



Mérida
Ciudad Blanca
AYUNTAMIENTO 2015-2018

Inventario del Arbolado Urbano de la Ciudad de Mérida



Resumen

La ciudad de Mérida es la más importante del SE de México por su historia, desarrollo, población y cultura. En los últimos años ha tenido un crecimiento bastante acelerado y en este proceso las áreas verdes se han visto afectadas. La presente administración municipal con la intención de planear correctamente el desarrollo del arbolado decidió llevar a cabo un inventario del arbolado urbano de la ciudad y con tal motivo desde octubre del 2016 se iniciaron los trabajos de toma de datos para analizar la composición y estructura del arbolado y con la herramienta i-Tree poder obtener el servicio ambiental que este provee a la ciudad. El inventario arroja que existen en las **24,000** ha de la mancha urbana cerca de **2,318,000** arboles con una cobertura arbórea del **21.2%** donde las principales especies fueron Waxim, Naranja Agria y Jabín. El tamaño del arbolado es pequeño ya que el **64.4%** de la población se encuentra por debajo de los **15.2** cm de diámetro y la altura promedio fue de **6 m**. Se identificaron **134** especies de las cuales el 15 % (**21** especies) representan al **70%** de la población.

Se encontró que el **10%** de la población son palmas, el **20%** frutales y el resto árboles. La densidad de árboles en toda el área de estudio fue de **96 árboles/ha**. pero el rango es de 117 hasta 42 árboles/ha.

Con esta estructura del arbolado se tienen servicios ambientales por concepto de secuestro de carbono anual de **16,637** t/año, con 11 especies fijando el 50% del total, entre ellas el Waxim, la Naranja, jabín y Chaka. Sin embargo, la tasa neta descontando las bioemisiones de los mismos arboles es de **12,333** t/año y su equivalente en CO₂ es de **45,277** t/año. Entre toda la población actualmente se tienen **182,100 t** de Carbono fijo en madera, con un valor estructural de US\$**648** millones de dólares de acuerdo a la metodología de valuación de la herramienta de i-tree ECO. Sobre oxígeno producido por el arbolado, en la actualidad se tiene que alcanza las **32,890** toneladas y el arbolado fija 175,600 toneladas de diversos contaminantes como PM2.5, SO₂, NO₂, O₃ y CO.

Autor

M.Sc. Horacio de la Concha, Director general de Agrinet SA de CV, quien fue responsable de la definición del perfil del proyecto, capacitación a cuadrillas en la toma de datos, integridad de la información, proceso y elaboración del reporte.

Co-autores

Arq. María Leticia Roche Cano, Jefe de Preservación y Conservación Ambiental del Ayuntamiento de Mérida, responsable de la supervisión y seguimiento de las cuadrillas de campo y recopilación de información.

L.A.R.N. Adriana García Burgos Coordinadora de Servicios Internos y del Plan de Infraestructura Verde, participo en el diseño, capacitación, identificación de especies y fue responsable de la supervisión y seguimiento de las cuadrillas de campo y recopilación de información

Reconocimientos

Este trabajo no hubiera sido posible sin el apoyo del personal de la Unidad de Desarrollo Sustentable dirigida por L.A.R.N. Sayda M. Rodríguez Gómez, M.I. que tuvo la visión para realizar este primer inventario de una ciudad en México con la herramienta i-Tree. También se reconoce la labor del personal de la unidad en la supervisión y seguimiento en campo de las cuadrillas de toma de datos, identificación de especies y compilación de la información. Por supuesto también a los muchachos voluntarios del servicio social que sufrieron las inclemencias de las altas temperaturas en el campo para la recopilación de la información y muchos más que participaron en la toma de datos, captura y revisión y que para efecto de no dejar a nadie fuera no los mencionaremos por nombre, pero sabemos quiénes fueron.

Este reporte está adaptado del reporte standard de la herramienta i-Tree Eco V6.1.18 que se elabora después de enviar la información dasométrica para su proceso al servidor de i-Tree en Ohio. Esta herramienta fue desarrollada por el USDA FS-Northern Research Stations (NRS), USDA Estatal y empresas forestales y Davey Tree Expert Co. Y el SUNY Escuela de ciencias forestales y ambientales

INDICE

ÍNDICE DE CUADROS Y FIGURAS.	1
RESUMEN EJECUTIVO	2
1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	6
1.1 OBJETIVO GENERAL	7
1.2 OBJETIVOS PARTICULARES	7
2. METODOLOGÍA	8
3. RESULTADOS	10
3.1 ANÁLISIS DE LAS PARCELAS	10
3.2 ESTRUCTURA DEL ARBOLADO	12
3.2.1 ESPECIES	12
3.2.2 CANTIDADES Y DENSIDAD DE ÁRBOLES	14
3.2.3 TAMAÑO	15
3.2.3 ALTURA	17
3.2.4 CONDICIONES	18
3.2.4 ÍNDICES BIOLÓGICOS	19
4. SERVICIO AMBIENTAL DEL ARBOLADO DE MÉRIDA	24
4.1 FIJACIÓN DE CO ₂	24
4.2 FIJACIÓN NETA DE CARBONO	27
4.2 INCREMENTO EN INFILTRACIÓN	29
4.2.1 REDUCCIÓN DE ESCORRENTÍA POR ESTRATO	31
4.3 PRODUCCIÓN DE OXÍGENO	31
4.4 REMOCIÓN DE CONTAMINANTES	32
4.5 BIOEMISIONES DE LOS ÁRBOLES	34
5. CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES	36
5.1 ARBOLADO	37
5.2 SERVICIO AMBIENTAL	39
5.3 PRONÓSTICOS	40
5.4 METAS POTENCIALES PARA ESTABLECER	42
5.5 RECOMENDACIONES	42
5.5.1 LINEAMIENTOS GENERALES	42
5.5.2 PARA EL SEGUIMIENTO Y MEJORA CONSTANTE	44
5.5.3 PARA LA SELECCIÓN DE ESPECIES	44
ANEXO I. LISTADO DE ESPECIES CON CLAVES DE I-TREE	48
ANEXO IA. LISTADO DE ESPECIES RECOMENDADAS POR I-TREE SPECIES	49
ANEXO II. MODELO ECO Y MEDICIONES DE CAMPO PARA I-TREE	50
ANEXO III. EFECTOS RELATIVOS DEL ARBOLADO	54
ANEXO IV. RECOMENDACIONES GENERALES PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL AIRE	55
7. CITAS BIBLIOGRÁFICAS	56

Índice de Cuadros Y Figuras.

Cuadro 1. Distritos establecidos en Mérida y sus características en el inventario.	8
Cuadro 2. Parámetros dasométricos medidos en los árboles y su explicación.	9
Cuadro 3. Listado de especies más importantes y su cantidad en la población.	13
Cuadro 4. Distribución de la población por distrito y densidad por hectárea en Mérida, Yuc.	14
Cuadro 5. IDR de las especies de árboles del inventario, (porcentaje de la población de la especie).	22
Cuadro 6. Índices de diversidad por distritos agrupados por tamaño.	23
Cuadro 7. Área foliar por hectárea en porcentaje y densidad por estrado para Mérida.	24
Cuadro 8. Carbono fijo por distrito y por unidad de área y su equivalencia en CO ₂	25
Cuadro 9. Capacidad de secuestro bruto y neto de carbono por distrito en Mérida.	29
Cuadro 10. Efecto sobre la infiltración y reducción de drenaje de las principales especies en Mérida.	30
Cuadro 11. Producción de oxígeno por las especies más importantes de árboles en Mérida.	31
Cuadro 12. Fijación de contaminantes/especie en orden de importancia relativa y de posición en la tabla de población.	32
Cuadro 13. Especies más importantes para el servicio ambiental de remoción de contaminantes en EUA.	33
Cuadro 14. Comparativo de producción de VOC entre dos ciudades y Mérida.	34
Cuadro 15. Comparativo del arbolado de Mérida con otras ciudades.	37
Cuadro 16. Comparativo relativo del arbolado de Mérida con otras ciudades en función a su superficie y población.	38
Cuadro 17. Pronóstico de población y capacidad de secuestro de C para 3 escenarios de reforestación durante 15 años en Mérida.	41
Cuadro 18. Porcentaje de árboles vivos en la población por su región de origen en el inventario.	45
Cuadro 19. Familias más representativas en el inventario por grupo.	45
Cuadro 20. Familias recomendadas por i-Tree especies para Mérida.	46
Figura 1 Distritos de Mérida y su superficie.	9
Figura 2 Porcentaje de usos de suelo identificados en el inventario de Mérida, Yuc. por distrito.	10
Figura 3 Porcentaje de cobertura arbórea y espacio Plantable por distrito en Mérida Yuc. las líneas rojas indican el promedio general.	11
Figura 4 Cubierta de suelo encontrada en el inventario de Mérida, Yuc.	11
Figura 5 Especies más importantes encontradas en Mérida divididas por grupo; palmas, frutales y árboles.	12
Figura 6 Diámetros de los árboles muestreados en el inventario.	15
Figura 7 Tamaño de los árboles por clase Diamétrica y el acumulado.	15
Figura 8 Distribución de altura de los árboles muestreados para el inventario de Mérida.	16
Figura 9 Diámetros de las principales especies del inventario de Mérida, Yuc.	17
Figura 10 Condición de copa de la población de árboles del inventario de Mérida, Yucatán.	18
Figura 11 Condición de copa de las principales especies en el Inventario de Mérida, Yucatán.	19
Figura 12 Valor de importancia (%) e IDR de las especies más relevantes en el inventario de Mérida.	20
Figura 13 IDR para Palmas y Frutales en paréntesis el porcentaje de la especie de la población total.	21
Figura 14 Carbono fijo en madera para las principales especies del arbolado de Mérida.	25
Figura 15 Capacidad de fijación anual de C por las principales especies de Mérida.	26
Figura 16 Secuestro de carbono bruto, neto y equivalente en CO ₂ por Distrito en Mérida.	27
Figura 17 Capacidad de fijación de Carbono Neto y la reducción con el bruto de las principales especies de árboles en Mérida.	28
Figura 18 Efecto del arbolado por distrito en el incremento de infiltración.	30
Figura 19 Producción de oxígeno por distrito en Mérida.	31
Figura 20 Remoción mensual de contaminantes en Mérida en kg.	33
Figura 21 Producción de VOC por las principales especies de árboles de Mérida.	34
Figura 22. Distribución de la población de árboles por distrito y % de cobertura.	36
Figura 23 Efectos del cambio climático en la vegetación urbana y puntos susceptibles de alterar con manejo.	39

