los días lluviosos o días completamente nublados que se presentaron, y por consiguiente cambiaban los días de riego, es decir, no se podía estimar peso inicial o final durante o después de un día de lluvia.

Para estimar el área foliar cada semana, se desarrolló una ecuación alométrica con las medidas de algunas hojas (Cuadro 2.1). El área foliar se midió con un medidor de área foliar automatizado (LI-3100, LI-COR). Se seleccionaron 5 hojas de las especies de hoja grande y 10 folíolos de las especies de hoja compuesta para estos análisis. Se identificó una forma geométrica similar para las hojas de cada especie. Para *C. mollis*, *B. alicastrum* y *C. dodecandra*, la forma geométrica más similar fue la elipse. En el caso de *A. indica* se utilizó una ecuación del segmento de una parábola, que es $\frac{4}{3}$ de un triángulo escaleno, por lo que primero se tuvo que estimar el área del triángulo escaleno y multiplicarse por $\frac{4}{3}$.

Cuadro 2.1. Ecuaciones alométricas para estimar el área foliar en cm² para cada especie en cada semana de medición de transpiración.

Especie	Ecuación
<i>Azadirachta indica</i>	$A = \left(\sqrt{s(s-a)(s-b)(s-c)} \right)^{4/3}$
<i>Brosimum alicastrum</i>	$A = \frac{1}{2} (\text{ancho}) \frac{1}{2} \text{Largo } \pi$
<i>Cordia dodecandra</i>	$A = \frac{1}{2} (\text{ancho}) \frac{1}{2} \text{Largo } \pi$
<i>Caesalpinia mollis</i>	$A = \frac{1}{2} (\text{ancho}) \frac{1}{2} \text{Largo } \pi$

Con las medidas requeridas para cada ecuación geométrica se calcularon las áreas foliares y mediante una regresión lineal simple y la estimación del error cuadrado medio (RSME) (Hernandez-Stefanoni & Ponce-Hernandez, 2006) se hizo una validación de estas con los datos de referencia obtenidos por el medidor automatizado.

2.2.6 TASA RELATIVA DE CRECIMIENTO

Para las estimaciones de los elementos del crecimiento vegetal, se usaron las siguientes ecuaciones 1, 2, 3 y 4 (Lambers et al, 2008) con sus unidades correspondientes:

La asimilación neta (*EA*) mediante la siguiente ecuación:

$$EA = \frac{(w_2 - w_1)(\ln W_2 - \ln W_1)}{(t_2 - t_1)(L_2 - L_1)} \quad (5)$$

Donde W_2 es la biomasa foliar final y W_1 la inicial, $\ln W_2 - \ln W_1$ es la diferencia logarítmica entre la biomasa foliar final y la inicial, $t_2 - t_1$ es la diferencia entre el tiempo final y el tiempo inicial, $L_2 - L_1$ es la diferencia entre el área foliar final y la inicial. Las unidades de *EA* son g cm² d⁻¹.

El área foliar específica (*SLA*) con la ecuación:

$$SLA = \frac{LA}{LW} \quad (6)$$

Donde *LA* es el área foliar y *LW* es la biomasa foliar. Las unidades de *SLA* son cm² g⁻¹.

La razón de peso foliar y peso total (*LMF*):

$$LMF = \frac{LW}{W} \quad (7)$$

Donde *LW* es la biomasa foliar y *W* es la biomasa total, el resultado es un porcentaje.

Finalmente la tasa relativa de crecimiento (*RGR*):

$$RGR = EA \times \frac{LA}{LW} \times \frac{LW}{W} \quad (8)$$

Es la multiplicación de los tres componentes anteriores y las unidades resultantes son $\text{mg g}^{-1} \text{d}^{-1}$

Para estimar la tasa relativa de crecimiento (*RGR*) se requería tener un valor en el tiempo 0, es decir cuando las plantas no hayan estado expuestas a ninguno de los tratamientos. Por lo que adicionalmente a las 60 plantas, se adquirieron 16 más con las mismas características y tamaño, siendo cuatro plantas por las cuatro especies.

Cada planta se dividió en tres componentes principales las cuales fueron: hojas, tallo y raíz para su procesamiento y posteriormente la estimación del área foliar específica y la fracción de biomasa foliar (Tamayo-Chim et al., 2012). De esta forma se podría analizar la biomasa por separado de cada componente en cada tratamiento a la hora de la cosecha final de los individuos.

Procedimiento para obtener los datos iniciales por especie

Para obtener los datos para el tiempo 0, se procesaron cuatro plantas por cada especie. Primero se hizo el conteo de las hojas, después se separaron con cuidado las raíces de la bolsa, fueron lavadas para eliminar el exceso de tierra y que no afecte a la hora de estimar la biomasa seca. Después se procedió a separar el tallo de las hojas y las raíces. Al momento de separar las hojas se medía su área foliar antes de que comenzasen a secarse, con un medidor de área foliar automatizado (LI-3100, LI-COR). Después se procedió a empacar todas las muestras en bolsas de papel para que puedan ser puestas en un horno desecador a una temperatura aproximada de 65°C , durante 10 días hasta tener peso constante y posteriormente obtener el peso seco.

Datos para la cosecha final

Para la cosecha final se procesaron todos los individuos y se realizó el mismo procedimiento de separación y medición de componentes, solamente se fueron clasificando por tratamiento, 48 días después (28 de octubre-13 de diciembre).

2.2.7 EFICIENCIA CUÁNTICA MÁXIMA DEL FOTOSISTEMA II

Se realizaron mediciones del fotosistema II con el analizador de rendimiento fotosintético (Mini-PAM-II) con el cual se obtienen datos del rendimiento del fotosistema II (yield), la eficiencia máxima cuántica máxima (F_v/F_m) y el NPQ.

Las mediciones fueron puntuales en tres hojas de cada individuo durante tres momentos del día (pre-alba, mañana y mediodía) en dos días cercanos a la cosecha final (9 de diciembre y 10 de diciembre). Se estimó un promedio con las tres hojas de cada individuo por cada momento del día y ese dato fue el utilizado para el análisis estadístico posterior.

2.2.8 PRUEBA BIOMECÁNICA

Prueba de flexión a tres puntos

Para esta prueba se cortó un segmento del tallo principal de cuatro individuos por cada especie, teniendo un total de 16 muestras con una proporción de largo-grueso de 20 (Shah et al., 2017; van Casteren et al., 2012), con esta prueba se estimaron el módulo de flexión y el máximo esfuerzo longitudinal de cada muestra. Las muestras se probaron en una máquina (SHIMADZU AG-I, Kyoto, Japón) con una celda de carga de 100 KN a una velocidad de 20 mm/min. La máquina genera datos para realizar una gráfica de fuerza-deflexión posterior a la prueba. Para la estimación de cada propiedad se requieren aplicar las ecuaciones usadas por (Łoboda et al., 2018; van Casteren et al., 2012).

La rigidez a flexión está dada por la ecuación

$$EI = \frac{dF}{dx} \frac{L^3}{48} \quad (9).$$

Donde dF/dx es la pendiente inicial de la gráfica de fuerza-deflexión y L la distancia de la muestra entre los soportes. Las unidades de EI son $N \text{ mm}^2$ o MPa .

El segundo momento de área se define como:

$$I = \frac{\pi r^4}{4} \quad (10)$$

Donde r es el radio de la muestra. Las unidades de I son mm^4 .

Para calcular el módulo de flexión:

$$E = \frac{EI}{I} \quad (11)$$

Se divide la ecuación 9 entre la 10. Las unidades son $N \text{ mm}^2$ o MPa .

La fuerza de pandeo está dada por la ecuación:

$$M_{max} = \frac{F_{max} L}{4} \quad (12)$$

Donde F_{max} es la fuerza máxima que se observe en la curva de fuerza-deflexión.

Finalmente, el máximo esfuerzo longitudinal:

$$\sigma_{Bmax} = \frac{M_{max} r}{I} \quad (13)$$

Se obtiene dividiendo la ecuación 12 multiplicada por r , entre la 10. Las unidades son MPa.

Debido a las limitaciones de acceso por los protocolos de la pandemia, las pruebas biomecánicas se limitaron a una caracterización inicial por especie del módulo de flexión y el máximo esfuerzo longitudinal, ya que estas pruebas se hicieron tres meses después de haber concluido el experimento de crecimiento. Por lo que no se hicieron pruebas con los individuos después de los tratamientos. Se utilizaron individuos de las cuatro especies y características de la sección 2.2.4.

2.3 ANÁLISIS DE DATOS

Para el análisis de la temperatura y albedo de las superficies, se tomaron mediciones del albedo y temperatura ya aplicadas como los tratamientos en las cajas, se promediaron tres mediciones en cada sección de tratamiento y con ello se realizó un ANOVA con diseño completamente aleatorizado para encontrar diferencias significativas entre las variables de temperatura y albedo máximos, posteriormente se hizo la prueba *post hoc* de Tukey en caso de existir diferencias entre las variables.

Para el análisis de crecimiento y asignación de biomasa vegetal, en el tiempo 0 se usaron cuatro plantas de cada especie antes de la aplicación de los tratamientos (0 d) y se estimaron los promedios de biomasa seca de cada componente. Se realizó un ANOVA con diseño completamente aleatorizado para encontrar diferencias significativas entre las biomásas secas de raíz, tallo y hojas de cada especie de manera inicial. Al final del experimento (48 d) se aplicó un diseño factorial con los 60 individuos (5 repeticiones) teniendo el factor especie cuatro niveles y el factor tratamiento tres niveles, para encontrar diferencias significativas en el tallo, raíz y hojas, en el área foliar específica (LA/LW), fracción de masa foliar (Lw/W) y la tasa relativa de crecimiento (RGR). Posteriormente se aplicó la prueba *post hoc* de Tukey para encontrar diferencias entre los factores.

En las mediciones de transpiración se aplicó el mismo diseño factorial con los factores especie (cuatro niveles) y tratamiento (tres niveles), en este caso fueron 36 individuos (tres repeticiones) y la variable de respuesta fue la cantidad de agua transpirada de cada individuo para encontrar diferencias entre tratamientos y especies. La prueba post hoc utilizada fue la de Tukey.

Para el balance de energía se aplicó el mismo análisis estadístico que en la transpiración con los mismos factores y niveles, en este caso las variables de respuesta fueron: calor sensible, calor latente esperado, radiación neta, calor latente potencial y temperatura foliar, posteriormente se utilizó la prueba post hoc de Tukey para encontrar diferencias entre los factores (especie y tratamiento) en cada una de las cinco variables mencionadas.

Para las mediciones de la eficiencia cuántica máxima del fotosistema II, se realizó un diseño factorial como los anteriores, mismos factores con los mismos niveles, siendo la variable de respuesta la eficiencia máxima del fotosistema II (F_v/F_m).

Con respecto a los análisis estadísticos de las pruebas biomecánicas, se realizó un análisis ANOVA con un diseño completamente aleatorizado, siendo el módulo de flexión y el máximo estrés longitudinal las variables a analizar entre las cuatro especies, antes de aplicarles los tratamientos, finalmente la prueba de Tukey como prueba post hoc. No fue posible hacer pruebas con la aplicación de los tratamientos por lo explicado en la sección 2.2.8.

Para todas las variables de respuesta de los análisis estadísticos se realizaron pruebas de normalidad (Shapiro-Wilk) y homogeneidad de varianzas (Levene). Se utilizó el programa R-Studio versión 1.3.1073 (R Core Team, 2020, RStudio Team, 2020) con los paquetes “lawstat”(Gastwirth et al, 2020) y “agricolae” (Mendiburu, 2020). Los gráficos fueron realizados en R studio, Microsoft Excel 2013 y Sigma Plot 11.0.

2.4 RESULTADOS

2.4.1 CARACTERIZACIÓN DE SUPERFICIES

El resultado de los análisis muestra que todas las superficies usadas como tratamiento en las cajas fueron diferentes entre sí en temperatura máxima ($F=109.8$, $p<0.05$) y albedo máximo ($F=616.2$, $p<0.05$). La temperatura máxima promedio más alta es de la superficie de asfalto y la menor para la superficie de suelo. La superficie de corteza tuvo el mayor albedo máximo promedio, en contraste el asfalto tuvo el menor valor de albedo máximo. (Cuadro 2.2).

Cuadro 2.2. Promedio de temperatura máxima y promedio de albedo máximo a las 12:00 h \pm desviación estándar. Las letras mayúsculas distintas indican temperaturas diferentes, letras minúsculas distintas indican albedos diferentes. Tukey $\alpha=0.05$.

Superficie	Promedio de temperatura máxima (°C)	Promedio de albedo máximo (%)
Asfalto	55.58 \pm 5.07 ^(A)	3.09 \pm 0.57 ^(c)
Tierra (suelo)	39.97 \pm 7.06 ^(C)	8.53 \pm 3.30 ^(b)
Corteza	47.32 \pm 5.02 ^(B)	15.59 \pm 3.81 ^(a)

2.4.2 CARACTERIZACIÓN DE LA RADIACIÓN INCIDENTE

El Cuadro 2.3 presenta los días seleccionados para la estimación del balance de energía y la transpiración, de acuerdo con la cantidad de flujo de fotones de luz diarios. El punto más alto de valores de cuantos de luz ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$), radiación solar ($\text{W m}^{-2} \text{d}^{-1}$) y temperatura del aire (°C) es al mediodía (Figura 2.4), contrario de la humedad relativa.