Resumen Ejecutivo

El entendimiento de la estructura del arbolado urbano, su función y valor ayuda a la toma de decisiones que mejoran la salud humana y la calidad del medio ambiente. Por esto, se llevó a cabo una evaluación y diagnóstico de la estructura del arbolado, así como de su función y valor en la ciudad de Mérida, Yucatán. Esta evaluación se lleva a cabo a través de un inventario forestal implementado desde octubre de 2016 a mayo de 2017, utilizando la herramienta i-Tree ECO V6.03 desarrollada por el U.S. Forest Service, NRS, que cabe mencionar, realiza estos cálculos debido a los algoritmos y formulas del programa con la información sobre el crecimiento y los servicios ambientales de aproximadamente cinco mil especies de árboles de todo el mundo. El sistema prevé la ausencia de información de las especies que no se encuentren caracterizadas dentro de programa, en cuyo caso se busca la familia, y se sigue ese orden consecutivamente.

De manera general, a continuación, se mencionan los resultados más importantes del estudio realizado sobre la misma poligonal empleada para el estudio de análisis multicriterio, del Plan Municipal de Infraestructura Verde publicado en abril de 2016:

-  Población de árboles: **2,318,000**
-  Cobertura arbórea: **21.2%**
-  Principales especies: **Waxim (*Leucanea leucocephala*), Naranja Agria (*Citrus aurantium*), y Jabín (*Pscidia piscipula*).**
-  Porcentaje de árboles de DAP (diámetro a la altura del pecho) menor a 15.2 cm: **64.4%**
-  Remoción de contaminantes: **175,600 toneladas/año (US\$22.5 Millones US Dlls/año)**
-  Almacenamiento de carbono: **182,100 t (US\$ 26,700,000 dólares)**
-  Secuestro de carbono: **16,640 t/año (US\$ 2,440,000/año)**
-  Producción de oxígeno: **32,890 t/año.**
-  Incremento en Infiltración: **455,000 m³/año (US\$ 1,070,000 Dlls/año)**
-  Valor estructural: **US\$ 2,560,000,000.00**

El inventario se realizó por medio de puntos de muestreo aleatorios denominados parcelas, en total se muestrearon 592 parcelas, por la cantidad de árboles muestreados en las parcelas se estima una población de **2,318,000** árboles (+/- 128,510). Las 592 parcelas se distribuyeron al azar en 8 diferentes distritos. Los resultados presentan una cobertura forestal del **21.2%** del área. Los árboles proveen 135.3 km² de área foliar. Las especies más comunes fueron: Waxim (11.9%), Naranja agria (10.2%) y Jabín (7.5%). Se identificaron **134** especies de las cuales el 15 % (21 especies) representan al 70% de la población. Se encontró que el **10%** de la población son palmas, el **20%** frutales (de los cuales, la mitad es naranja agria) y el resto árboles maderables o de ornato. La densidad

de árboles en toda el área de estudio fue de **96** árboles/ha. pero el rango es de 117 (+/- 5) en los distritos 5,1 y 7 y hasta 42 árboles/ha. en los distritos 2 y 4. El arbolado como se encuentra tiene una diversidad moderada de acuerdo a varios índices técnicos indicadores de biodiversidad. Las condiciones de los árboles son en su mayoría de regular y pobre (42%) a malo (31%).

El promedio de tamaño de árboles en términos de DAP fue de **13** cm, pero el 57% de la población está por debajo de los 10 cm, es decir, es un arbolado chico y joven. Sin embargo, es posible encontrar árboles de más de 20 cm (17%). En cuanto a altura el promedio fue de **6** m, pero también casi la mitad de la población (47%) se encuentra por debajo de los 5 m.

Con esta estructura del arbolado se tienen servicios ambientales por concepto de secuestro de carbono anual de **16,637** t/año, con 11 especies fijando el 50% del total, entre ellas el Waxim, la Naranja, jabín y Chaka. Sin embargo, la tasa neta, descontando las bioemisiones de los mismos árboles, es de **12,333** t/año y su equivalente en CO₂ es de **45,277** t/año. Entre toda la población actualmente se tienen **182,100 t** de Carbono fijo en madera, con un valor estructural de **US\$2,560 Mil** millones de dólares de acuerdo a la metodología de valuación de la herramienta de i-tree ECO. Sobre oxígeno producido por el arbolado, en la actualidad resulto un alcance de **32,890** toneladas. En lo que se refiere al aumento de infiltración o reducción de escorrentía, el arbolado evita que **455,000** m³/año se desperdicien en el drenaje con un costo de US\$ 1,070,000.00 Dólares.

Recomendaciones:

En términos generales las circunstancias del arbolado, la estructura y el nivel de funciones que se observó permiten emitir la siguiente lista de recomendaciones o lineamientos generales que se tendrán que incorporar al Plan Municipal de Infraestructura Verde del Municipio de Mérida para incrementar los servicios ambientales que prestan los árboles a la ciudad.

1. Regular el retiro de arbolado en nuevos desarrollos en los distritos en expansión.

-  Establecer una norma para que las nuevas viviendas tengan zonas arboladas que favorezcan la infiltración y arbolado para sombra, procurando dejar en obra árboles de más de 12 cm en la medida de lo posible.
-  Establecer un programa de rescate de árboles con DAP entre 10-20 cm para replantar en zonas sin árboles del trazo de nuevas calles y avenidas

2. Implementar un programa de cuidado (nutrición, sanidad y mejora de suelo) para lograr un mejor desarrollo en los árboles de menos de 10 cm de DAP.

-  Aplicar materia orgánica (mulch) para mejorar la estructura y calidad de suelo de los árboles y desarrollar metodología para definir la necesidad de fertilizar un árbol en cuanto a producto y cantidad.
-  Llevar a cabo labores de descompactación de suelo para mejorar infiltración.

3. Intensificar el programa de reforestación urbana en cantidad, calidad, selección de especies y tamaño de árboles utilizados.

-  Establecer una norma de calidad de planta para reforestación en términos de calidad de raíz, porte, diámetro y altura para sitios específicos.
-  Seleccionar y definir la metodología para el trasplante de árboles grandes.
-  Establecer criterios de selección de especies para aumentar la paleta vegetal

4. Fomentar el cuidado y siembra de frutales, especialmente Naranja Agria vs el Huanglongbing (dragón amarillo)

Además, se recomienda establecer un monitoreo periódico (cada 5 años) del desempeño del arbolado con respecto a las metas establecidas. Es por lo tanto indispensable establecer las metas de corto y mediano plazo en términos de desempeño, de los arboles más que por cantidades. Finalmente, del análisis de los distritos se establecerán tareas específicas que permita mejorar el arbolado y se podrá desprender un presupuesto de manejo, equipamiento y seguimiento que dé resultados en corto plazo.



Capacitación a voluntarios en la toma de datos de campo, identificación de especies y registro de la información.



Medición de parcela durante la capacitación, toma de la foto desde el N con alguien en el centro señalando al E-O para la toma de datos.



Vista área de una parcela que cayó entre casas en un terreno baldío.

1. Introducción y Objetivos

La determinación del servicio ambiental que realizan los árboles en un bosque urbano permite cuantificar y apreciar el beneficio que estos nos brindan en una, cada vez más contaminada, atmosfera de las ciudades. El conocimiento de estos beneficios se ha tenido por mucho tiempo, sin embargo, no fue sino hasta hace poco que el trabajo de investigación permitió conjuntar todas las experiencias y conocimientos estadísticos y dasométricos en una herramienta que cumple varias funciones. 1) En primer lugar, guía en la elaboración de los inventarios ya que nos permite manejar gran cantidad de información de manera segura, sencilla y ordenada. 2) En segundo lugar, contiene las ecuaciones que permiten traducir la estructura del arbolado en la capacidad de fijación de contaminantes y de incremento en la infiltración. 3) En tercer lugar, permite evaluar diferentes escenarios de desarrollo de poblaciones en condiciones locales específicas bajo diferentes supuestos de deforestación y reforestación para determinar el mejor curso de acción. 4) Finalmente, pero no menos importante, permite una planeación y cálculo de este beneficio en pesos (monetariamente), lo que a su vez ayuda a justificar la realización de gastos en su cuidado y a crear conciencia de la necesidad de llevar a cabo un manejo que, aunque tenga costos los beneficios los sobrepasan con creces.

	Beneficio	Por medio de
Ecológico	Reducción de contaminantes y a reducir la cantidad de gases de efecto invernadero.	Absorción de CO ₂ , O ₃ , PM _{2.5} , PM ₁₀ , SO _x y NO _x . Fijación por medio de la fotosíntesis y retención de partículas en los espacios dentro los estomas.
	Aumento en la infiltración de agua de lluvia.	Por efecto de las raíces en la permeabilidad de los suelos.
Económico	Reducción de consumo de energía en confort. Aumento en plusvalía de bienes raíces. Reducción de costos de mantenimiento de asfalto de calles.	Por efecto del sombreado sobre los edificios y de protección contra el viento en invierno se reduce el uso de a/c. Reduce la fatiga de materiales al evitar el sol directo.
Social	Mejorar el ambiente al reducir el efecto de isla de calor. Genera ambientes más seguros ya que disminuye la criminalidad Mejora la conectividad en vecindarios al proveer de espacio para la interacción más efectiva.	Reducción de ruido, mejora de paisaje visual, efecto calmante y tranquilizador, una sensación de confort en áreas sombreadas con mejor Humedad relativa.