Cuadro 2.3. Se presentan las sumatorias totales del flujo de fotones totales diarios ($\mu\text{mol m}^{-2}$) en los días de medición del 03 de noviembre al 11 de diciembre. Los días con mayor cantidad de flujo de fotones en moles son los resaltados en color azul y fueron los que se tomaron en cuenta para los resultados presentados.

Días medidos	Flujo de fotones de luz diarios	
	$\mu\text{mol m}^{-2}$	$\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$
03 al 04 nov	38669	23.2014
05 al 06 nov	37682.8	22.60968
09 al 10 nov	40134	24.0804
12 al 13 nov	38851.5	23.3109
18 al 19 nov	30871.5	18.5229
19 al 20 nov	33416.5	20.0499
20 al 22 nov	31174	18.7044
24 al 25 nov	33521.5	20.1129
26 al 27 nov	35624	21.3744
01 al 02 dic	33139	19.8834
02 al 03 dic	36681.5	22.0089
03 al 04 dic	33981.5	20.3889
08 al 09 dic	27614	16.5684
10 al 11 dic	38711.5	23.2269

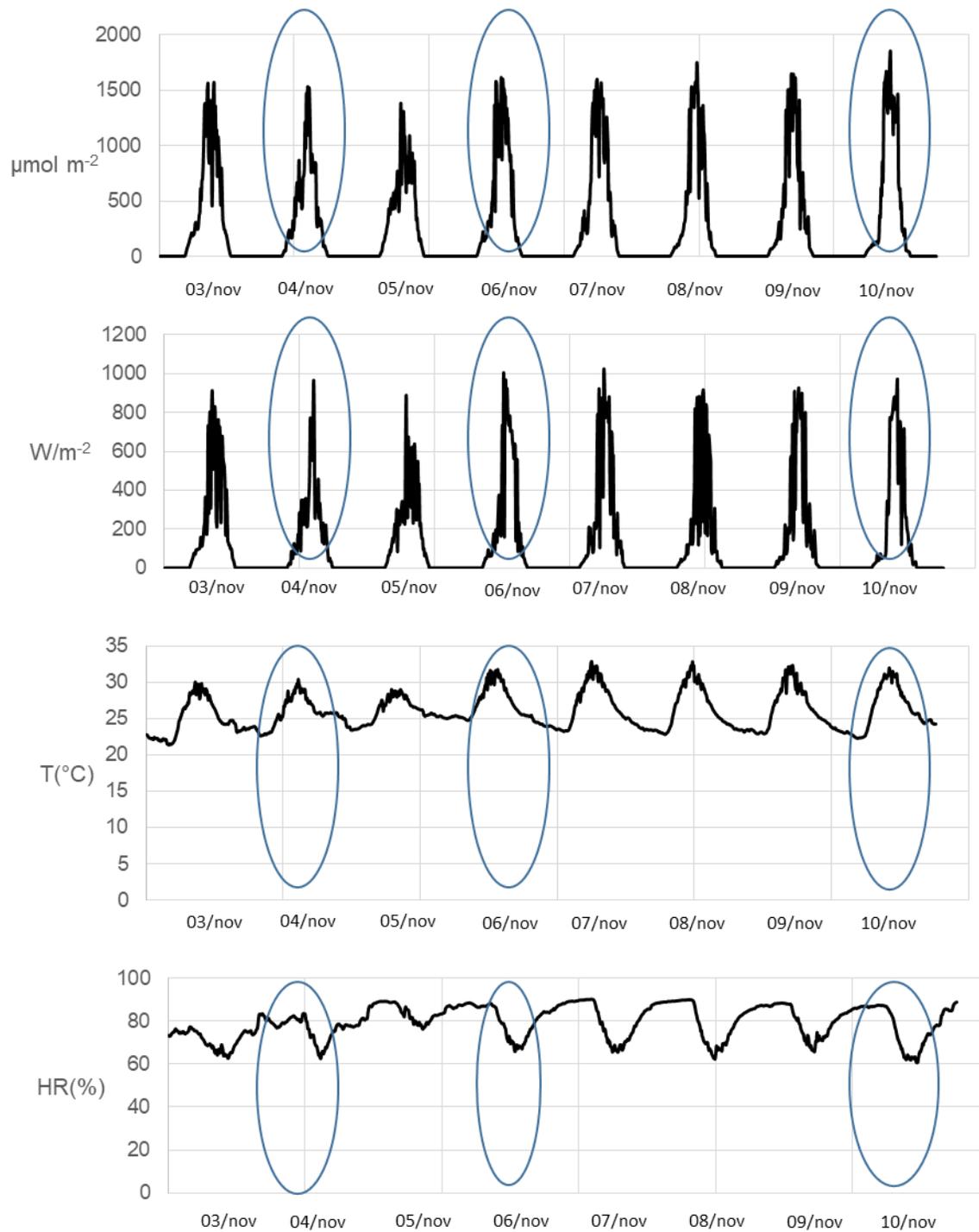


Figura 2.4. Variación de las condiciones de microambiente en días consecutivos (03 al 10 de noviembre), donde se señalan tres de los días seleccionados (óvalos azules). En los ejes Y están graficados el flujo de fotones de luz ($\mu\text{mol m}^{-2}$), radiación incidente (W m^2), temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y humedad relativa (%) y el eje X las fechas de los días. Los óvalos azules representan tres de los días seleccionados para la estimación y el análisis de la transpiración y balance de energía.

2.4.3 CRECIMIENTO Y ASIGNACIÓN DE BIOMASA

Biomasa seca inicial.

Las raíces de *Caesalpinia mollis* presentaron un mayor tamaño con respecto a las plantas de las otras especies, las demás especies no presentaron diferencias entre sí. En biomasa de tallo, *Caesalpinia mollis* - *Cordia dodecandra* fueron iguales y *Brosimum alicastrum* - *Azadirachta indica* fueron iguales. En biomasa de hojas, únicamente hay diferencias entre *Cordia dodecandra* y *Azadirachta indica*, el resto de las especies no presentaron diferencias entre sí. La Figura 2.5 indica las cantidades de biomasa total inicial. El Cuadro 2.4 describe las cantidades entre la biomasa inicial de los componentes con el error estándar.

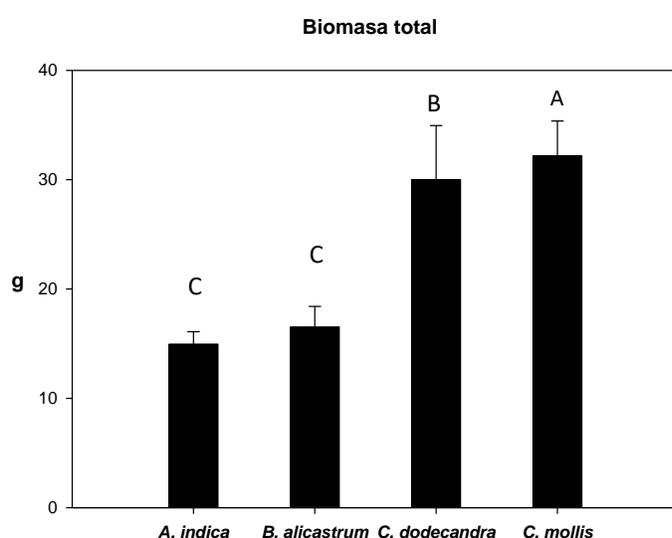


Figura 2.5. Promedio de biomasa total inicial por especie. Letra mayúscula distinta indica diferente biomasa total entre especies. Tukey $\alpha=0.05$. Las barras superiores indican el error estándar.

Cuadro 2.4. Promedios \pm desviación estándar de biomasa inicial por componente de cada especie. Letra minúscula distinta en la columna del componente señala diferencias significativas de los componentes entre especies de acuerdo a la prueba de Tukey ($\alpha=0.05$) (n=16).

Especie	Raíz (g)	Tallo (g)	Hojas (g)
<i>Azadirachta indica</i>	5.59 \pm 0.32 ^(b)	6.12 \pm 0.40 ^(b)	3.23 \pm 0.71 ^(a)
<i>Brosimum alicastrum</i>	5.94 \pm 0.37 ^(b)	6.03 \pm 0.93 ^(b)	4.53 \pm 0.72 ^(a)
<i>Cordia dodecandra</i>	5.15 \pm 0.34 ^(b)	13.83 \pm 1.83 ^(a)	10.99 \pm 2.94 ^(b)
<i>Caesalpinia mollis</i>	9.93 \pm 1.64 ^(a)	13.91 \pm 1.78 ^(a)	8.32 \pm 1.12 ^(a)

Biomasa final por componente

No se encontraron diferencias entre tratamientos en el tallo, raíz y hojas, pero si se encontraron en el factor especie, en tallo ($F=14.499$, $p<0.05$), raíz ($F=47.846$, $p<0.05$) y hojas ($F=38.841$, $p<0.05$). No hubo interacción entre factores. *C. mollis* tuvo las raíces con mayor tamaño respecto a las demás plantas de las otras especies, las demás especies no presentaron diferencias entre sí. Los tallos de *B. alicastrum* y *A. indica* fueron iguales en biomasa, las demás especies fueron diferentes entre sí. Con respecto al componente de biomasa de las hojas las 4 especies fueron diferentes entre ellas (Cuadro 2.5).

Cuadro 2.5. Biomasa por componente por tratamiento \pm error estándar. Letra mayúscula distinta representa diferencias entre especie, letra minúscula distinta representa diferencias entre tratamientos de acuerdo a la prueba de Tukey ($\alpha=0.05$). (n=59).

Biomasa final por componente			
	Asfalto	Tierra (suelo)	Corteza
Biomasa raíces (g)			
<i>Caesalpinia mollis</i>	20.63 \pm 1.61 ^(A)	21.15 \pm 4.24 ^(A)	22.34 \pm 2.72 ^(A)
<i>Azadirachta indica</i>	9.95 \pm 1.42 ^(B)	8.77 \pm 2.90 ^(B)	10.56 \pm 2.95 ^(B)
<i>Brosimum alicastrum</i>	13.94 \pm 4.45 ^(B)	10.24 \pm 3.47 ^(B)	11.69 \pm 1.99 ^(B)
<i>Cordia dodecandra</i>	11.97 \pm 1.82 ^(B)	15.14 \pm 1.48 ^(B)	16.78 \pm 3.89 ^(B)
Biomasa tallo (g)			
<i>Caesalpinia mollis</i>	23.88 \pm 4.61 ^(A)	16.07 \pm 2.87 ^(A)	23.25 \pm 1.99 ^(A)
<i>Azadirachta indica</i>	8.01 \pm 1.43 ^(B)	5.40 \pm 1.56 ^(B)	7.76 \pm 1.52 ^(B)
<i>Brosimum alicastrum</i>	13.86 \pm 3.53 ^(B)	8.29 \pm 2.37 ^(B)	10.65 \pm 2.11 ^(B)
<i>Cordia dodecandra</i>	26.90 \pm 3.30 ^(C)	27.88 \pm 3.99 ^(C)	44.82 \pm 9.99 ^(C)
Biomasa hojas (g)			
<i>Caesalpinia mollis</i>	15.24 \pm 1.56 ^(A)	15.16 \pm 1.90 ^(A)	17.14 \pm 2.15 ^(A)
<i>Azadirachta indica</i>	3.43 \pm 0.71 ^(D)	3.31 \pm 0.90 ^(D)	4.08 \pm 1.32 ^(D)
<i>Brosimum alicastrum</i>	7.75 \pm 1.82 ^(C)	6.48 \pm 1.92 ^(C)	6.51 \pm 1.48 ^(C)
<i>Cordia dodecandra</i>	10.76 \pm 2.15 ^(B)	10.38 \pm 3.44 ^(B)	13.77 \pm 2.23 ^(B)

Área foliar específica

No se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos, pero sí se encontraron entre especies ($F=22.675$, $p<0.05$) (Cuadro 2.6). Al final del experimento el área foliar específica de *A. indica* fue mayor a las demás especies, las especies restantes no tuvieron diferencias significativas entre ellas (Cuadro 2.6).

Fracción de masa foliar

La fracción de masa foliar presentó diferencias significativas entre especies ($F=15.213$, $p<0.05$). *C. mollis* tuvo diferencias con *A. indica* y *C. dodecandra*. *B. alicastrum* fue diferente de *A. indica*. No se encontraron diferencias entre individuos de *C. dodecandra* y *A. indica* (Cuadro 2.6) (Figura 2.7).

Tasa relativa de crecimiento

La tasa relativa de crecimiento no tuvo diferencias significativas entre tratamientos, las únicas diferencias fueron en el factor especie ($F=4.793$, $p<0.05$). No hubo interacción entre factores. *A. indica* tuvo diferencias con todas las especies y tuvo el menor crecimiento entre ellas (Cuadro 2.6) (Figura 2.7).

Cuadro 2.6. Promedios de área foliar específica (SLA), fracción de masa foliar (LMF) y tasa relativa de crecimiento (RGR) de cada especie por tratamiento con \pm error estándar. Letra mayúscula distinta en cada columna indica diferencias entre especie de acuerdo a la prueba de Tukey ($\alpha=0.05$) ($n=59$).

Sustrato	Especie	Área foliar específica (SLA) ($\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$)	Fracción de masa foliar (LMF) (%)	Tasa relativa de crecimiento (RGR) ($\text{mg g}^{-1} \text{d}^{-1}$)
Inicial	<i>A. indica</i>	240.41 \pm 9.15	0.208 \pm 0.035	-
	<i>B. alicastrum</i>	138.39 \pm 4.19	0.270 \pm 0.016	-
	<i>C. dodecandra</i>	138.78 \pm 3.65	0.341 \pm 0.045	-
	<i>C. mollis</i>	187.78 \pm 36.61	0.268 \pm 0.043	-
Asfalto	<i>A. indica</i>	156.25 \pm 3.66 (A)	0.158 \pm 0.014 (A)	0.004 \pm 0.0017 (B)
	<i>B. alicastrum</i>	112.06 \pm 7.99 (B)	0.223 \pm 0.019 (B)	0.011 \pm 0.0029 (A)
	<i>C. dodecandra</i>	122.32 \pm 13.29 (B)	0.213 \pm 0.022 (A)	0.007 \pm 0.0013 (A)
	<i>C. mollis</i>	115.89 \pm 4.72 (B)	0.257 \pm 0.009 (C)	0.010 \pm 0.0014 (A)
Tierra (suelo)	<i>A. indica</i>	149.17 \pm 8.89 (A)	0.178 \pm 0.008(A)	0.001 \pm 0.0030 (B)
	<i>B. alicastrum</i>	115.61 \pm 3.43 (B)	0.237 \pm 0.035 (B)	0.007 \pm 0.0032 (A)
	<i>C. dodecandra</i>	100.57 \pm 3.66 (B)	0.163 \pm 0.036 (A)	0.008 \pm 0.0022 (A)
	<i>C. mollis</i>	117.57 \pm 2.76 (B)	0.275 \pm 0.007 (C)	0.009 \pm 0.0018 (A)
Corteza	<i>A. indica</i>	150.91 \pm 5.54 (A)	0.175 \pm 0.015 (A)	0.005 \pm 0.0029 (B)
	<i>B. alicastrum</i>	133.54 \pm 13.42 (B)	0.22 \pm 0.015 (B)	0.009 \pm 0.0026 (A)
	<i>C. dodecandra</i>	100.61 \pm 3.81 (B)	0.187 \pm 0.007 (A)	0.011 \pm 0.0021 (A)
	<i>C. mollis</i>	122.85 \pm 4.50 (B)	0.271 \pm 0.011 (C)	0.012 \pm 0.0017 (A)

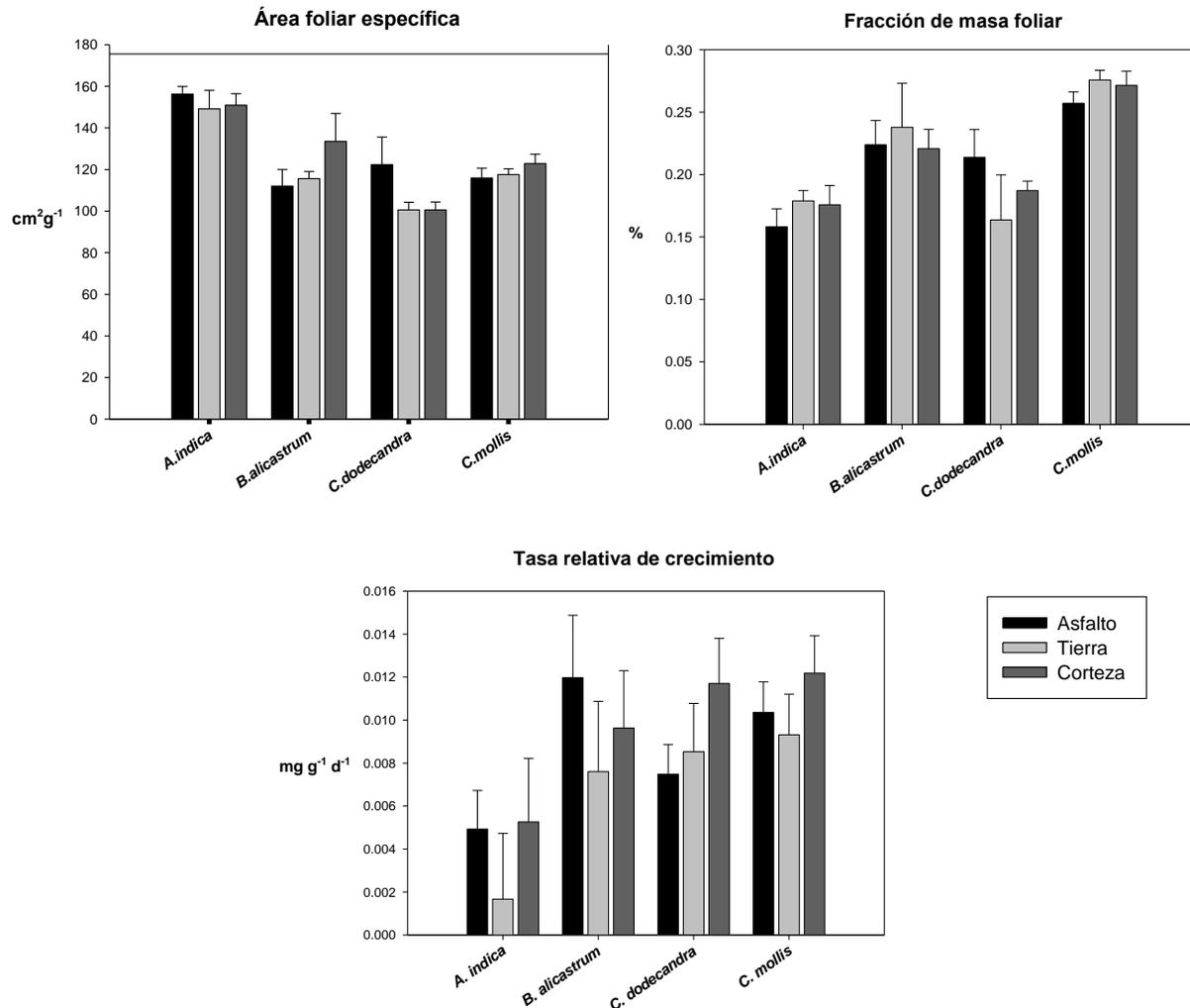


Figura 2.6. Promedios del área foliar específica, fracción de masa foliar y tasa relativa de crecimiento correspondientes al final del experimento con sus unidades respectivas. Las barras superiores indican el error estándar.

2.4.4 TRANSPIRACIÓN

Ecuaciones para estimación del área foliar

Los resultados del análisis de regresión (Cuadro 2.7) nos muestran una R^2 mayor a 0.90 en tres especies y *A. indica* tiene un valor cercano a 0.90, lo que significa que cada modelo explica un 90% de la variabilidad, por lo que las ecuaciones para estimar cada área foliar se pueden aplicar. Esto sirvió para calcular el área foliar en el sitio del experimento, contando el total de hojas por planta y tomando medidas de 10 folíolos en el caso de las hojas compuestas y de 5 hojas en el

caso de las especies con hojas grandes para calcular un promedio de área y multiplicarlo por el total de hojas. Esto se realizó cada semana.

Cuadro 2.7. Resultados del modelo de regresión lineal y del error cuadrado medio en cm² para la ecuación alométrica de cada especie.

Especie	R ² ajustada	RSME
<i>Azadirachta indica</i>	0.8721	0.5
<i>Brosimum alicastrum</i>	0.9776	3.97
<i>Cordia dodecandra</i>	0.985	9.17
<i>Caesalpinia mollis</i>	0.9743	0.46

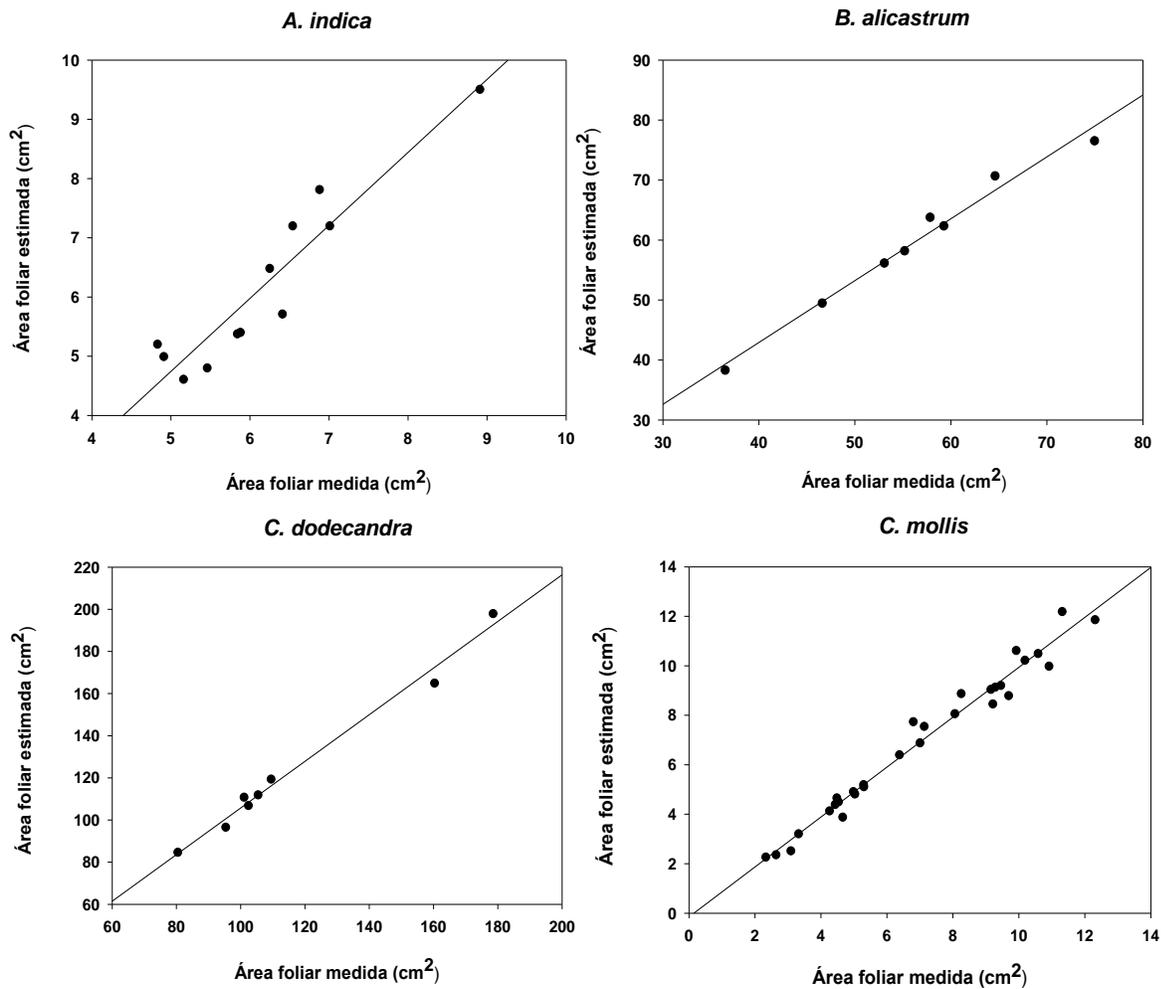


Figura 2.7. Gráfica por especie del análisis de regresión para validar la ecuación alométrica de cada una.

Estimación de la transpiración por diferencia de peso.

Se presentan los resultados de los seis días seleccionados en el Cuadro 2.3, con respecto a las cantidades de transpiración. El Cuadro 2.8 presenta el promedio de las cantidades de transpiración convertidas a moles por metro cuadrado por día, usando las ecuaciones alométricas estimadas para cada especie presentada en el Cuadro 2.1.

El día 4 de noviembre no presentó diferencias significativas en ninguno de los factores, especie ($F=1.389$, $p>0.05$) y tratamiento ($F=1.411$, $p>0.05$). El día 06 de noviembre presentó diferencias significativas en el factor especie ($F=4.040$, $p<0.05$). Solo dos especies presentaron diferencias entre sí, *A. indica* fue mayor que *C. mollis*. El Día 13 de noviembre presentó diferencias significativas en el factor de especie ($F=4.376$, $p<0.05$), solo dos especies presentaron diferencias entre sí, *B. alicastrum* fue mayor a *C. mollis*. Los días 10 de noviembre, 03 y 11 de diciembre no presentaron diferencias en ninguno de los factores como se describe en el Cuadro 2.8.

Cuadro 2.8. Promedio \pm error estándar de transpiración en moles por metro cuadrado por día. Letras mayúsculas distintas representan diferencias entre especies, letras minúsculas distintas representan diferencias entre tratamientos. Tukey ($\alpha=0.05$).