1.1 Objetivo general

A través de un inventario urbano, con metodología estadística y rigor científico, conocer las principales características del arbolado urbano de la ciudad de Mérida, Yuc. que nos permitan establecer su capacidad de servicio ambiental en términos económicos y ecológicos. Todo con la finalidad de proveer de información necesaria para la toma de decisiones en el manejo del arbolado urbano para su mejora y cuidado.

1.2 Objetivos particulares

-  Reconocer las especies más importantes del arbolado.
-  Cuantificar la distribución de las especies en la zona de estudio y sus distritos
-  Identificar y evaluar las condiciones en las que se encuentra el arbolado por especie, zona, en cuanto a diámetro a la altura de pecho, condición de copa y follaje.
-  Determinar posibles conflictos con cables, banquetas y otras estructuras.
-  Determinar riesgos de plagas y enfermedades.
-  Listar y cuantificar a los beneficios ambientales más importantes del arbolado, desde secuestro de carbono, producción de oxígeno, fijación de contaminantes, incremento en la infiltración o reducción de la escorrentía y efectos sobre la radiación UV.
-  Identificar maltratos y malos manejos en el arbolado.
-  Pronosticar el comportamiento de una población en diferentes escenarios de deforestación (mortalidad) y reforestación.
-  Cuantificar económicamente, en base a los precios establecidos internacionalmente, los beneficios económicos del arbolado.
-  Establecer la línea base de la situación del arbolado para que en muestreos recurrentes se evalúe la efectividad del trabajo sobre los árboles.
-  Desarrollar un sistema de seguimiento con parcelas permanentes de muestreo y compromiso de actualización del inventario cada 6 años para reportar avances, o retrocesos, en el arbolado urbano de la ciudad.

2. Metodología

El inventario urbano se realizó siguiendo la metodología y los protocolos específicos y probados de la suite i-Tree con la herramienta ECO V 6.03.17, por lo que se recomienda revisar para más detalle el manual que se encuentra en la página de la herramienta.¹ La definición de variables a evaluar, y el establecimiento de parcelas de muestreo para realizar el inventario también se hizo siguiendo las recomendaciones de la herramienta, cabe mencionar que se utilizó la opción que tiene la herramienta para la generación aleatoria de la ubicación de las parcelas y de esta manera garantizar la validez estadística de los resultados.

El cuadro 1 presenta las 8 zonas que se plantearon para la ciudad, su superficie, el número de parcelas (de 452 m² o 12 m de diámetro) originalmente planteadas y las efectivamente muestreadas para indicar la eficiencia de muestreo, la superficie en ha. muestreada total y por lo tanto la intensidad de muestreo. Las parcelas que se desecharon en su mayoría fueron porque después de 3 visitas no fue posible contactar a los dueños o a alguien que permitiera el paso para el muestreo.

Descripción	Clave	Área (ha)	Muestreadas	% Muestreo	Sup Muest. (ha)	Intensidad Muestreo
Distrito 01	D01	4,161	112	93%	5.06	0.12%
Distrito 02	D02	2,074	50	86%	2.26	0.11%
Distrito 03	D03	1,341	32	84%	1.45	0.11%
Distrito 04	D04	1,591	36	80%	1.63	0.10%
Distrito 05	D05	4,730	117	90%	5.29	0.11%
Distrito 06	D06	4,808	113	96%	5.11	0.11%
Distrito 07	D07	4,285	104	98%	4.7	0.11%
Distrito 08	D08	1,105	28	90%	1.27	0.11%
		24,095	592	90%	26.76	0.11%

Cuadro 1. Distritos establecidos en Mérida y sus características en el inventario.

Las zonas se establecieron por su homogeneidad en condiciones, uso de suelo, delimitación de avenidas, tipo de casa habitación, en algunos casos vegetación existente y antigüedad. Se aprovechó calles y avenidas para delimitar las áreas y facilitar el acceso. La figura 1 muestra las divisiones que se propusieron para Mérida. Básicamente son 4 distritos de más de 4,000 ha y 4 de menos de 2,000 ha con condiciones socioeconómicas diferentes que se reflejan en las condiciones de su arbolado. Los distritos 2, 3, 4 y 8 del centro son los de menor superficie y los otros abarcan más superficie y sobretodo las áreas de mayor crecimiento de la ciudad. La toma de datos se realizó en papel de acuerdo a las variables establecidas y posteriormente se enviaron los datos con la WEB-Form,

¹ http://www.itreetools.org/resources/lang/es/03_Manual_de_campo_para_toma_de_datos_i-Tree_ECO.pdf

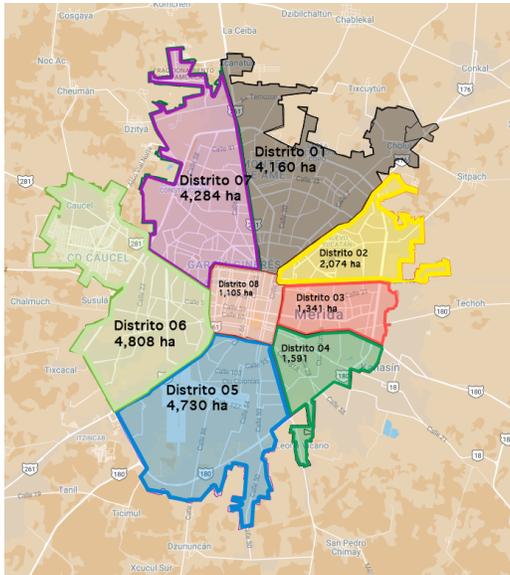


Figura 1 Distritos de Mérida y su superficie.

opción de captura móvil generada por el programa el programa, de tal manera que la información es poco probable que sufriera errores por captura. También se diseñó un croquis e escala para que se capturara en papel las principales características de la parcela, la ubicación de los árboles y que quedara como documento fuente en caso de tener problemas con el programa. Se tomaron fotos desde el N de la parcela con alguien parado en el centro y en la medida de lo posible dos personas a 12 m del centro en la dirección E-O para dar la idea del límite de la parcela y la vegetación que incluía. Estos croquis y fotos sirvieron para la auditoría de la calidad de la información y quedan como parte del reporte. Los 11 parámetros que se tomaron de todos los árboles que se encontraban en la parcela, para después de ubicarlos en el croquis y de identificar la especie, se encuentran listados y explicados en el cuadro 2:

		Clave ESPECIE	Un.	Nombre común o Científico
	1	Cond Copa	%	CONDICIÓN DE LA COPA, ver el manual
	2	Altura TOTAL	m	en metros del árbol hasta su parte más alta
	3	Altura COPA	m	en metros del follaje vivo del árbol
	4	Altura BASE Copa	m	del piso a la hoja más baja de la copa
ANCHO DE COPA	5	N-S	m	Metros de la copa en la dirección indicada
	6	E-W	m	Metros de la copa en la dirección indicada
	7	%COPA faltante	%	Porcentaje de la copa que no se encuentre
	8	Exposición a la luz	entero	1 al 5 ver el manual para las opciones
	9	% impermeable	%	Área cubierta por cemento, cualquier elemento impermeable al agua
DAP:	10	Dap 1 hasta 6	cm	Diámetro medido con cinta Diamétrica
	11	ALTURA DE DAP	m	Altura a la que se midió el diámetro 1.3 es la normal, pero se pudo haber medido a otra altura.

Cuadro 2. Parámetros dasométricos medidos en los árboles y su explicación.

El hecho de que este estudio tiene una base aleatoria es muy importante ya que es la única manera de evitar sesgos en la información y garantiza que se puede manejar estadísticamente la información para realizar conclusiones con cierto margen de error conocido.

3. Resultados

Los resultados se presentan en dos partes, la primera se refiere a la estructura del arbolado que explica y define el tamaño, la situación, las especies, y su ubicación. La segunda se refiere a los servicios ambientales que nos ofrecen los árboles. El programa i-Tree tiene la capacidad de generar reportes de la base de datos que procesa y genera con las parcelas muestreadas y los datos dasométricos de los árboles. Algunos de estos reportes están incluidos en este trabajo. A continuación, se presentan algunos reportes gráficos que explican y describen de manera resumida la estructura del arbolado. También se incluyen por los Servicio Ambiental que es la parte que indica los beneficios ecológicos que nos brindan los árboles. Como la fijación de carbono y la generación de oxígeno.

Para facilitar el análisis de resultados la comparación entre zonas se hará en dos grupos uno formado por las zonas de 2,000 y menos hectáreas que en el caso que tenemos son los distritos “chicos” que serían el 2, 3, 4 y 8 el del centro. Y el otro grupo está formado por los distritos “grandes” que son los de más de 4,000 ha que son el 1, 5,6, y7.

3.1 Análisis de las parcelas

Como se mencionó anteriormente las parcelas de 452 m² (12 m de radio) se evaluaban para determinar sus características lo que nos sirve para estimar el tipo de uso de suelo y de cobertura para reconocer a los sitios con potencial a ser plantados, además de que específicamente una variable evaluada al momento de llegar a la parcela fue el % de área Plantable y Cobertura arbórea.