Transpiración por día			
	Tratamientos		
Día 04-11	Asfalto (mol m ² día)	Tierra (mol m ² día)	Corteza (mol m ² día)
<i>C. mollis</i>	50.09 \pm 33.32	17.61 \pm 17.09	17.06 \pm 15.19
<i>C. dodecandra</i>	45.25 \pm 22.87	77.98 \pm 41.18	53.03 \pm 12.09
<i>A. indica</i>	133.57 \pm 129.24	246.13 \pm 110.60	41.60 \pm 41.60
<i>B. alicastrum</i>	47.24 \pm 33.34	128.42 \pm 19.55	34.68 \pm 18.54
Día 06-11			
<i>C. mollis</i>	65.06 \pm 30.01 ^(B)	29.05 \pm 26.97 ^(B)	55.74 \pm 13.67 ^(B)
<i>C. dodecandra</i>	69.21 \pm 22.22 ^(B)	75.61 \pm 11.60 ^(B)	78.75 \pm 23.67 ^(B)
<i>A. indica</i>	208.35 \pm 101.01 ^(A)	196.78 \pm 94.63 ^(A)	120.52 \pm 71.87 ^(A)
<i>B. alicastrum</i>	69.13 \pm 38.07 ^(B)	107.50 \pm 31.16 ^(B)	97.04 \pm 38.77 ^(B)
Día 10-11			
<i>C. mollis</i>	68.16 \pm 22.06	61.80 \pm 31.27	59.88 \pm 3.55
<i>C. dodecandra</i>	104.93 \pm 27.67	77.90 \pm 8.92	98.05 \pm 9.58
<i>A. indica</i>	99.29 \pm 42.04	323.88 \pm 159.18	88.76 \pm 62.34
<i>B. alicastrum</i>	95.10 \pm 57.99	196.05 \pm 74.56	85.46 \pm 48.18
Día 13-11			
<i>C. mollis</i>	63.41 \pm 21.34 ^(B)	40.26 \pm 26.84 ^(B)	56.10 \pm 20.05 ^(B)

<i>C. dodecandra</i>	69.75 ±40.58 ^(B)	85.99 ±12.31 ^(B)	75.34 ±2.49 ^(B)
<i>A. indica</i>	352.68 ±293.34 ^(B)	143.43 ±41.43 ^(B)	67.45 ±49.36 ^(B)
<i>B. alicastrum</i>	114.07 ±62.75 ^(A)	194.40 ±68.13 ^(A)	93.28 ±7.75 ^(A)
Día 03-12			
<i>C. mollis</i>	33.87 ±23.62	49.40 ±3.36	62.91 ±19.42
<i>C. dodecandra</i>	39.17 ±28.33	91.61 ±19.46	64.50 ±13.75
<i>A. indica</i>	33.79 ±25.33	78.04 ±43.86	154.91 ±36.73
<i>B. alicastrum</i>	56.83 ±15.49	44.42 ±8.14	46.48 ±2.96
Día 11-12			
<i>C. mollis</i>	63.85 ±16.25	50.08 ±12.48	31.17 ±10.25
<i>C. dodecandra</i>	65.13 ±32.74	41.75 ±22.87	66.46 ±6.41
<i>A. indica</i>	112.19 ±13.57	114.97 ±50.27	78.21 ±9.73
<i>B. alicastrum</i>	53.69 ±24.16	54.48 ±11.94	39.33 ±4.90

2.4.5 BALANCE DE ENERGÍA EN HOJAS

Se presentan una serie de cuadros con las cantidades promedio resultantes de cada componente del balance de energía por especie en cada tratamiento, junto con la temperatura foliar. Todas las variables corresponden a mediciones de las 12:00 h de los días seleccionados en el Cuadro 2.3. Los ángulos de inclinación aplicados a la parte correspondiente de la radiación neta por especie están en el Cuadro 2.9.

Cuadro 2.9. Promedio ± desviación estándar del ángulo de inclinación de las hojas de cada especie medidos en todos los individuos en 3 días diferentes (n=60).

Especie	Ángulo de inclinación de hoja (°)
<i>Azadirachta indica</i>	25.75 ±13.78
<i>Brosimum alicastrum</i>	50.28 ±22.23
<i>Cordia dodecandra</i>	36.67 ±21.44
<i>Caesalpinia mollis</i>	58.41 ±20.59

A continuación se describen los resultados de las 5 variables del día 04 de noviembre (Cuadro 2.10). El calor sensible tuvo diferencias significativas en el factor especie (F=3.824, p<0.05). Solo las especies *C. mollis* y *C. dodecandra* tuvieron diferencias entre sí. El calor latente potencial tuvo diferencias en el factor especie (F=40.454, p<0.05), solo las especies *C. mollis* y *A. indica* fueron

iguales, las demás especies sí fueron diferentes entre sí. La radiación neta tuvo diferencias significativas en el factor tratamiento ($F=74.523$, $p<0.05$) y en el factor especie ($F=459.52$, $p<0.05$). Todos los tratamientos tuvieron diferencias entre sí, al igual que todas las especies tuvieron diferencias entre sí. El calor latente esperado tuvo diferencias significativas en el factor especie ($F=25.92$, $p<0.05$). Las especies que no presentaron diferencias entre sí fueron *C. dodecandra* con *A. indica* y *C. mollis* con *B. alicastrum*, las demás fueron iguales entre sí. En la temperatura foliar no se encontraron diferencias significativas en ningún factor.

Cuadro 2.10. Promedio \pm error estándar en $W\ m^2$ de cada componente del balance de energía y temperatura foliar ($^{\circ}C$) del día 04 de noviembre. Letras mayúsculas distintas en las columnas representan diferencias entre especies, letras minúsculas distintas representan diferencias entre tratamientos. Tukey ($\alpha=0.05$) ($n=36$).

	Tratamientos		
	Asfalto	Tierra	Corteza
C. sensible ($W\ m^2$)			
<i>Caesalpinia mollis</i>	173.46 \pm 56.35 ^(A)	140.19 \pm 10.52 ^(A)	191.29 \pm 30.23 ^(A)
<i>Cordia dodecandra</i>	77.38 \pm 22.76 ^(B)	62.21 \pm 39.39 ^(B)	65.25 \pm 15.72 ^(B)
<i>Azadirachta indica</i>	173.98 \pm 90.72 ^(A)	129.80 \pm 14.68 ^(A)	109.85 \pm 33.06 ^(A)
<i>Brosimum alicastrum</i>	143.37 \pm 21.40 ^(A)	115.53 \pm 17.38 ^(A)	174.22 \pm 24.11 ^(A)
Radiación neta ($W\ m^2$)			
<i>Caesalpinia mollis</i>	747.52 \pm 6.23 ^{(A),(a)}	714.37 \pm 1.65 ^{(A),(b)}	791.45 \pm 4.47 ^{(A),(c)}
<i>Cordia dodecandra</i>	929.26 \pm 18.75 ^{(B),(a)}	864.11 \pm 11.91 ^{(B),(b)}	931.17 \pm 2.98 ^{(B),(c)}
<i>Azadirachta indica</i>	981.56 \pm 10.82 ^{(C),(a)}	933.94 \pm 3.68 ^{(C),(b)}	998.06 \pm 4.04 ^{(C),(c)}
<i>Brosimum alicastrum</i>	804.35 \pm 2.93 ^{(D),(a)}	771.22 \pm 20.36 ^{(D),(b)}	836.11 \pm 5.77 ^{(D),(c)}
C. latente potencial ($W\ m^2$)			
<i>Caesalpinia mollis</i>	1222.70 \pm 172.24 ^(A)	1189.12 \pm 19.67 ^(A)	1323.54 \pm 43.73 ^(A)
<i>Cordia dodecandra</i>	644.32 \pm 78.21 ^(C)	582.88 \pm 39.22 ^(C)	596.84 \pm 66.21 ^(C)
<i>Azadirachta indica</i>	1336.90 \pm 169.41 ^(A)	1249.27 \pm 44.57 ^(A)	1260.23 \pm 54.73 ^(A)
<i>Brosimum alicastrum</i>	864.14 \pm 80.65 ^(B)	906.32 \pm 6.44 ^(B)	981.12 \pm 60.59 ^(B)
C. latente esperado ($W\ m^2$)			
<i>Caesalpinia mollis</i>	574.05 \pm 62.53 ^(B)	574.18 \pm 12.14 ^(B)	600.16 \pm 34.67 ^(B)
<i>Cordia dodecandra</i>	851.87 \pm 16.97 ^(A)	801.89 \pm 51.28 ^(A)	865.92 \pm 18.70 ^(A)
<i>Azadirachta indica</i>	807.58 \pm 101.46 ^(A)	804.14 \pm 14.51 ^(A)	888.20 \pm 37.09 ^(A)
<i>Brosimum alicastrum</i>	660.98 \pm 24.33 ^(B)	655.69 \pm 22.05 ^(B)	661.88 \pm 29.80 ^(B)
Temperatura foliar ($^{\circ}C$)			
<i>Caesalpinia mollis</i>	30.42 \pm 0.51	30.13 \pm 0.13	30.6 \pm 0.36
<i>Cordia dodecandra</i>	30.14 \pm 0.45	29.94 \pm 0.98	29.84 \pm 0.24

<i>Azadirachta indica</i>	30.20 ± 0.89	29.80 ± 0.38	29.59 ± 0.33
<i>Brosimum alicastrum</i>	30.89 ± 0.24	30.37 ± 0.38	31.33 ± 0.46

Descripción de los resultados del día 06 de noviembre (Cuadro 2.11). El calor sensible no tuvo diferencias ni en el factor tratamiento ni el factor especie. El calor latente potencial tuvo diferencias significativas en el factor especie ($F=19.676$, $p<0.05$). Las especies que no presentaron diferencias entre sí fueron *B. alicastrum* y *A. indica*, *C. mollis* y *A. indica*. Las demás especies presentaron diferencias entre sí. La radiación neta tuvo diferencias en el factor tratamiento ($F=25.55$, $p<0.05$) y en el factor especie ($F=454.09$, $p<0.05$). Los tratamientos de asfalto y tierra no presentaron diferencias entre sí pero ambos tuvieron diferencias con la corteza, en cuanto a las especies, todas tuvieron diferencias entre sí. El calor latente esperado tuvo diferencias en el factor especie ($F=33.153$, $p<0.05$), las especies iguales entre sí fueron *C. mollis* y *B. alicastrum*, *C. dodecandra* y *A. indica*. No hubo diferencias en ningún factor en la temperatura foliar.

Cuadro 2.11. Promedio ± error estándar en $W m^2$ de cada componente del balance de energía y temperatura foliar ($^{\circ}C$) del día 06 de noviembre. Letras mayúsculas distintas en las columnas representan diferencias entre especies, letras minúsculas distintas representan diferencias entre tratamientos. Tukey ($\alpha=0.05$) ($n=36$).

	Tratamiento		
	Asfalto	Tierra	Corteza
C.sensible ($W m^2$)			
<i>Caesalpinia mollis</i>	137.80 ± 48.63	83.53 ± 27.62	162.94 ± 60.90
<i>Cordia dodecandra</i>	36.60 ± 34.74	52.03 ± 50.29	15.80 ± 29.99
<i>Azadirachta indica</i>	84.97 ± 77.65	61.76 ± 26.28	60.69 ± 37.49
<i>Brosimum alicastrum</i>	152.76 ± 33.17	88.30 ± 36.45	94.65 ± 18.15
Radiación neta ($W m^2$)			
<i>Caesalpinia mollis</i>	816.23 ± 9.80 (D),(b)	838.24 ± 6.41 (D),(b)	875.76 ± 13.75 (D),(a)
<i>Cordia dodecandra</i>	1051.10 ± 10.87 (B),(b)	1037.06 ± 19.87 (B),(b)	1104.39 ± 11.98 (B),(a)
<i>Azadirachta indica</i>	1148.02 ± 15.48 (A),(b)	1144.52 ± 6.40 (A),(b)	1178.87 ± 8.89 (A),(a)
<i>Brosimum alicastrum</i>	886.40 ± 8.72 (C),(b)	916.22 ± 88.01 (C),(b)	958.33 ± 7.85 (C),(a)
C. latente potencial ($W m^2$)			
<i>Caesalpinia mollis</i>	964.49 ± 133.76 (A)	956.26 ± 78.56 (A)	1135.56 ± 29.12 (A)
<i>Cordia dodecandra</i>	522.35 ± 86.04 (C)	614.05 ± 50.17 (C)	525.15 ± 51.90 (C)
<i>Azadirachta indica</i>	1051.42 ± 38.41 (A)	788.28 ± 8.13 (A)	773.48 ± 97.50 (A)
<i>Brosimum alicastrum</i>	855.23 ± 60.86 (B)	781.84 ± 48.50 (B)	714.59 ± 65.74 (B)
C. latente esperado ($W m^2$)			
	Asfalto	Tierra	Corteza

<i>Caesalpinia mollis</i>	678.43 ± 58.40 ^(B)	754.70 ± 33.86 ^(B)	712.81 ± 74.63 ^(B)
<i>Cordia dodecandra</i>	1014.49 ± 45.58 ^(A)	985.02 ± 69.79 ^(A)	1088.58 ± 39.41 ^(A)
<i>Azadirachta indica</i>	1063.04 ± 93.11 ^(A)	1082.76 ± 32.68 ^(A)	1118.17 ± 46.38 ^(A)
<i>Brosimum alicastrum</i>	733.64 ± 40.93 ^(B)	827.91 ± 46.17 ^(B)	863.67 ± 24.79 ^(B)
Temperatura foliar (°C)	Asfalto	Tierra	Corteza
<i>Caesalpinia mollis</i>	33.20 ± 0.78	32.133 ± 0.51	33.53 ± 1.10
<i>Cordia dodecandra</i>	31.74 ± 0.88	32.55 ± 1.59	31.22 ± 0.80
<i>Azadirachta indica</i>	32.55 ± 1.25	32.01 ± 1.09	31.97 ± 0.72
<i>Brosimum alicastrum</i>	34.57 ± 0.68	32.83 ± 1.09	33.16 ± 0.62

Descripción de los resultados del día 10 de noviembre (Cuadro 2.11). El calor sensible no tuvo diferencias en ningún factor. El calor latente potencial tuvo diferencias en el factor especie ($F=7.151$, $p<0.05$), las especies que presentaron diferencias entre sí fueron *C. dodecandra* y *A. indica*, *C. mollis* y *C. dodecandra*, las demás no presentaron diferencias entre sí. La radiación neta tuvo diferencias significativas en el factor tratamiento ($F=11.68$, $p<0.05$) y el factor especie ($F=147.09$, $p<0.05$), los tratamientos de asfalto y tierra no presentaron diferencias entre sí pero fueron diferentes a la corteza, en cuanto a las especies todas fueron diferentes entre sí. El calor latente esperado tuvo diferencias significativas en el factor especie ($F=12.08$, $p<0.05$), las especies sin diferencias entre sí fueron *C. mollis* y *B. alicastrum*, *C. dodecandra* y *A. indica*. La temperatura foliar no tuvo diferencia significativas en ningún factor.

Cuadro 2.12. Promedio ± error estándar en $W m^2$ de cada componente del balance de energía y temperatura foliar (°C) del día 10 de noviembre. Letras mayúsculas distintas en las columnas representan diferencias entre especies, letras minúsculas distintas representan diferencias entre tratamientos. Tukey ($\alpha=0.05$) ($n=36$).

	Tratamiento		
	Asfalto	Tierra	Corteza
C. sensible ($W m^2$)			
<i>Caesalpinia mollis</i>	209.65 ± 46.87	159.64 ± 11.51	298.87 ± 35.91
<i>Cordia dodecandra</i>	67.66 ± 27	142.77 ± 102.70	72.68 ± 29.85
<i>Azadirachta indica</i>	290.51 ± 139.80	135.39 ± 22.96	135.52 ± 48.39
<i>Brosimum alicastrum</i>	224.85 ± 31.28	172.30 ± 30.75	203.77 ± 68.56
Radiación neta ($W m^2$)	Asfalto ^(b)	Tierra ^(b)	Corteza ^(a)
<i>Caesalpinia mollis</i> ^(D)	748.45 ± 8.19 ^{(D),(b)}	783.01 ± 3.61 ^{(D),(b)}	807.93 ± 11.89 ^{(D),(a)}
<i>Cordia dodecandra</i> ^(B)	957.92 ± 16.99 ^{(B),(b)}	935.03 ± 32.14 ^{(B),(b)}	989.17 ± 9.22 ^{(B),(a)}
<i>Azadirachta indica</i> ^(A)	1007.95 ± 25.49 ^{(A),(b)}	1038.70 ± 4.26 ^{(A),(b)}	1059.01 ± 12.80 ^{(A),(a)}

<i>Brosimum alicastrum</i> ^(C)	798.38 ± 24.37 ^{(C),(b)}	832.82 ± 10.45 ^{(C),(b)}	879.50 ± 11.31 ^{(C),(a)}
C. latente potencial (W m²)	Asfalto	Tierra	Corteza
<i>Caesalpinia mollis</i>	1254.82 ± 138.20 ^(A)	1259.82 ± 56.84 ^(A)	1749.107 ± 125.18 ^(A)
<i>Cordia dodecandra</i>	693.15 ± 76.32 ^(B)	896.18 ± 252.08 ^(B)	703.26 ± 80.53 ^(B)
<i>Azadirachta indica</i>	1598.79 ± 452.85 ^(A)	1221.30 ± 247.29 ^(A)	1233.86 ± 136.63 ^(A)
<i>Brosimum alicastrum</i>	1007.88 ± 70.71 ^(A)	1014.09 ± 115 ^(A)	1048.48 ± 54.34 ^(A)
C. latente esperado (W m²)	Asfalto	Tierra	Corteza
<i>Caesalpinia mollis</i>	538.80 ± 55.06 ^(B)	623.36 ± 14.60 ^(B)	509.06 ± 46.22 ^(B)
<i>Cordia dodecandra</i>	890.25 ± 43.82 ^(A)	792.26 ± 134.83 ^(A)	916.49 ± 39.04 ^(A)
<i>Azadirachta indica</i>	717.43 ± 165.18 ^(A)	903.31 ± 24.38 ^(A)	923.49 ± 61.09 ^(A)
<i>Brosimum alicastrum</i>	573.52 ± 54.54 ^(B)	660.52 ± 40.31 ^(B)	675.73 ± 77.12 ^(B)
Temperatura foliar (°C)	Asfalto	Tierra	Corteza
<i>Caesalpinia mollis</i>	34.22 ± 0.64	33.14 ± 0.28	34.73 ± 0.93
<i>Cordia dodecandra</i>	32.61 ± 0.88	34.40 ± 2.51	32.58 ± 0.74
<i>Azadirachta indica</i>	34.67 ± 1.63	32.80 ± 0.82	33.02 ± 1.02
<i>Brosimum alicastrum</i>	37.08 ± 0.89	34.63 ± 0.82	35.25 ± 1.41

Descripción de los resultados del día 13 de noviembre (Cuadro 2.13). El calor sensible tuvo diferencias significativas en el factor especie ($F=3.314$, $p<0.05$), solo las especies *C. dodecandra* y *B. alicastrum* tuvieron diferencias entre sí. El calor latente potencial tuvo diferencias significativas en el factor especie ($F=6.885$, $p<0.05$), *C. dodecandra* tuvo diferencias con todas las especies, las demás especies no presentaron diferencias entre sí. La radiación neta tuvo diferencias en el factor tratamiento ($F=43.49$, $p<0.05$) y el factor especie ($F=261.13$, $p<0.05$), todos los tratamientos y todas las especies presentaron diferencias entre sí. El calor latente esperado tuvo diferencias en el factor tratamiento ($F=3.92$, $p<0.05$) y el factor especie ($F=22.24$, $p<0.05$), la tierra no tuvo diferencias con el asfalto ni con la corteza y todas las especies presentaron diferencias entre sí. La temperatura foliar tuvo diferencias entre especies ($F=4.855$, $p<0.05$). Las especies que presentaron diferencias fueron *B. alicastrum* y *A. indica*, *C. dodecandra* y *B. alicastrum*.

Cuadro 2.13. Promedio \pm error estándar en $W m^2$ de cada componente del balance de energía y temperatura foliar ($^{\circ}C$) del día 13 de noviembre. Letras mayúsculas distintas en las columnas representan diferencias entre especies, letras minúsculas distintas representan diferencias entre tratamientos. Tukey ($\alpha=0.05$) ($n=36$).

	Tratamiento		
	Asfalto	Tierra	Corteza
C. sensible ($W m^2$)			
<i>Caesalpinia mollis</i>	156.14 \pm 53.04 (A)	-0.918 \pm 15.51 (A)	53.70 \pm 30.48 (A)
<i>Cordia dodecandra</i>	12.72 \pm 29.64 (D)	-0.293 \pm 72.65 (D)	-7.01 \pm 28.01 (D)
<i>Azadirachta indica</i>	35.68 \pm 101.87 (C)	68.53 \pm 27.331 (C)	31.64 \pm 44.33 (C)
<i>Brosimum alicastrum</i>	155.00 \pm 14.33 (B)	116.56 \pm 22.68 (B)	100.05 \pm 58.44 (B)
Radiación neta ($W m^2$)			
<i>Caesalpinia mollis</i>	796.66 \pm 11.86 (D),(c)	802.69 \pm 3.08 (D),(b)	894.84 \pm 4.96 (D),(a)
<i>Cordia dodecandra</i>	1029.93 \pm 10.10 (B),(c)	991.03 \pm 26.04 (B),(b)	1075.37 \pm 9.87 (B),(a)
<i>Azadirachta indica</i>	1118.96 \pm 21.83 (A),(c)	1071.71 \pm 7.90 (A),(b)	1145.48 \pm 11.88 (A),(a)
<i>Brosimum alicastrum</i>	860.31 \pm 16.86 (C),(c)	838.64 \pm 70.71 (C),(b)	945.91 \pm 13.28 (C),(a)
C. latente potencial ($W m^2$)			
<i>Caesalpinia mollis</i>	957.49 \pm 139.54 (A)	688.39 \pm 64.19 (A)	813.62 \pm 155.71 (A)
<i>Cordia dodecandra</i>	421.95 \pm 85.26 (B)	455.90 \pm 110.91 (B)	415.88 \pm 77.34 (B)
<i>Azadirachta indica</i>	837.89 \pm 163.56 (A)	873.83 \pm 105.96 (A)	634.28 \pm 114.71 (A)
<i>Brosimum alicastrum</i>	797.95 \pm 55.90 (A)	738.64 \pm 74.64 (A)	725.68 \pm 66.59 (A)
C. latente esperado ($W m^2$)			
<i>Caesalpinia mollis</i>	640.52 \pm 64.87 (D),(a)	803.61 \pm 18.60 (D),(b)	841.14 \pm 35.42 (D),(a)
<i>Cordia dodecandra</i>	1017.21 \pm 39.74 (B),(a)	991.32 \pm 98.67 (B),(b)	1082.38 \pm 37.88 (B),(a)
<i>Azadirachta indica</i>	1083.27 \pm 123.61 (A),(a)	1003.18 \pm 34.91 (A),(b)	1113.84 \pm 56.22 (A),(a)
<i>Brosimum alicastrum</i>	705.31 \pm 30.30 (C),(a)	722.07 \pm 34.29 (C),(b)	845.86 \pm 71.11 (C),(a)
Temperatura foliar ($^{\circ}C$)			
<i>Caesalpinia mollis</i>	34.6 \pm 0.93 (C)	31.64 \pm 0.25 (C)	32.43 \pm 0.39 (C)
<i>Cordia dodecandra</i>	31.91 \pm 0.81 (B)	31.76 \pm 2.09 (B)	31.32 \pm 0.78 (B)
<i>Azadirachta indica</i>	32.65 \pm 1.74 (B)	32.85 \pm 0.95 (B)	32.29 \pm 0.95 (B)
<i>Brosimum alicastrum</i>	36.24 \pm 1.01 (A)	34.926 \pm 0.95 (A)	33.84 \pm 1.05 (A)

Descripción de los resultados del día 03 de diciembre (Cuadro 2.14). El calor sensible tuvo diferencias significativas entre especies ($F=4.552$, $p<0.05$). Dos grupos de especies presentaron diferencias entre sí, *B. alicastrum* y *A. indica*, *C. mollis* y *A. indica*. El calor latente potencial tuvo diferencias entre especies ($F=129.284$, $p<0.05$), solo las especies *C. dodecandra* y *B. alicastrum* no tuvieron diferencias significativas, las demás especies fueron diferentes entre sí. La radiación

neta tuvo diferencias en el factor tratamiento ($F=5.97$, $p<0.05$) y el factor especie ($F=39.86$, $p<0.05$), la corteza y el asfalto no presentaron diferencias entre sí pero fueron diferentes a la tierra, las especies *C. mollis* y *B. alicastrum* no presentaron diferencias entre sí, las demás especies presentaron diferencias entre sí. El calor latente esperado tuvo diferencias significativas en el factor especie ($F=19.95$, $p<0.05$), los grupos de especies *C. mollis* y *B. alicastrum*, *C. dodecandra* y *A. indica* fueron iguales entre sí. La temperatura foliar tuvo diferencias en el factor especie ($F=4.795$, $p<0.05$) y sólo el grupo de especies *B. alicastrum* - *A. indica* presentó diferencias entre sí, las demás especies fueron iguales entre sí.

Cuadro 2.14. Promedio \pm error estándar en $W m^2$ de cada componente del balance de energía y temperatura foliar ($^{\circ}C$) del día 03 de diciembre. Letras mayúsculas distintas en las columnas representan diferencias entre especies, letras minúsculas distintas representan diferencias entre tratamientos. Tukey ($\alpha=0.05$) ($n=36$).

	Tratamiento		
C. sensible ($W m^2$)	Asfalto	Tierra	Corteza
<i>Caesalpinia mollis</i>	124.83 \pm 49.68 (A)	140.57 \pm 91.23 (A)	248.89 \pm 93.25 (A)
<i>Cordia dodecandra</i>	98.72 \pm 23.80 (C)	55.25 \pm 56.79 (C)	106.84 \pm 69.27 (C)
<i>Azadirachta indica</i>	-23.02 \pm 24.08 (B)	38.08 \pm 18.52 (B)	49.02 \pm 22.73 (B)
<i>Brosimum alicastrum</i>	174.62 \pm 33.36 (A)	105.30 \pm 62.75 (A)	153.11 \pm 20.86 (A)
Radiación neta ($W m^2$)	Asfalto	Tierra	Corteza
<i>Caesalpinia mollis</i>	921.45 \pm 12.44 (C),(a)	804.43 \pm 22.10 (C),(b)	851.81 \pm 57.96 (C),(a)
<i>Cordia dodecandra</i>	1083.55 \pm 13.22 (B),(a)	1002.67 \pm 38.71 (B),(b)	1073.74 \pm 28.68 (B),(a)
<i>Azadirachta indica</i>	1164.15 \pm 64.73 (A),(a)	1080.43 \pm 5.20 (A),(b)	1179.33 \pm 6.08 (A),(a)
<i>Brosimum alicastrum</i>	892.04 \pm 45.46 (C),(a)	886.90 \pm 82.18 (C),(b)	969.44 \pm 10.17 (C),(a)
C. latente potencial ($W m^2$)	Asfalto	Tierra	Corteza
<i>Caesalpinia mollis</i>	657.20 \pm 22.28 (A)	676.17 \pm 12.81 (A)	680.89 \pm 11.84 (A)
<i>Cordia dodecandra</i>	357.39 \pm 30.83 (C)	378.40 \pm 30.34 (C)	429.62 \pm 18.88 (C)
<i>Azadirachta indica</i>	615.77 \pm 20.90 (B)	624.52 \pm 34.55 (B)	606.95 \pm 7.01 (B)
<i>Brosimum alicastrum</i>	392.82 \pm 21.65 (C)	424.62 \pm 22.72 (C)	403.04 \pm 76.34 (C)
C. latente esperado ($W m^2$)	Asfalto	Tierra	Corteza
<i>Caesalpinia mollis</i>	796.61 \pm 62.07 (B)	663.85 \pm 113.33 (B)	602.92 \pm 116.89 (B)
<i>Cordia dodecandra</i>	984.82 \pm 36.84 (A)	947.41 \pm 90.31 (A)	966.90 \pm 97.95 (A)
<i>Azadirachta indica</i>	1187.17 \pm 87.95 (A)	1042.35 \pm 23.73 (A)	1130.31 \pm 28.82 (A)
<i>Brosimum alicastrum</i>	717.42 \pm 21.78 (B)	781.60 \pm 103.88 (B)	816.32 \pm 31.01 (B)
Temperatura foliar ($^{\circ}C$)	Asfalto	Tierra	Corteza
<i>Caesalpinia mollis</i>	33.03 \pm 1 (A)	33.29 \pm 1.75 (A)	35.29 \pm 1.72 (A)