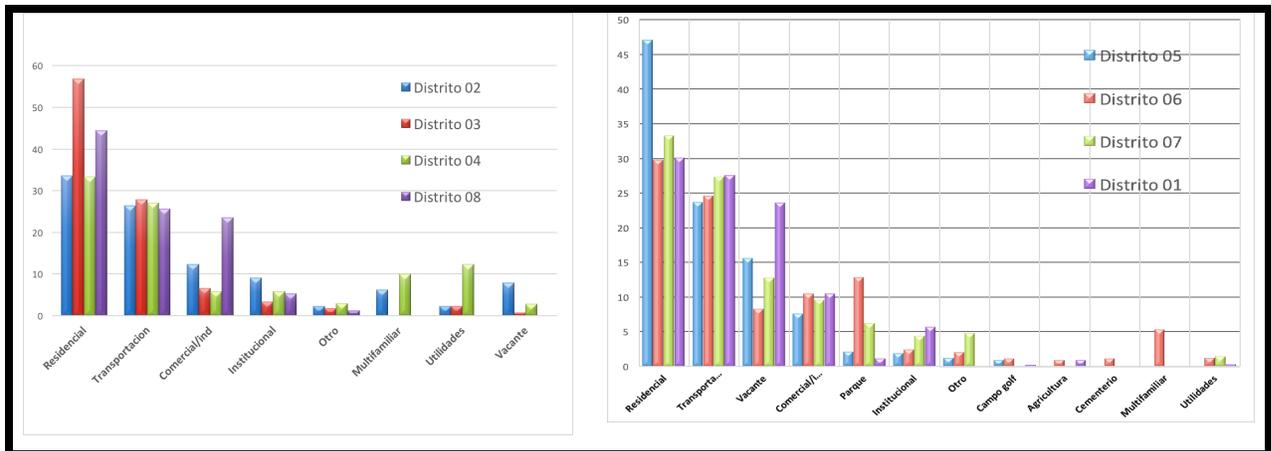


Figura 2 Porcentaje de usos de suelo identificados en el inventario de Mérida, Yuc. por distrito

En la figura 2 se puede observar que prácticamente la mitad de la superficie de la ciudad ya está convertida en calle (transportación), residencias o edificios comerciales y por lo tanto queda fuera de posibilidades de ser sembrada. Pero en el resto de la superficie aún hay terreno plantable. La figura 2 presenta los distritos chicos a la izquierda y los grandes a la derecha, se ve que hay mucho menos categorías en los distritos chicos ya que contienen más construcciones y obra y no hay otras categorías. El distrito 8 sobresale en la categoría comercial como es de esperarse y no participa en la vacante. En los distritos grandes una categoría que sobresale es la de terrenos vacantes, sobretodo en el distrito 1,

lo que indica que hay áreas potenciales para reforestación, aunque hay que revisar el tipo de propiedad. El distrito 6 por supuesto indica un porcentaje alto en la categoría de parque como es de esperar por los diversos parques que contiene como el Bepensa, y el Paseo verde (Parque lineal metropolitano de Mérida).

Por otro lado, se midió dentro de cada parcela la cobertura arbórea estimando el área que cubría el follaje de los arboles (sombra o zona de goteo) y también el área Plantable fuera de la sombra, donde fuera posible hacer una cepa y plantar un árbol que no interfiriera con nada. La estimación de espacio Plantable y porcentaje de cobertura de arbórea que se muestra en las siguientes figuras muestra que la cobertura arbórea es menor que el promedio en los distritos chicos donde está incluido el centro de la ciudad y en los grandes es muy pareja la cobertura el promedio para toda la ciudad es de **21.2%**. pero el rango de variación es de 15 a 25%, que es muy amplio.

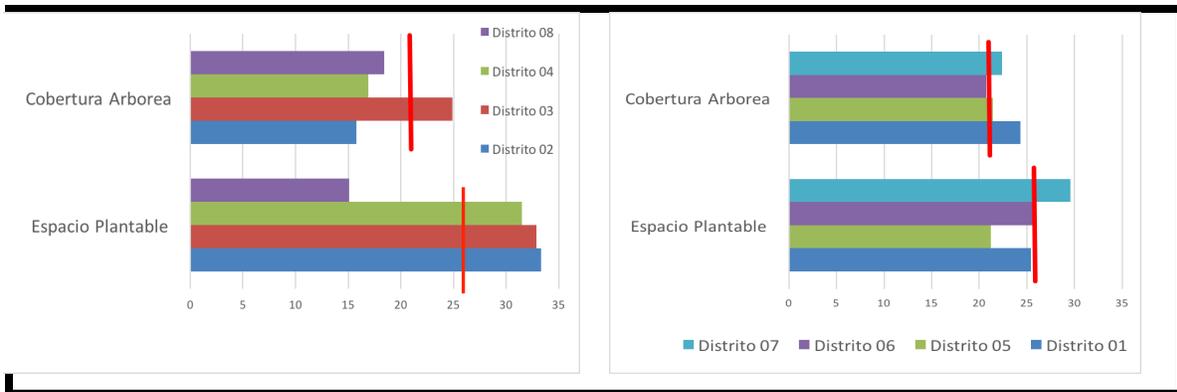


Figura 3 Porcentaje de cobertura arbórea y espacio Plantable por distrito en Mérida Yuc. las líneas rojas indican el promedio general.

El espacio Plantable en los distritos chicos salió mayor que en los grandes, o al menos arriba del promedio a excepción claro del Centro donde claramente es muy limitado, apenas un 15% La cubierta del suelo se refiere al material que actualmente está encima del suelo y excluye a lo cubierto por los árboles o cobertura arbórea y la de arbustos. Pueden existir varios tipos de cobertura en una misma parcela y está se estimó en función al área que cubrían. De manera agregada prácticamente la mitad de la superficie de la

ciudad ya está cubierta por algún tipo de material impermeable (asfalto, cemento o construcciones, 56%).



Figura 4 Cubierta de suelo encontrada en el inventario de Mérida, Yuc.

3.2 Estructura del Arbolado

3.2.1 Especies

Se encontraron de 134 especies de árboles de las cuales 89% se encontraban registradas en el i-tree y el resto se caracterizó por clase (helecho-*Ficlass*, palma-*Cyclclass* y latifoliadas maderable-*Maiclass*). En el anexo 1. Se listan las especies encontradas, su clave del programa, su nombre común de la región y para aquellas que no están en el programa porque no existen las ecuaciones alométricas para la determinación de su tamaño y demás variables secundarias que calcula el programa, pero que por presentarse en cantidades de uno a tres individuos se les clasificó como latifoliadas clase Magnoliopsida. De la figura 4 y el cuadro del Anexo 1 con la información de las especies se concluye que:

- ✿ 16 especies de palmas conforman el 12% de la población
- ✿ 22 especies de frutales conforman el 17% de la población siendo la naranja agria la más importante con el 10% de la población total y
- ✿ 95 especies de árboles conforman el 71% restante.

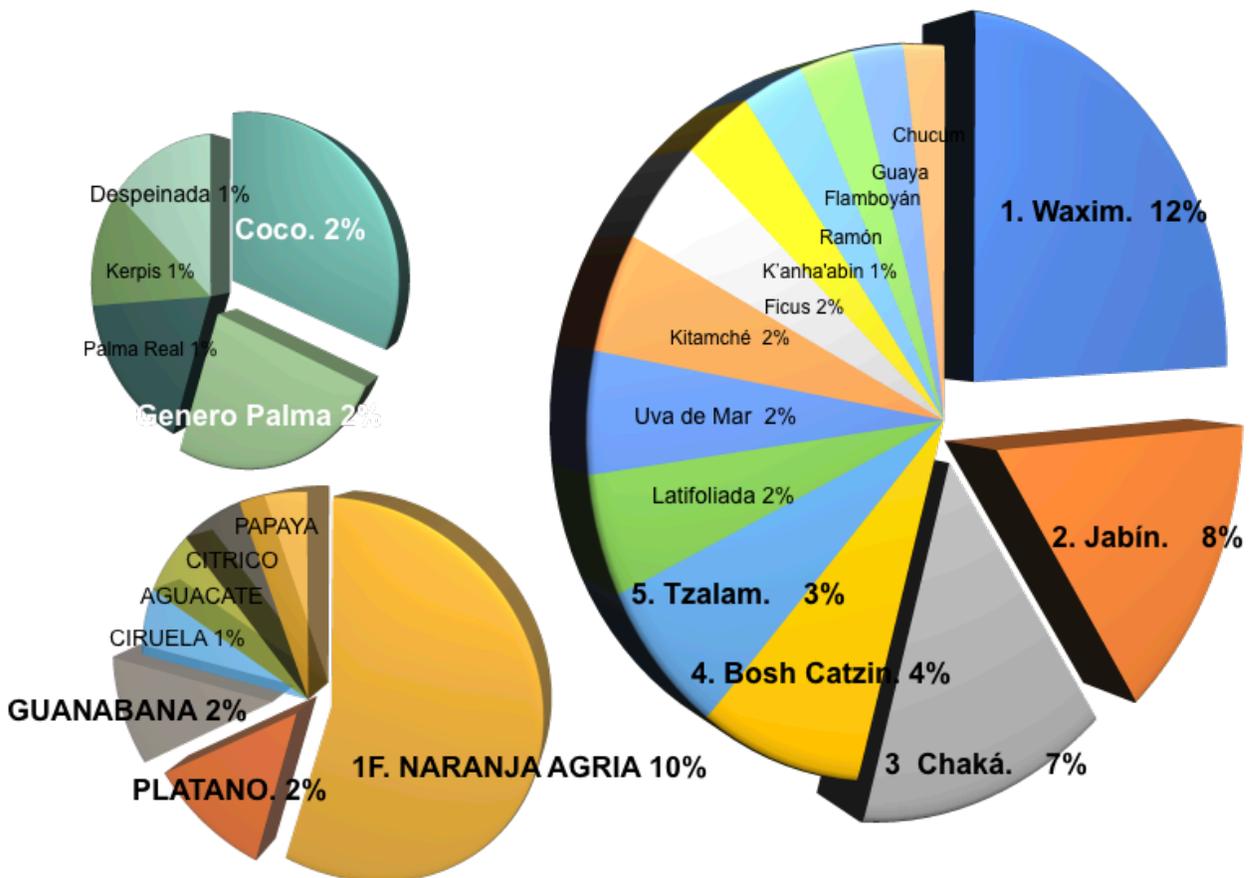


Figura 5 Especies más importantes encontradas en Mérida divididas por grupo; palmas, frutales y árboles.