<i>Cordia dodecandra</i>	34.24 ± 1.04 ^(A)	32.79 ± 2.16 ^(A)	33.80 ± 2.13 ^(A)
<i>Azadirachta indica</i>	30.05 ± 0.50 ^(A)	31.4 ± 2.21 ^(A)	31.62 ± 0.49 ^(A)
<i>Brosimum alicastrum</i>	36.34 ± 1.05 ^(B)	34.01 ± 2.21 ^(B)	35.51 ± 0.77 ^(B)

Descripción de los resultados del día 11 de diciembre (Cuadro 2.15). El calor sensible tuvo diferencias en el factor especie (F=4.879, p<0.05). *A. indica* presentó diferencias con dos especies, *B. alicastrum* y *C. mollis*, el resto de grupos de especies no presentaron diferencias. El calor latente potencial no tuvo diferencias significativas en ningún factor. La radiación neta tuvo diferencias en el factor tratamiento (F=18.23, p<0.05) y en el factor especie (F=97.02, p<0.05), el asfalto y la corteza no presentaron diferencias entre sí, *C. mollis* y *B. alicastrum* fueron iguales, las demás especies fueron diferentes entre sí. El calor latente esperado tuvo diferencias significativas en el factor tratamiento (F=5.97, p<0.05) y el factor especie (F=19.83, p<0.05), asfalto y corteza no presentaron diferencias. Las especies *C. mollis* y *B. alicastrum* fueron iguales, las demás especies presentaron diferencias entre sí. La temperatura foliar presentó diferencias en el factor especie (F=7.058, p<0.05), dos pares de especies presentaron diferencias, *B. alicastrum* - *A. indica* y *C. dodecandra* - *A. indica*, las demás especies no presentaron diferencias.

Cuadro 2.15. Promedio ± error estándar en W m² de cada componente del balance de energía y temperatura foliar (°C) del día 11 de diciembre. Letras mayúsculas distintas en las columnas representan diferencias entre especies, letras minúsculas distintas representan diferencias entre tratamientos. Tukey (α=0.05) (n=36).

	Tratamiento		
	Asfalto	Tierra	Corteza
C. sensible (W m²)			
<i>Caesalpinia mollis</i>	106.62 ± 59.43 ^(A)	225.05 ± 64.21 ^(A)	165.22 ± 57.53 ^(A)
<i>Cordia dodecandra</i>	145.34 ± 37.78 ^(A)	124.42 ± 46.44 ^(A)	135.85 ± 62.23 ^(A)
<i>Azadirachta indica</i>	-10.75 ± 39.40 ^(B)	97.68 ± 43.56 ^(B)	21.85 ± 4.48 ^(B)
<i>Brosimum alicastrum</i>	136.14 ± 61.54 ^(A)	279.39 ± 54.97 ^(A)	171.15 ± 81.07 ^(A)
Radiación neta (W m²)			
<i>Caesalpinia mollis</i>	730.005 ± 17.29 ^{(C),(a)}	675.24 ± 25.18 ^{(C),(b)}	766.42 ± 16.79 ^{(A),(a)}
<i>Cordia dodecandra</i>	861.92 ± 15.39 ^{(B),(a)}	817.48 ± 30.23 ^{(B),(b)}	880.80 ± 31.31 ^{(A),(a)}
<i>Azadirachta indica</i>	1008.65 ± 11.23 ^{(A),(a)}	935.96 ± 8.78 ^{(A),(b)}	1011.22 ± 0.25 ^{(A),(a)}
<i>Brosimum alicastrum</i>	765.14 ± 26.32 ^{(C),(a)}	685.12 ± 13.24 ^{(C),(b)}	799.91 ± 28.50 ^{(A),(a)}
C. latente potencial (W m²)			
<i>Caesalpinia mollis</i>	901.93 ± 123.30	1186.75 ± 137.76	1089.67 ± 115.12
<i>Cordia dodecandra</i>	774.75 ± 116.45	714.44 ± 60.83	738.22 ± 126.35

<i>Azadirachta indica</i>	661.28 ± 89.06	1014.94 ± 265.66	906.49 ± 207.83
<i>Brosimum alicastrum</i>	711.62 ± 159.40	1183.71 ± 179.96	893.16 ± 72.98
C. latente esperado (W m²)	Asfalto ^(a)	Tierra ^(b)	Corteza ^(a)
<i>Caesalpinia mollis</i>	623.37 ± 76.68 ^{(C),(a)}	450.19 ± 87.21 ^{(C),(b)}	601.19 ± 74.33 ^{(C),(a)}
<i>Cordia dodecandra</i>	716.58 ± 52.15 ^{(B),(a)}	693.05 ± 76.67 ^{(B),(b)}	744.95 ± 93.25 ^{(B),(a)}
<i>Azadirachta indica</i>	1019.41 ± 50.64 ^{(A),(a)}	838.28 ± 51.02 ^{(A),(b)}	989.36 ± 4.58 ^{(A),(a)}
<i>Brosimum alicastrum</i>	628.99 ± 87.87 ^{(C),(a)}	405.73 ± 66.77 ^{(C),(b)}	628.76 ± 109.56 ^{(C),(a)}
Temperatura foliar (°C)	Asfalto	Tierra	Corteza
<i>Caesalpinia mollis</i>	31.29 ± 1.40 ^(B)	33.81 ± 1.43 ^(B)	32.51 ± 1.34 ^(B)
<i>Cordia dodecandra</i>	33.89 ± 1.21 ^(A)	33.98 ± 2.38 ^(A)	33.59 ± 2.23 ^(A)
<i>Azadirachta indica</i>	28.55 ± 0.94 ^(B)	30.69 ± 1.02 ^(B)	29.29 ± 0.02 ^(B)
<i>Brosimum alicastrum</i>	33.77 ± 2.09 ^(C)	37.09 ± 1.02 ^(C)	33.6 ± 1.52 ^(C)

2.4.6 EFICIENCIA CUÁNTICA MÁXIMA DEL FOTOSISTEMA II

No se encontraron diferencias significativas en la eficiencia cuántica máxima (F_v/F_m) en pre-alba entre tratamientos, pero sí se encontraron diferencias significativas entre especies ($F=34.420$, $p<0.05$) (Figura 2.8). No hubo interacción entre factores.

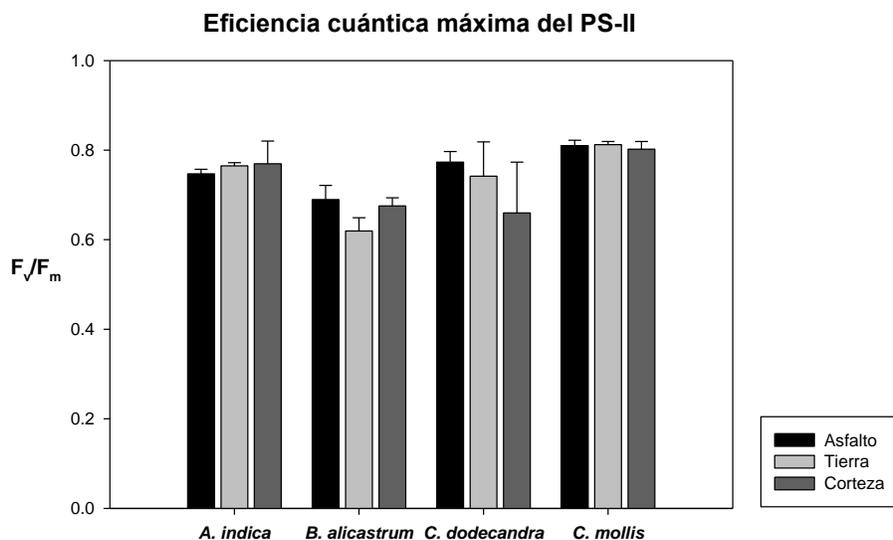


Figura 2.8. Promedio de la eficiencia cuántica máxima del fotosistema II (PS-II) en pre-alba por especie y tratamiento (n=36). Las barras superiores indican la desviación estándar. Letra mayúscula distinta indica diferencias entre especies. Tukey ($\alpha=0.05$).

2.4.7 PRUEBA BIOMECÁNICA

Prueba de flexión a tres puntos.

Los resultados de las pruebas indicaron que los tallos de las 4 especies tienen diferentes módulos de elasticidad, siendo *B. alicastrum* el que tiene mayor módulo de flexión como se puede apreciar en el Cuadro 2.16. Los datos del Cuadro 2.16 se calcularon a partir de las curvas mostradas en la Figura 2.10. Los resultados significan que *B. alicastrum* puede soportar una fuerza mayor sin deformarse de forma permanente. En contraste *C. dodecandra* presenta el menor módulo de flexión.

Cuadro 2.16. Módulo de flexión y máximo esfuerzo longitudinal de las especies probadas con desviación estándar (n=16). Tukey ($\alpha=0.05$).

Especie	Módulo de flexión (MPa)	Máximo esfuerzo longitudinal (MPa)
<i>Azadirachta indica</i>	1631.91 ± 803.71	30.57 ± 8.87
<i>Brosimum alicastrum</i>	4049.49 ± 860.71	64.48 ± 8.76
<i>Cordia dodecandra</i>	697.14 ± 197.30	17.77 ± 2.54
<i>Caesalpinia mollis</i>	3238.11 ± 965.56	48.90 ± 6.56

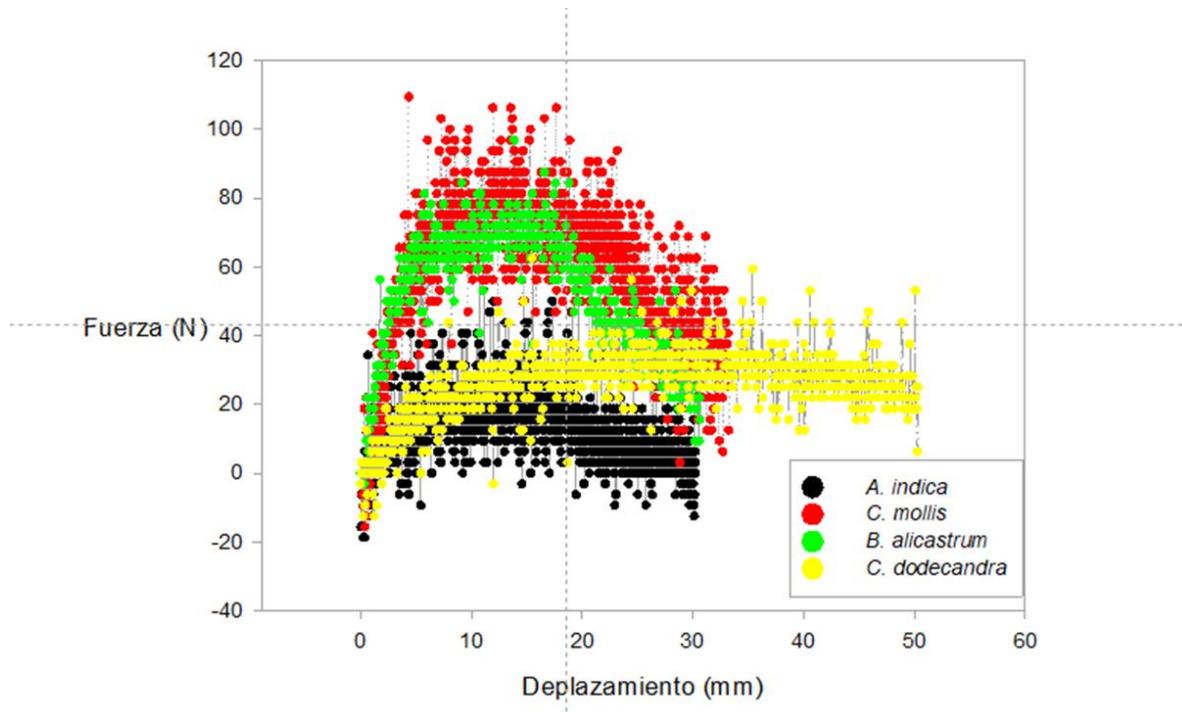


Figura 2.9. Gráfica de fuerza-deflexión de las 4 especies. Se eligió sólo una gráfica representativa por especie.

Se realizó un diseño aleatorizado para encontrar diferencias significativas en el módulo de flexión y el valor del máximo esfuerzo longitudinal. Se encontraron diferencias significativas en el módulo de flexión ($F=15.63$, $p<0.05$). *C. dodecandra* - *A. indica* y *C. mollis* - *B. alicastrum* no presentaron diferencias entre sí, mientras que las demás especies sí fueron diferentes entre sí.

El máximo esfuerzo longitudinal presentó diferencias significativas ($F=32.77$, $p<0.05$) entre las especies. Solo *C. dodecandra* - *A. indica* no presentó diferencias significativas entre sí, mientras que las demás especies sí fueron diferentes entre sí.