De lo anterior se desprende que la biodiversidad de la población es relativa ya que, si bien hay numerosas especies, el grueso de la población (80%) está concentrado en tan solo 34 especies, es decir el 25% y el 70% en solo 22 especies (16%). Este factor será importante en la selección de especies en las recomendaciones y en las sugerencias para las actividades de mejora del arbolado y su capacidad de servicio ambiental.

no.	Especie/ Género/ Clase	Nombre común	Población	% del total
1	<i>Cocos nucifera</i>	Coco	55,487	2.4 %
2	Clase <i>Cycadopsida</i>	Palmas	44,497	1.9 %
3	<i>Roystonea regia</i>	Palma Real	33,162	1.4 %
4	<i>Adonidia merrilli</i>	Kerpis	24,872	1.1 %
5	<i>Beaucarnea spp.</i>	Despeinada	24,380	1.1 %
6	<i>Citrus aurantium</i>	NARANJA AGRIA	236,169	10.2 %
7	<i>Musa spp.</i>	PLÁTANO	51,326	2.2 %
8	<i>Annona spp.</i>	GUANÁBANA	45,406	2.0 %
9	<i>Spondias purpurea</i>	CIRUELA	26,925	1.2 %
10	<i>Persea americana</i>	AGUACATE	25,058	1.1 %
11	<i>Carica papaya</i>	PAPAYA	24,486	1.1 %
12	<i>Leucaena leucocephala</i>	Waxim	275,186	11.9 %
13	<i>Piscidia piscipula</i>	Jabín	174,833	7.5 %
14	<i>Bursera simaruba</i>	Chaká	152,928	6.6 %
15	<i>Acacia spp.</i>	Bosh Catzin	89,650	3.9 %
16	<i>Lysiloma latisiliquum</i>	Tzalam	72,089	3.1 %
17	Clase <i>Magnoliopsida</i>	Latifoliada maderable	53,545	2.3 %
18	<i>Coccoloba spp.</i>	Uva de Mar	51,066	2.2 %
19	<i>Caesalpinia spp.</i>	Kitamché	49,558	2.1 %
20	<i>Ficus spp.</i>	Laurel de la india	44,834	1.9 %
21	<i>Senna racemosa</i>	K'anha'abin	33,672	1.5 %
22	<i>Brosimum alicastrum</i>	Ramón	31,115	1.3 %
23	<i>Delonix regia</i>	Flamboyán	27,864	1.2 %
24	<i>Melicoccus bijugatus</i>	Guaya o Huaya	27,486	1.2 %
25	<i>Citrus spp.</i>	Cítrico	25,052	1.1 %
26	<i>Havardia</i>	Chucum	23,176	1.0 %

Cuadro 3. Listado de especies más importantes y su cantidad en la población.

El cuadro anterior ilustra claramente la cantidad de individuos y especies dentro de cada uno de las categorías establecidas para el análisis y discusión. En el anexo de trabajo de los reportes de i-tree se encuentra un cuadro que resume la estructura por especie y que además muestra parámetros calculados por el programa para cada especie como son área foliar, biomasa de hojas y biomasa total en peso seco de los árboles, esto lo indica con un estimado del error para que el lector estime la precisión de la información. El cálculo de estos parámetros se realiza con las ecuaciones alométricas mencionadas que tiene el

² spp. Indica que no se pudo clasificar la especie, pero se registró por su género.

programa y que selecciona por especie, en el caso de especies clasificadas por clase utiliza una ecuación promedio.

3.2.2 Cantidades y densidad de árboles

El parámetro de densidad de árboles por hectárea, es un parámetro muy útil para comparar entre diferentes lugares ya que refiere la cantidad a una unidad de superficie y esto permite comparar bajo las mismas condiciones y por lo tanto da una idea clara de la cantidad que existe en un lugar. Por ejemplo, el promedio para la ciudad es de 96.2 árboles por hectárea, pero la dispersión o rango es desde 42.3 (43%) hasta 122.3 (127%), es decir los distritos 2 y 4 prácticamente tienen la mitad de árboles que los demás mientras que el 1, 5 y 7 tienen 22% en promedio más de árboles. Esto es claramente un dato muy importante para plantear las directrices de los programas de reforestación.

Zona	Población	% del Total	Arboles /ha
Distrito 05	578,712	25.0 %	122.30
Distrito 01	493,686	21.3 %	118.70
Distrito 07	485,731	21.0 %	113.40
Total/Promedi	2,317,795	100.0 %	96.20
Distrito 08	105,527	4.6 %	95.50
Distrito 06	410,013	17.7 %	85.30
Distrito 03	85,714	3.7 %	63.90
Distrito 02	91,179	3.9 %	44.00
Distrito 04	67,233	2.9 %	42.30

Cuadro 4. Distribución de la población por distrito y densidad por hectárea en Mérida, Yuc.

En el caso del cuadro anterior, los distritos se ordenaron de mayor a menor por densidad de árboles por hectárea incluido el total de árboles y promedio para dar idea de los que se encuentran abajo del promedio y arriba de él. Como es de esperarse los distritos chicos con mayor superficie impermeable, tienen menores poblaciones y densidades, sorprende que el centro este por arriba de todos a pesar de ser el distrito más pequeño en superficie, lo que sucede es muchos árboles no son muy visibles al público porque se encuentran dentro de casas. El distrito 6 por otro lado es el más grande con casi 5,000 ha y es probable que por esa razón haya quedado por debajo del promedio, aunque también es un distrito con numerosos desarrollos a habitacionales que carecen de árboles. Es necesario revisiones distrito por distrito para analizar y conocer más a fondo lo que sucede, y de esta manera jerarquizar correctamente los esfuerzos de reforestación.

3.2.3 Tamaño

El tamaño de los árboles es muy importante ya junto con la especie es la variable que determina, en las ecuaciones alométricas del programa, los beneficios ambientales y las características morfológicas que calcula el programa. Dentro de los dos posibles parámetros para indicar el tamaño de un árbol, el diámetro medido a la altura del pecho o DAP (@ 1.3 m del suelo) es el que más se utiliza. Cabe mencionar que se midieron árboles a partir de los 3 cm de diámetro, aunque cuando había varios tallos en un árbol se medían hasta 6 de estos, aunque fueran más chicos, para sumarlos después. El promedio de diámetro para la muestra fue de 13.25 cm con una variación del 91% o 12 cm, de tal manera que se puede afirmar que el grueso de la población está entre 25 y 2 cm.

de la población está entre 25 y 2 cm.

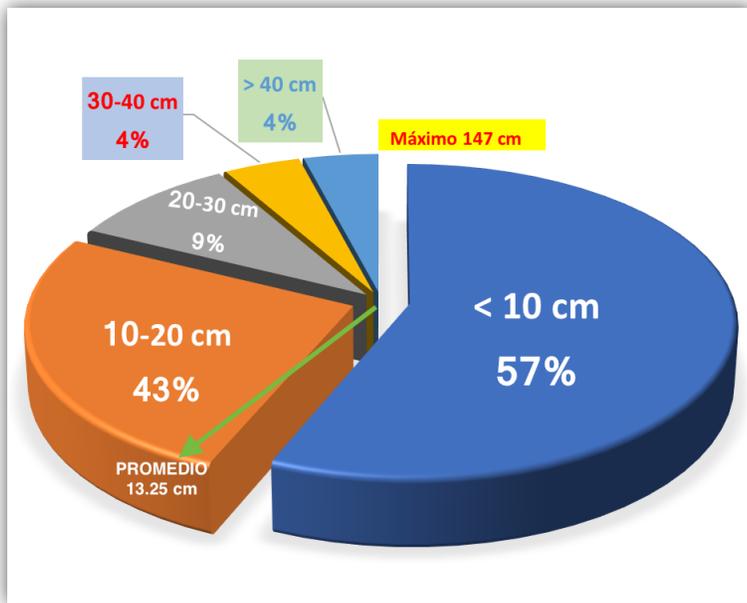


Figura 6 Diámetros de los árboles muestreados en el inventario.

En la siguiente figura se muestra la distribución de la población por DAP por clase Diamétrica, estos resultados son para toda la población y se claramente que el 80% de la población está por debajo del tope de la tercera clase dimétrica, es decir de 23 cm lo que coincide muy bien con los estadísticos de la muestra. De hecho, prácticamente 65% de la población está por debajo de los 15.2 cm como se indicó en el resumen ejecutivo. El conocimiento de esta cifra y su comportamiento es importante entenderlo para la evaluación de árboles, jerarquización de labores de mantenimiento, para la toma de decisiones sobre reemplazos, o cualquier otra de manejo.



Figura 7 Tamaño de los árboles por clase Diamétrica y el acumulado.