No fue posible realizar pruebas de biomecánica después de aplicar los tratamientos de asfalto, tierra y corteza como a los individuos de las secciones 2.2.5 y 2.2.6 debido a que las restricciones de acceso causaron retrasos e impidieron programar las pruebas a tiempo.

2.5 DISCUSIÓN

Balance de energía en hojas

En la hipótesis 1 se planteó que la superficie urbana (asfalto), causaría un mayor efecto en el balance de energía de las plantas, debido a su temperatura máxima promedio y su bajo albedo (Sen & Roesler, 2019); sin embargo, esto no se cumplió. No se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos en la mayoría de los componentes del balance de energía. En la radiación neta, donde la corteza tuvo el mayor efecto en este componente (su porcentaje de albedo fue de $15.59 \pm 3.81\%$), lo cual ha sido ya reportado por un estudio anterior (Montague et al., 1998). Estos autores compararon corteza de pino con césped como superficies circundantes para arbustos, siendo la corteza de pino la que absorbe menor energía, pero refleja más y deriva en un microambiente menos favorable al menos para las especies arbustivas.

Por otro lado, el ángulo de inclinación de las hojas tuvo influencia en la radiación neta que recibían las mismas. En la hipótesis 1 se planteó que las hojas grandes serían las más afectadas por las condiciones de radiación solar y reflejada, lo cual se cumplió parcialmente ya que *Cordia dodecandra* de hojas grandes, recibía una gran cantidad de radiación neta (día 11 de diciembre $861.92 \pm 15.39 \text{ W m}^2$, asfalto), debido a un menor ángulo de inclinación de sus hojas ($36.67 \pm 21.44 \text{ }^\circ\text{C}$). Sin embargo las hojas de *Azadirachta indica* consideradas como hojas pequeñas (hojas compuestas con foliolos), recibían mayor cantidad (día de 11 de diciembre $1008.65 \pm 11.23 \text{ W m}^2$, asfalto), debido igualmente al bajo ángulo de inclinación ($25.75 \pm 13.78 \text{ }^\circ\text{C}$). Esto se sustenta con lo reportado por (Sirvydas et al., 2010), los ángulos de oscilación de las hojas de sus especies de estudio influyen en la cantidad de radiación solar recibida, a una mayor oscilación donde la hoja quedaba más expuesta, la radiación solar recibida era mayor.

Derivado de los resultados en la radiación neta recibida, el calor latente esperado coincide parcialmente con la hipótesis 1. Las especies más afectadas por las condiciones de radiación solar fueron *A. indica* y *Cordia dodecandra*. Requieren una mayor cantidad de calor latente para mantener un balance de 0 (por ejemplo el 11 de diciembre en asfalto, $1019.41 \pm 50.64 \text{ W m}^2$, $716.58 \pm 52.15 \text{ W m}^2$, respectivamente). En condiciones urbanas esto puede significar una desventaja debido a las temperaturas ocasionadas por las islas de calor (Mohajerani et al., 2017; Sen & Roesler, 2019; Villanueva-Solis, 2017). Por otro lado *Caesalpinia mollis* de hojas pequeñas, es la especie que requiere menor cantidad de calor latente para mantener el balance (11 de diciembre, $623.37 \pm 76.68 \text{ W m}^2$, asfalto). También se ha reportado que esta planta puede desarrollarse en condiciones de alta radiación (Dzib-castillo et al., 2012) aunque este estudio no se realizó en condiciones urbanas y se hizo con plántulas. *C. dodecandra* requiere condiciones

de sombra (Tzuc et al., 2019), es una especie que en etapa juvenil es sensible al estrés hídrico y falta de agua, (Luna Flores et al., 2012), lo que implicaría una desventaja para su uso y plantación en su etapa juvenil para arbolado urbano en una ciudad con altas temperaturas en la mayor parte del año como Mérida. Finalmente, *A. indica* es una especie que puede estar adaptada tanto a condiciones de lluvias constantes como a condiciones de sequía (Kundu & Tigerstedt, 1998). Además, es una especie de alta demanda de luz cuando está en crecimiento (Puri & Swamy, 2001). En general, faltan estudios de estas especies en el arbolado urbano, por lo que solo se puede comparar con estudios en condiciones de altas temperaturas o similares.

Crecimiento y asignación

En la hipótesis 1 se esperaba que todas las especies tuvieran disminución en la tasa relativa de crecimiento, en el tratamiento del asfalto. Sin embargo, no existieron diferencias significativas entre tratamientos, solo entre especies y solo *Azadirachta indica* tuvo diferencias con las demás especies (Figura 2.6), al ser la especie de menor tasa de crecimiento. Esto puede estar relacionado con los efectos de la alta radiación solar, ya que, de acuerdo con los resultados del calor latente esperado, fue la especie que requeriría una mayor cantidad para mantener el balance en 0 (día de 11 de diciembre $1008.65 \pm 11.23 \text{ W m}^2$, asfalto). En el Cuadro 2.6 se observa que todas las especies presentaron una disminución en el área foliar específica, de acuerdo a lo reportado (Luna Flores et al., 2012; Tamayo-Chim et al., 2012) esto ocurre en respuesta a las condiciones extremas, ya sea estrés hídrico o en este caso la alta irradiación solar. También Tamayo-Chim et al. (2012), reportó que los miembros de Fabaceae, familia a la que pertenece *Caesalpinia mollis*, fueron las plantas que presentaron un menor cambio en la tasa relativa de crecimiento y el área foliar en condiciones de sequía, debido a las hojas compuestas y la variación del ángulo de inclinación de las hojas, lo que sustenta los resultados encontrados en este trabajo.

Transpiración

Solo dos días presentaron diferencias entre especies, esto se pudo deber a la variación de las condiciones climáticas, en temperatura y humedad como se observa en las gráficas (Figura 2.4) que a lo largo de los días del experimento afectaron las mediciones, además de las lluvias prolongadas. Por lo tanto, no se cumplió la parte de la hipótesis 1 donde se esperaba que las plantas de hojas grandes tengan una mayor transpiración que las de hojas pequeñas. Luna-Flores et al. (2012) reportan diferencias significativas en las tasas de transpiración de sus especies, utilizando el mismo método por diferencia de pesos, pero esto fue realizado en condiciones controladas en un vivero, es decir que las cantidades de luz, radiación y humedad fueron las mismas y constantes en todos los días. En este trabajo las cantidades de radiación incidente

(onda corta y larga) fueron variables (Figura 2.4), principalmente debido a la nubosidad, por lo tanto la humedad relativa variaba.

Eficiencia cuántica máxima del fotosistema II

En la hipótesis 1 se esperaba que existieran diferencias significativas entre tratamientos, donde las plantas en el tratamiento con el asfalto (superficie urbana) deberían presentar la menor eficiencia cuántica del fotosistema II (F_v/F_m), pero no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos. Únicamente hubo diferencias en F_v/F_m entre especies. *Caesalpinia mollis* fue la especie con mayor F_v/F_m y fue la especie con mayor biomasa final en todos sus componentes, debido a que recibió la menor cantidad de radiación solar debido al ángulo de inclinación de sus hojas. *Brosimum alicastrum* mostró la eficiencia más baja y fue la única que presentó diferencias significativas con respecto a las demás especies (Figura 2.8) parcialmente se cumple la hipótesis 1 donde se indicaba que las hojas grandes se verían más afectadas por las condiciones así como reportan (Gamon & Pearcy, 1990; Hu et al., 2020), sin embargo su tasa de crecimiento no fue diferente al resto de las especies.

Prueba biomecánica

La hipótesis 2 no se pudo comprobar por cuestiones logísticas. Es decir, no se realizaron las pruebas después de aplicados los tratamientos para las resistencias de los tallos, aunque se ya se mencionó que no hubo diferencias entre tratamientos en el crecimiento y biomasa vegetal. Existieron diferencias significativas entre las especies, tanto *A. indica* como *C. dodecandra* mostraron no ser muy resistentes a fuerzas aplicadas al tallo. Por otro lado *B. alicastrum* fue la especie que tuvo mayor resistencia a la flexión como se observa en la curva de fuerza-deflexión (Figura 2.10). Esto podría deberse a que es la única de las especies que posee un tipo de látex dentro del tallo, lo cual puede contribuir a que tenga una mayor flexibilidad y resistencia a la deformación, esta información se sustenta con lo descrito en la literatura (Robertson et al., 2015; Shah et al., 2017; Sorieul et al., 2016; van Casteren et al., 2012), donde se explica que los tallos menos rígidos, son los de menor densidad de madera además de la influencia de las fibras formadas por las células vegetales. *C. dodecandra* fue de las menos resistentes a fuerzas de flexión debido a su madera densa. Se necesita más investigación acerca de la anatomía de las especies para entender cómo influye en las propiedades biomecánicas.

CAPITULO III

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

3.1 CONCLUSIONES

Aunque hubo mucha variación en las condiciones ambientales en los días del experimento, las especies respondieron diferencialmente, siendo *Caesalpinia mollis* la menos afectada y con base en el análisis del aspecto fisiológico del balance de energía. Al variar el ángulo de inclinación de los folíolos de sus hojas, esta especie minimiza el efecto de la radiación incidente en las horas de mayor intensidad solar. Por consiguiente, mantiene la actividad fotosintética para asimilar mayor cantidad de carbono que las otras especies, favoreciendo su crecimiento (Poorter, 2001; Tamayo-Chim et al., 2012).

La evaluación del balance de energía demostró que sus componentes se relacionan directamente con otras variables fisiológicas como el crecimiento. Sin embargo, se esperaba que las dos especies de hojas grandes se vieran más afectadas en la fisiología, en este caso *Azadirachta indica* de hojas pequeñas tuvo el menor crecimiento y recibió mayor cantidad de radiación. En el caso de la transpiración, tampoco hubo diferencias entre especies con hojas de mayor tamaño con respecto a las de hojas pequeñas, por lo que se tendría que evaluar con otro método.

Para realizar una recomendación de especie para el arbolado urbano se requeriría repetir el experimento en tiempos de sequía, donde la radiación es incluso mayor, las temperaturas del ambiente son más altas y el déficit de presión de vapor también, así se tendría información acerca de cómo *C. mollis* podría responder a condiciones más extremas.

3.2 PERSPECTIVAS

Características del microambiente

El experimento se llevó a cabo al final de la época de lluvias de octubre a noviembre del 2020, uno de los períodos más lluviosos de la historia de Yucatán, por lo que se debe reproducir en otra época para evaluar las respuestas de las especies en condiciones más extremas.

Tratamientos con superficies

Para próximos experimentos se propone aumentar el área de efecto de los tratamientos, esto podría contribuir a que la retención del calor sea por mayor tiempo o el área de reflejo

y albedo sea mayor, además se reduciría el efecto del perímetro. Asimismo, se sugiere probar con una superficie con mucho mayor albedo como el concreto, el cual predomina en las condiciones urbanas. Por último, se podrían realizar mediciones del balance en distintos momentos del día para observar si el calor acumulado por las superficies tiene influencia en las temperaturas foliares cuando la radiación solar vaya disminuyendo hasta el anochecer.

Balance de energía

Para futuros estudios acerca del balance de energía en hojas, se sugiere tomar en cuenta que la ecuación para la capa límite no contempla el área total de la hoja, solo el largo que se vea más influenciado por la velocidad y dirección del viento. La dirección del viento no siempre fluirá a lo largo de la hoja, puede ser en diagonal entre ambos ejes de la hoja, por lo que para futuros estudios se debería contemplar una ecuación que considere el área completa de la hoja a estudiar y así poder calcular la capa límite. También influye el ángulo de inclinación de las hojas al momento de estar en contacto con el viento, por lo que la capa límite también se ve modificada.

Para la obtención del coeficiente de absorción foliar de onda corta, se debe usar una esfera de Ulbricht o integradora de radiación. Este instrumento posee un recubrimiento altamente reflejante en su interior. Mediante una fuente de luz conocida, la cual se refleja en la forma cóncava del interior de la esfera y con ayuda de un sensor de cuantos, es posible medir la cantidad de luz que absorbería una hoja, sin los efectos de otros cuerpos u objetos cercanos. Si bien no existen fabricantes específicos de estos equipos para los tamaños que requieren las hojas, es posible desarrollar un equipo con un funcionamiento similar, teniendo los sensores y los materiales disponibles en los laboratorios.

Por último, el calor latente, que se calcula con las ecuaciones, no toma en cuenta el cierre de estomas de las plantas a determinada hora del día cuando el déficit de presión de vapor y la temperatura estén en el punto más alto. Se sugiere medir el intercambio de gases a distintas horas del día para encontrar diferencias entre especies y cuáles tendrían cierre de estomas a las horas con mayor temperatura ambiental.