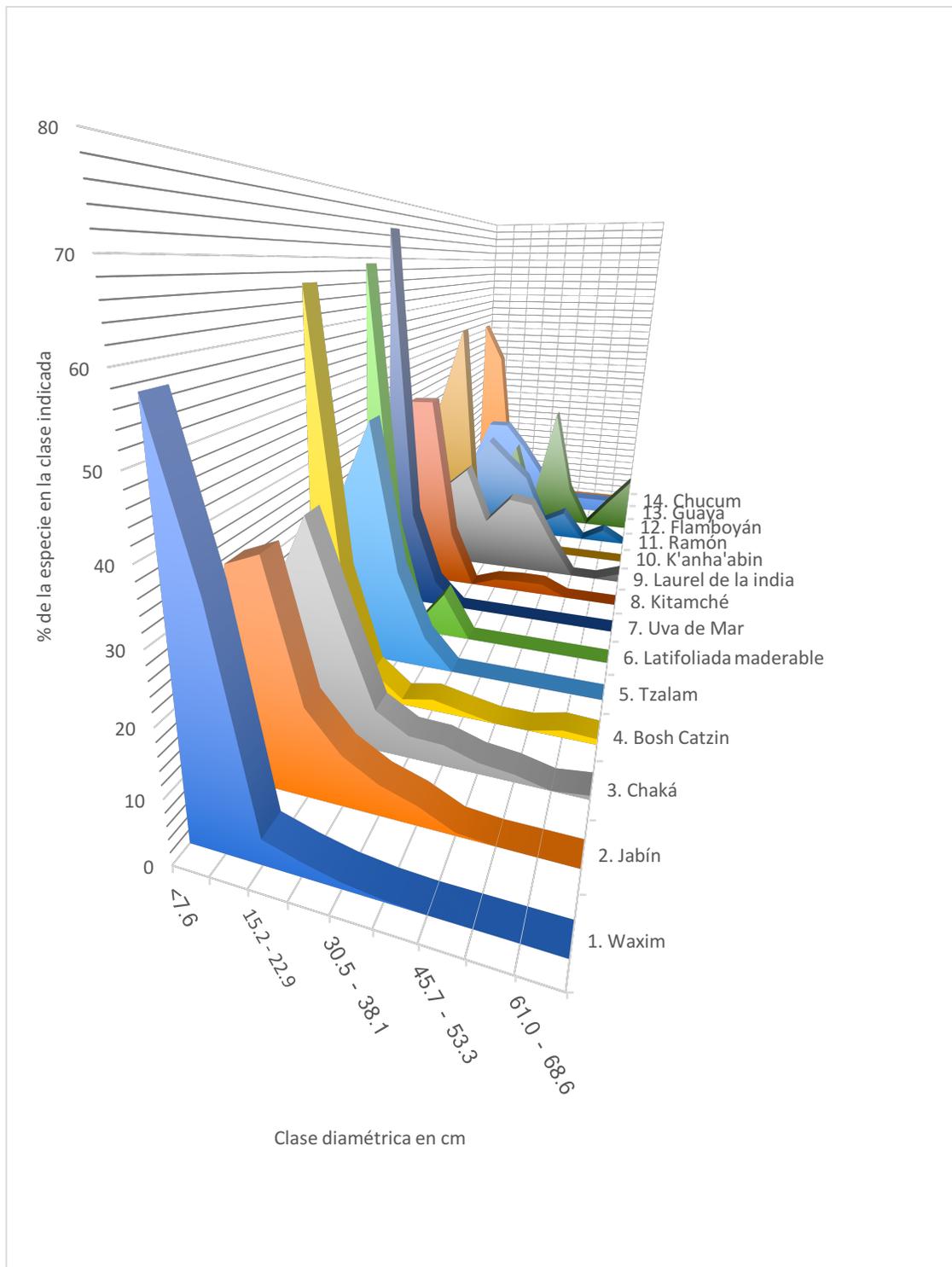


Figura 8 Distribución de altura de los árboles muestreados para el inventario de Mérida.

Para complementar el análisis de tamaño de plantas por medio del DAP, en la figura 8, se muestra el diámetro de las principales especies que conforman la mayoría de la población. Los diámetros se encuentran igual centrados entre los 15 y 20 cm, pero es importante notar que tanto las diferentes especies de *Ficus* como el Ramón muestran varios individuos de gran tamaño y diámetro. El jabín también muestra varios individuos (en porcentaje de su población) en las clases dimétricas de 38-45 cm y en menor proporción de 46-53 cm, y esto debido a que es una especie nativa bien adaptada por lo que debe ser considerada en los programas de reforestación urbana, ya que el *Ficus*, por ejemplo, presenta otro tipo de problemas que limitan mucho su uso.

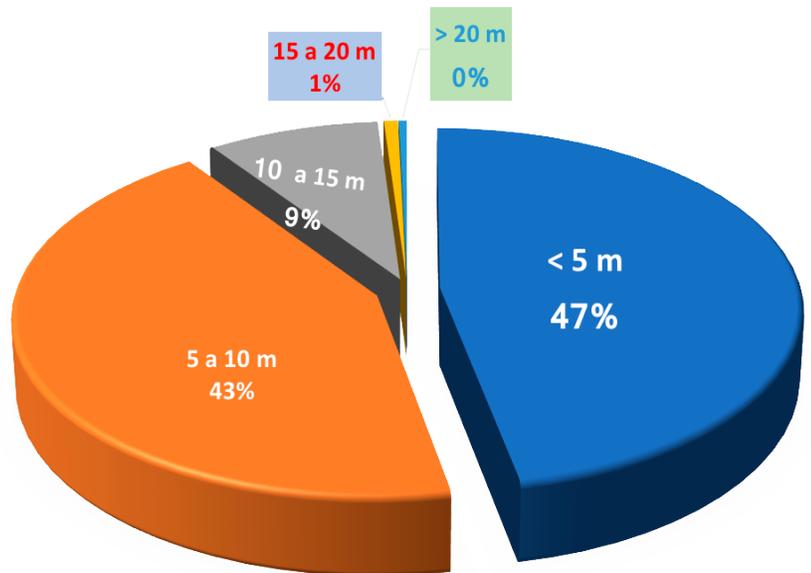


Figura 9 Diámetros de las principales especies del inventario de Mérida, Yuc

3.2.3 Altura

En cuanto a altura el i-Tree no hace estimaciones o cálculos sobre la población por lo que solo se presentan los datos estadísticos de los árboles muestreados. El promedio de altura fue de 6 m con un máximo de 26.9 m y un mínimo de 0.50 m y mediana de 5.3. La variación de 3.08 m que equivale al 50% del promedio y significa que la población se encuentre entre los 3 y los 9 m de alto. Considerando que la vegetación de los alrededores de la ciudad de Mérida es de tipo “Selva Baja Caducifolia” estas dimensiones no son sorpresa, sin embargo, considerando también que el ambiente de la ciudad es un ambiente manipulado creado por y para habitación del hombre, esta información es muy útil para medir o evaluar el manejo que se le dé al arbolado. Es decir, por las modificaciones del ambiente urbano (disponibilidad de agua, por ejemplo) es posible propagar especies fuera de los límites de la vegetación natural; sin embargo, es recomendable utilizar especies de la región que están adaptadas al clima y a al suelo calcáreo ya que tienen raíces pivotantes que se fijan mejor al suelo somero y pedregoso. Las especies nativas responden mejor a los fenómenos naturales y a las cálidas temperaturas que nos caracterizan.

Para incrementar la cobertura vegetal de las áreas urbanas, es importante cultivar el aprecio por las especies del ecosistema base del municipio de Mérida que es la selva baja caducifolia.

3.2.4 Condiciones

La calificación de copa es sumamente importante ya que son las hojas donde se realiza la fotosíntesis que fija el CO₂ y donde se almacenan las partículas de contaminantes. Las condiciones de árbol se refieren más específicamente a las condiciones de la copa, que se evalúan siguiendo la metodología perfectamente descrita en el manual de toma de datos de campo de la herramienta I tree. Básicamente existen 7 niveles, del 1 (copa en perfectas condiciones) al 7 (copa muerta) dejando entonces 5 categorías con diferentes rangos para calificar la copa. Además de la escala de apreciación de la condición de la copa el i-Tree tiene varios campos para que el mismo programa pueda calcular con mayor precisión el tamaño de copa. Esos parámetros son longitud en m en las direcciones N-S y E-O, altura de la base de la copa, altura de la copa y porcentaje de copa faltante. Todos estos parámetros se incluyeron en el perfil del proyecto para medirse y son los datos que utiliza el programa en el cálculo de todo lo que tenga que ver con follaje que sería desde secuestro de carbono, área foliar, biomasa y otros.

En la figura 10 se ve el resumen de la población y se puede ver que la mayoría de la población tiene condiciones de copa de Pobre hacia abajo y sólo un 26% tiene copas en buenas condiciones, esto es debido al poco y pobre o nulo manejo que ha tenido el arbolado urbano.