Prueba biomecánica

La prueba de flexión a tres puntos únicamente proporciona el valor de la resistencia en un determinado punto de un segmento del tallo, por lo que se usaron segmentos lo más

uniformes posibles, ya que esta prueba está diseñada para materiales isotrópicos como lápices o tubos. El resultado no significa que el valor en el punto medio donde se aplica la fuerza en la prueba de tres puntos sea el valor en todo el material, ya que en su mayoría los tallos no son uniformes. Es posible que se requiera hacer un análisis de la anatomía de los tejidos internos de los tallos por medio de micrografías con el fin de observar las diferencias entre cada especie y con base en ello aplicar otras pruebas que puedan generar más información acerca de estas propiedades mecánicas en los árboles juveniles, como podría ser la prueba de flexión a cuatro puntos. Por último, se recomienda hacer las pruebas después de someter a las plantas a tratamientos de estrés por altas temperaturas ocasionadas por las superficies el medio urbano y comprobar que, al modificarse el crecimiento, también se podrían modificar las propiedades de algunos tejidos y por lo tanto las propiedades biomecánicas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Asphalt Pavement Alliance. (2010). CARBON FOOTPRINT: How does asphalt stack up? *Asphalt Pavement Alliance*, 4.
http://www.asphaltroads.org/assets/_control/content/files/carbon_footprint_web.pdf
- Ayuntamiento de Mérida 2018-2021. (2018). Estudio diagnóstico del arbolado urbano en parques público de Mérida.
- Ayuntamiento de Mérida 2018-2021. (2018). Inventario del arbolado urbano de la ciudad de Mérida.
- Ayuntamiento de Mérida 2018-2021. (2018). Plan municipal de infraestructura verde. <http://www.merida.gob.mx/sustentable/plan-de-infraestructura-verde.php>
- Ballinas, M., & Barradas, V. L. (2016). The Urban Tree as a Tool to Mitigate the Urban Heat Island in Mexico City: A Simple Phenomenological Model. *Journal of Environmental Quality*, 45(1), 157–166.
<https://doi.org/10.2134/jeq2015.01.0056>
- Bhatla, S. C., & A. Lal, M. (2018). Plant Physiology, Development and Metabolism. In *Plant Physiology, Development and Metabolism*.
<https://doi.org/10.1007/978-981-13-2023-1>
- Cerón-Palma, I., Sanyé-Mengual, E., Oliver-Solà, J., Montero, J. I., Ponce-Caballero, C., & Rieradevall, J. (2013). Towards a green sustainable strategy for social neighbourhoods in Latin America: Case from social housing in Merida, Yucatan, Mexico. *Habitat International*, 38(1), 47–56.
<https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2012.09.008>
- Cruz Fernandez, M., & Sánchez, R. (2004). El árbol del nim, establecimiento y aprovechamiento en la Huasteca Potosina. *INIFAP-CIRNE, Primera*(3), 23.
<http://www.campopotosino.gob.mx/modulos/Docs-descargar/FOLL.TEC.003.pdf>

- Dzib-castillo, B. B., Wal, H. Van Der, Chantásig-vaca, C. I., Antonio, P., Mendoza, M., & Pat, M. (2012). Emergence of seedlings of native timber trees of Yucatan Peninsula. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 3(10), 77–87.
- Flores de la O, J. L., Villanueva-Solis, J., & Quiroa Herrera, J. A. (2018). Evaluación de los efectos microclimáticos que tiene la vegetación en la mitigación de la isla de calor urbana: Parque en la ciudad de Torreón, México. *Revista de Ciencias Ambientales*, 52(2), 123–140.
<https://doi.org/10.15359/rca.52-2.7>
- Gamon, J. A., & Pearcy, R. W. (1990). Photoinhibition in *Vitis californica*: The role of temperature during high-light treatment. *Plant Physiology*, 92(2), 487–494.
<https://doi.org/10.1104/pp.92.2.487>
- García Castro, K. D., Romo-Campos, R. de L., Pereira, C. J., & Gómez-Rubio, R. (2018). Tasa relativa de crecimiento en plántulas de dos poblaciones de *Magnolia pugana* (Magnoliaceae) en distintos niveles de luz y fertilidad del suelo. *Revista de Biología Tropical*, 66(2), 622.
<https://doi.org/10.15517/rbt.v66i2.33394>
- Gastwirth, J. L., Gel, Y. R., Wallace Hui, W.L., Lyubchich, Vyacheslav., Miao, Weiwen., & Noguchi, Kimihiro. (2020). lawstat: Tools for Biostatistics, Public Policy, and Law. R package version 3.4. <https://CRAN.R-project.org/package=lawstat>
- González Moreno, S., Perales Vela, H., & O Salcedo Álvarez, M. (2008). La fluorescencia de la clorofila a como herramienta en la investigación de efectos tóxicos en el aparato fotosintético de plantas y algas. *Revista de Educación Bioquímica*, 27(4), 119–129.
- Hernández-González, O., Vergara-Yoisura, S., & Larqué-Saavedra, A. (2014). Primeras etapas de crecimiento de *Brosimum alicastrum* Sw. en Yucatán. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 6(27), 38–48.
<https://doi.org/10.29298/rmcf.v6i27.279>

- Hernandez-Stefanoni, J. L., & Ponce-Hernandez, R. (2006). Mapping the spatial variability of plant diversity in a tropical forest: Comparison of spatial interpolation methods. *Environmental Monitoring and Assessment*, 117(1–3), 307–334. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-0885-z>
- Hu, S., Ding, Y., & Zhu, C. (2020). Sensitivity and Responses of Chloroplasts to Heat Stress in Plants. *Frontiers in Plant Science*, 11(April), 1–11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00375>
- Ikechukwu, E. E. (2015). The Effects of Road and Other Pavement Materials on Urban Heat Island (A Case Study of Port Harcourt City). *Journal of Environmental Protection*, 06(04), 328–340. <https://doi.org/10.4236/jep.2015.64033>
- Jones, H. G. (2014). Plants and microclimate. In *Cambridge University Press*.
- Kume, A. (2017). Importance of the green color, absorption gradient, and spectral absorption of chloroplasts for the radiative energy balance of leaves. *Journal of Plant Research*, 130(3), 501–514. <https://doi.org/10.1007/s10265-017-0910-z>
- Kundu, S. K., & Tigerstedt, P. M. A. (1998). Variation in net photosynthesis, stomatal characteristics, leaf area and whole-plant phytomass production among ten provenances of neem (*Azadirachta indica*). *Tree Physiology*, 19, 47–52. <http://www.heronpublishing.com>
- Lambers, H., Chapin III, F. S., & Pons, T. L. (2008). Plant physiological ecology. In *Springer*.
- Łoboda, A. M., Przyborowski, Karpiński, M., Bialik, R. J., & Nikora, V. I. (2018). Biomechanical properties of aquatic plants: The effect of test conditions. *Limnology and Oceanography: Methods*, 16(4), 222–236. <https://doi.org/10.1002/lom3.10239>
- Luna Flores, W., Estrada Medina, H., Jiménez Osornio, J. J. ., & Pinzón López, L. L. (2012). Efecto del estrés hídrico sobre el crecimiento y eficiencia del uso

- del agua en plántulas de tres especies arbóreas caducifolias. *Terra Latinoamericana*, 30(4), 343–353.
- Maxwell, K., & Johnson, G. N. (2000). Chlorophyll fluorescence-a practical guide. *Journal of Experimental Botany*, 51(345), 659–668.
<https://doi.org/10.1016/j.rsci.2018.02.001>
- Mendiburu, F. (2020). agricolae: Statistical Procedures for Agricultural Research. R package version 1.3-3. <https://CRAN.R-project.org/package=agricolae>
- Mohajerani, A., Bakaric, J., & Jeffrey-Bailey, T. (2017). The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete. *Journal of Environmental Management*, 197, 522–538.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.095>
- Montague, T., Kjelgren, R., & Rupp, L. (1998). Surface energy balance affects gas exchange of three shrub species. *Journal of Arboriculture*, 24(5), 254–262.
- Montero Solís, F. M., Valdez Hernández, J. I., De Los Santos Posadas, H. M., Cetina Alcalá, V. M., & Rafael, S. V. L. (2011). Crecimiento inicial de especies arbóreas multipropósito en un terreno ganadero del norte de Veracruz. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(3), 53–68.
- Morales Ortiz, E. ., & Herrera Tuz, L. G. (2009a). Ciricote (*Cordia dodecandra* A.DC.) Protocolo para su colecta, beneficio y almacenaje. *Comisión Nacional Forestal*, 1–13. / CONABIO%0A/biodiversidad_mexicana /biodiversidadmexico%0Ahttps://enciclovida.mx/especies/154535-cordia-docecandra
- Morales Ortiz, E. ., & Herrera Tuz, L. G. (2009b). RAMON (*Brosimum alicastrum* Swartz .) Protocolo para su colecta, beneficio y almacenaje. *Comisión Nacional Forestal*, 1–17.
- Murchie, E. H., & Lawson, T. (2013). Chlorophyll fluorescence analysis: A guide to good practice and understanding some new applications. *Journal of Experimental Botany*, 64(13), 3983–3998. <https://doi.org/10.1093/jxb/ert208>

Niklas, K. J. (1992). Plant Biomechanics: an engineering approach to plant form and function. In *Brittonia* (Issue 1). <https://doi.org/10.2307/2807461>

Nobel, P. S. (2009). Physicochemical and environmental plant physiology. In *Academic Press*.

Oke, T. R. (1988). The urban energy balance. *Progress in Physical Geography*, 12(4), 471–508. <https://doi.org/10.1177/030913338801200401>

Orellana, R., Carrillo, L., & Franco, V. (2007). *Árboles recomendables para las calles de las ciudades de la Península de Yucatán*.

Pérez Medina, S., & López Falfán, I. (2015). Áreas verdes y arbolado en Mérida, Yucatán. Hacia una sostenibilidad urbana. *Economía Sociedad y Territorio*, 15(47), 1–33. <https://doi.org/10.22136/est002015552>

Pimienta Barrios, E., Robles Murgía, C., Carvajal, S., Muñoz Urias, A., Martínez Chávez, C., & de León Santos, S. (2011). Environmental Services of Vegetation in Urban Ecosystems in the Context of Climate Change. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(22), 15.

Poorter, L. (2001). Light-dependent changes in biomass allocation and their importance for growth of rain forest tree species. *Functional Ecology*, 15(1), 113–123. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2435.2001.00503.x>

Puri, S., & Swamy, S. L. (2001). Growth and biomass production in *Azadirachta indica* seedlings in response to nutrients (N and P) and moisture stress. *Agroforestry Systems*, 51, 57–68.

R Core Team. (2020). R: A language and environment for statistical computing. *R Foundation for Statistical Computing*, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

RStudio Team (2020). RStudio: Integrated Development for R. RStudio, PBC, Boston, MA URL <http://www.rstudio.com/>

- Robertson, D. J., Smith, S. L., & Cook, D. D. (2015). On measuring the bending strength of septate grass stems. *American Journal of Botany*, 102(1), 5–11. <https://doi.org/10.3732/ajb.1400183>
- Schulze, E., Müller-hohenstein, K., & Scherer-lorenzen, M. (2019). *Plant Ecology*.
- Sen, S., & Roesler, J. (2019). Thermal and optical characterization of asphalt field cores for microscale urban heat island analysis. *Construction and Building Materials*, 217, 600–611. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.091>
- Shah, D. U., Reynolds, T. P. S., & Ramage, M. H. (2017). The strength of plants: Theory and experimental methods to measure the mechanical properties of stems. *Journal of Experimental Botany*, 68(16), 4497–4516. <https://doi.org/10.1093/jxb/erx245>
- Shashua-Bar, L., Pearlmutter, D., & Erell, E. (2009). The cooling efficiency of urban landscape strategies in a hot dry climate. *Landscape and Urban Planning*, 92(3–4), 179–186. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2009.04.005>
- Sirvydas, A., Kučinskas, V., Kerpauskas, P., Nadzeikiene, J., & Kusta, A. (2010). Solar radiation energy pulsations in a plant leaf. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 18(3), 188–195. <https://doi.org/10.3846/jeelm.2010.22>
- Sorieul, M., Dickson, A., Hill, S. J., & Pearson, H. (2016). Plant fibre: Molecular structure and biomechanical properties, of a complex living material, influencing its deconstruction towards a biobased composite. In *Materials* (Vol. 9, Issue 8). <https://doi.org/10.3390/ma9080618>
- Su, Y., Liu, L., Liao, J., Wu, J., Ciais, P., Liao, J., He, X., Liu, X., Chen, X., Yuan, W., Zhou, G., & Laforteza, R. (2020). Phenology acts as a primary control of urban vegetation cooling and warming: A synthetic analysis of global site observations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 280(September 2019). <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107765>
- Tamayo-Chim, M., Reyes-García, C., & Orellana, R. (2012). A combination of

forage species with different responses to drought can increase year-round productivity in seasonally dry silvopastoral systems. *Agroforestry Systems*, 84(2), 287–297. <https://doi.org/10.1007/s10457-011-9470-8>

Tzuc, J. E. H., Dzib Castillo, B. B., Pool, W. S. P., & Médina, R. A. C. (2019). Efecto de la sombra sobre la emergencia de plántulas de especies maderables nativas de la Península de Yucatán. *Acta Universitaria*, 29, 1–10. <https://doi.org/10.15174/au.2019.1832>

van Casteren, A., Sellers, W. ., Thorpe, S. K. ., Coward, S., Crompton, R. ., & Ennos, A. . (2012). Why don't branches snap? The mechanics of bending failure in three temperate angiosperm trees. *Trees*, 26, 789–797.

Velasco Bautista, E., Cortés Barrera, E. N., González Hernández, A., Moreno Sánchez, F., & Benavides Meza, H. M. (2018). Diagnóstico Y Caracterización Del Arbolado Del Bosque De San Juan De Aragón. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 4(19), 102–112. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v4i19.382>

Villanueva-Solis, J. (2017). Urban Heat Island Mitigation and Urban Planning: The Case of the Mexicali, B. C. Mexico. *American Journal of Climate Change*, 06(01), 22–39. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2017.61002>

Yam-Chin, C., Montañez-Escalante, P., & Ruenes-Morales, R. (2014). Crecimiento de plantas jóvenes de *Cordia dodecandra* (Boraginaceae) en tres etapas sucesionales de vegetación en Calotmul, Yucatán. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85(2), 589–597. <https://doi.org/10.7550/rmb.34996>