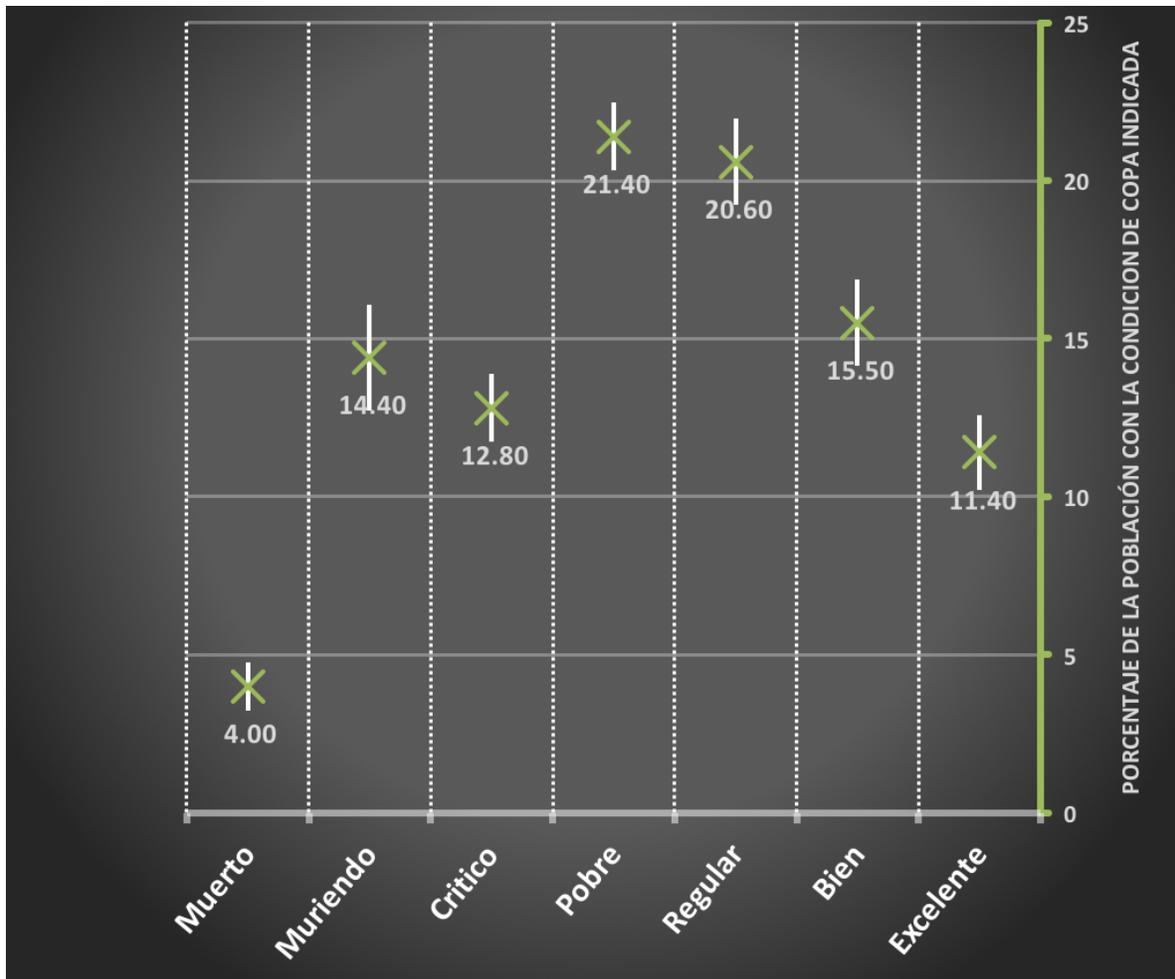


Figura 10 Condición de copa de la población de árboles del inventario de Mérida, Yucatán.

También son las hojas las que frenan el golpe del agua de lluvia que reduce erosión y aumenta la infiltración por lo que la correcta estimación de la copa es muy importante. Y por esto mismo es que se tiene que llevar a cabo manejo y mantenimiento en los árboles para que desarrollen el mejor canope³ que sea posible. En la figura 11 se observa en qué condiciones están las especies más numerosas que conforman el 80% de la población. Entre más alto se encuentre el número de la zona pobre (verde), peores serán las condiciones del Canope de la especie. O dicho de otra manera entre más pequeño sea el color morado (indicativo de un buen canope) peor se encontrará el canope de la especie. El Catzim por ejemplo tiene su canope en condiciones pobres a críticas, mientras que el 60% de la naranja agria lo tiene en buenas condiciones. El análisis de la condición de copas por estrato muestra el nivel de manejo o cuidado que se tiene en cada uno y es un indicador que se tiene que ir modificando hacia la derecha con el tiempo si se pretenden mejorar las condiciones y los servicios ambientales del arbolado el reporte *18 CE Condición por estrato y especie* tiene esta información.

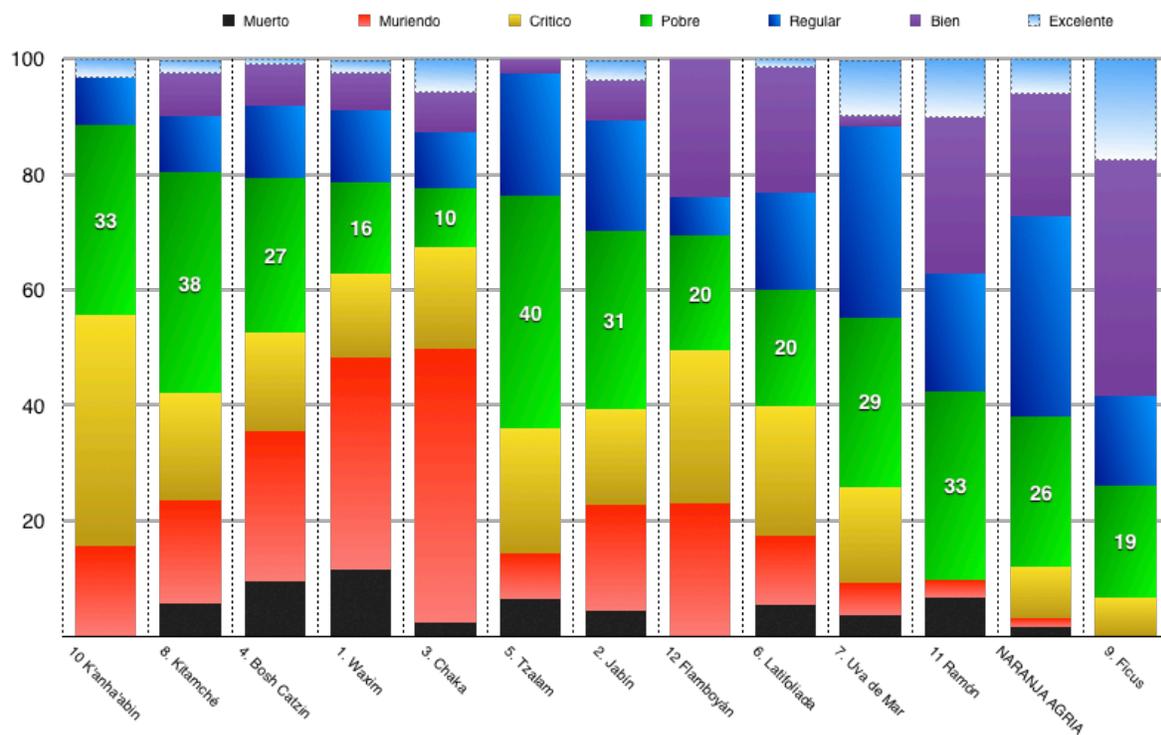


Figura 11 Condición de copa de las principales especies en el Inventario de Mérida, Yucatán.

3.2.4 Índices biológicos

Los índices biológicos que calcula el i-Tree desde los parámetros dasométricos son el Valor de Importancia y el Índice de Desempeño Relativo (Relative Performance Index o RPI) que sirven para analizar y comparar especies entre ellas. Estos índices son útiles en la

³ Se refiere al dosel arbóreo, dosel forestal o también llamado en ocasiones canopia o canopeo (del inglés canopy y este del latín Canopus, famosa ciudad egipcia conocida por sus grandes lujos) da nombre al hábitat que comprende la región de las copas y regiones superiores de los árboles

selección de especies. El primero se calcula simplemente sumando el % de la población de la especie al % del área foliar de la especie del total de todo el inventario. De tal manera que el follaje se convierte un factor importante como lo vemos con las especies de *Ficus* cuyo porcentaje de la población es 40% menos que el Tzalam pero que por su denso follaje tiene el mismo lugar en importancia. Y por ese mismo motivo, el Chaka cae al cuarto lugar por tener un follaje menos denso. Por su parte, la naranja agria asume el primer lugar en importancia gracias al su follaje. Es importante notar que el Ramón con solo el 1.3% de la población sube varios lugares en importancia también gracias a su follaje más denso.

Por su parte el IDR es un índice que compara especies bajo unas mismas condiciones y básicamente divide el % de la especie en buenas condiciones entre el promedio de toda la población, de esta manera si las condiciones son mejores que el promedio el índice es mayor a uno y viceversa si son menores el índice es menor que la unidad (Freilicher, M. 2010). La lógica detrás de esto es que se comparan todas las especies entre si y se señalan las que están por debajo del promedio. En esta misma figura 12, el círculo central indica las especies que no tuvieron un IDR mayor a uno dentro de las de más relevancia en el inventario.

Figura 12 Valor de importancia (%) e IDR de las especies más relevantes en el inventario de Mérida.



Debido a que el IDR se puede utilizar como criterio de selección de especies para reforestación, a continuación, se presentan las especies que tuvieron un IDR mayor a uno, es decir, que se comportaron mejor que el promedio o que la clasificación de estar en buenas condiciones fue mayor que el promedio de la población. La figura 13 presenta en primera instancia a las Palmas y a los frutales, en virtud de que de las 134 especies 93 (69%) resultaron tener un buen desempeño. Entre frutales y Palma tenemos 33 especies, que es de esperar que tengan buen desempeño ya que los frutales por dar además el beneficio de la fruta, los dueños le proporcionan cuidados y es de esperar que estén en mejores condiciones. En segundo lugar, las Palmas por su tipo de crecimiento normalmente no sufren mucho daño y sus copas se encuentran en buenas condiciones. En esta misma figura entre paréntesis se indica el porcentaje de la población que tiene la especie en el total. Cuando el valor es muy pequeño se indica con <0.1 y eso indica que hay muy pocos individuos, pero no por eso tiene que descartarse para ser usada en reforestación. Por otro lado, el cuadro 5 muestra a los 60 árboles que tuvieron buen desempeño igual junto con el porcentaje que hay de la especie, estos árboles están ordenados de mayor a menor y la lista puede ser útil como se dijo, como un criterio más para la selección de especies para reforestación.



Figura 13 IDR para Palmas y Frutales en paréntesis el porcentaje de la especie de la población total

Nombre común (% pob.)	IDR	Nombre común (% pob)	IDR
Tulipán yucateco (<0.1)	1.53	roble (<0.1)	1.22
Encino (<0.1)	1.53	almendro (0.6)	1.21
Dracaena (0.3)	1.52	Roble (0.6)	1.20
Limonaria (0.1)	1.49	Neem (0.3)	1.19
dama de noche (<0.1)	1.46	Ramón (1.3)	1.19
Cedros (Conifera) (<0.1)	1.46	Zapote Negro ó Tauch	1.19
Ficus (0.3)	1.46	Noni (0.1)	1.19
Pixoy (<0.1)	1.46	Caimito (0.8)	1.18
Tuk (0.1)	1.42	granada (0.1)	1.17
Lluvia de oro (0.1)	1.41	Pixoy (0.3)	1.16
Pino (conifera) (0.6)	1.41	Capulín (0.6)	1.16
Almendro (0.2)	1.41	Laurel (0.2)	1.16
Chak Sikin (0.1)	1.40	Flor de Mayo (0.7)	1.16
Huano (0.8)	1.39	Cítrico (1.1)	1.15
Neem (0.1)	1.38	X'kanan (0.1)	1.14
Naranja de lousiana	1.38	Pino frances (0.1)	1.14
Maculis Amarillo (0.1)	1.37	Guaya o Huaya (1.2)	1.12
Almendro (0.4)	1.33	algarrobo (0.1)	1.11
Laurel de la india (1.9)	1.32	Caoba (0.2)	1.11
Algarrobo blanco (0.3)	1.31	Balché (0.3)	1.07
Laurelillo (<0.1)	1.30	Chit (0.3)	1.07
Algarrobo (0.6)	1.28	X'can Lol (0.5)	1.06
Campanita (0.7)	1.28	Cedro (0.7)	1.05
Thuja (0.2)	1.28	Nance (0.5)	1.04
Chooch y Kaniste (0.1)	1.26	Jicara (0.3)	1.04
Moringa (0.2)	1.25	Maculis (0.4)	1.03
Saramullo (0.3)	1.24	Uva de Mar (2.2)	1.02
Pata de Vaca (0.1)	1.24	guanabano (0.3)	1.01
Caimito (0.1)	1.22	Ficus (0.1)	1.00

Cuadro 5. IDR de las especies de árboles del inventario, (porcentaje de la población de la especie).

Otros índices de biodiversidad son los de Shannon y Simpson que se presentan a continuación, así como el número de especies encontradas por estrato y el promedio de especies por hectárea. La biodiversidad es importante porque permite estabilizar a una población toda vez que si existe riesgo de una catástrofe o plaga contra una especie entre más predominante sea esta más afecta a toda la población. Por ejemplo, el porcentaje de la población por la naranja agria se considera muy alto y peligroso ya que, si llegara alguna enfermedad o plaga, que en el caso particular de los cítricos hoy en día es el Huanglongbing o enfermedad del Dragón amarillo, a atacarlo el total de la población se vería fuertemente disminuido. Sumando todas las especies de cítricos nos da un total de 297,401 individuos que representa el 12.8% de la población que es susceptible a la enfermedad y que además ya se encuentra en la península y que de entrar a la ciudad podría diezmar a la población en 2 a 5 años. Comparando entre distritos, cuadro 6, vemos

que el tamaño tiene que ver entre el número de especies totales y claro al ser de un 25% del tamaño los chicos incrementan su cantidad por hectárea.

	Estrato	No Especies	Especies /ha	Shannon	Simpson
CHICC	Distrito 04	35	21.50	3.10	13.40
	Distrito 08	43	33.90	3.20	14.40
	Distrito 02	31	13.70	3.00	16.00
	Distrito 03	32	22.10	3.00	14.30
Grande	Distrito 06	71	13.90	3.50	20.40
	Distrito 07	66	14.00	3.40	18.50
	Distrito 01	62	12.20	3.20	15.00
	Distrito 05	76	14.40	3.60	23.00
	Promedios	132	4.90	3.80	24.00

Cuadro 6. Índices de diversidad por distritos agrupados por tamaño.

4. Servicio Ambiental del Arbolado de Mérida

Conocer el servicio ambiental que nos brindan los árboles es muy importante ya que la manera ideal de guiar trabajos específicos de mejora del arbolado es a través de establecer metas ambientales que naturalmente implican mejoras en las condiciones de copa, selección de especies y programas de arborización y sobrevivencia efectivos. Es decir, el establecer metas en función a cualquier indicador ambiental permite englobar varias estrategias de manejo en un solo resultado y de esta manera orientar y justificar diferentes trabajos y sobretodo es más fácil y significativa la evaluación de los esfuerzos. Por ejemplo, si se plantea aumentar en cierto porcentaje la cantidad de secuestro de carbono al año habrá que incrementar el tamaño de los árboles existentes, sembrar especies eficientes y la evaluación se puede hacer en parcelas permanentes de muestreo, donde se mida el crecimiento de los árboles y se convierta esta información a servicio ambiental con la herramienta i-tree Eco.

4.1 Fijación de CO₂

La fijación de CO₂ tiene dos componentes; el primero se refiere a la cantidad de Carbono ya fijo en madera al momento de realizar el inventario y el segundo a la capacidad que tienen los árboles para secuestrar CO₂ durante un periodo, que normalmente es de un año. El primer valor se determina por la cantidad de madera y es directamente proporcional al tamaño del árbol y, muy importante, está en función a la especie por la influencia que tiene esta sobre la densidad de la madera. Este indicador se utiliza también para calcular el valor estructural del arbolado ya que entre más madera exista más valor tiene el arbolado.

Por otro lado, la capacidad de secuestro de carbono anual y por su puesto la fijación de contaminantes, dependen a su vez del follaje, cantidad y del tipo de hoja, que a su vez depende de la especie. No es lo mismo una hoja/canope de un Ficus comparada con la hoja/canope de un Tzalam, por tamaño, grosor y eventualmente por cantidad expresada en biomasa o área foliar, ambos parámetros se pueden obtener con el i-tree, como se puede ver en el siguiente cuadro por distrito.

Claramente se ve que el área foliar aumenta con la cantidad de árboles y hectáreas de

Estrato	Area Foliar (ha)	Area Foliar (%)	Densidad de área foliar (m ² /ha)
Distrito 08	883	6.5 %	7,994
Distrito 07	3,249	24.0 %	7,583
Distrito 05	3,055	22.6 %	6,460
Distrito 01	2,645	19.5 %	6,358
Sum/Prom	13,532		5,616
Distrito 06	2,431	18.0 %	5,056
Distrito 03	483	3.6 %	3,602
Distrito 04	458	3.4 %	2,879
Distrito 02	327	2.4 %	1,576

cada estrato. Sin embargo, en el centro (D8) se ve que la densidad de área foliar es la más alta y que su área foliar es proporcionalmente mayor que en los demás considerando su área, y esto es por el tamaño grande de los árboles en este estrato.

Cuadro 7. Área foliar por hectárea en porcentaje y densidad por estrato para Mérida.

En la siguiente figura se muestra el carbono almacenado por las especies más importantes cuyo total en este momento para el arbolado de Mérida es de **182,100** toneladas. Las barras indican la cantidad que existe por especie y el total entre las principales 13 especies (por población) es de 85,480 t de C que representa el 47% del total de carbono fijo en madera. Este parámetro indica claramente la importancia de la especie (por su tipo de madera, hojas y crecimiento) en la capacidad de proveer un servicio ambiental. Vemos como especies como Flamboyán, Ficus y Ramón que a pesar de no tener la misma cantidad de individuos en la población que otras especies (entre los 3 son solo el 4.4% del total de la población) tienen el 19% del carbón fijo en Madera mientras que las tres especies principales Waxim, naranja y jabín (con el 30% de la población) solo tienen un 14% del C fijo en madera.

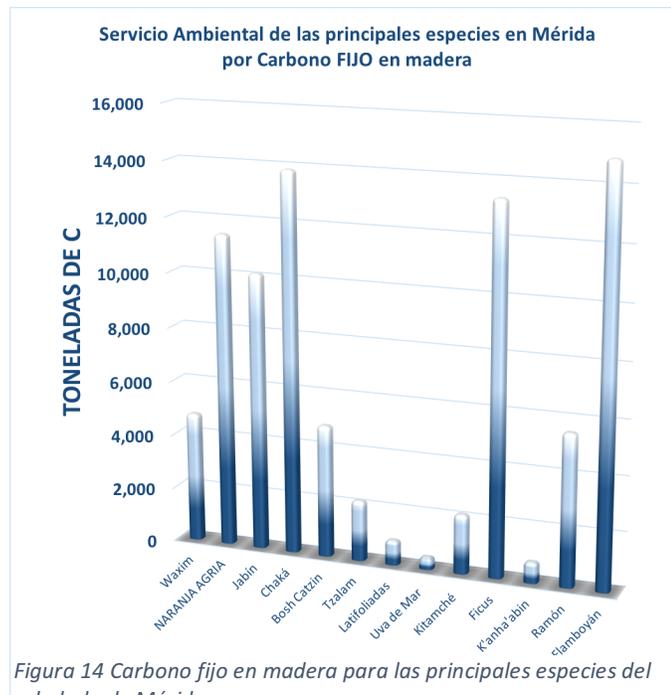


Figura 14 Carbono fijo en madera para las principales especies del arbolado de Mérida.

Es importante mencionar un punto para evitar confusiones, cuando se habla de Carbono se habla del átomo de carbono que tiene un peso atómico de 12, mientras que cuando se habla de CO₂ se habla de una molécula que pesa 44 (por los 2 oxígenos de 16).

Estrato	Carbon Almacenado (kg/ha)	CO ₂ Equivalen (kg/ha)	Carbon Almacena (toneladas)	Carbon Almacenado (%)	CO ₂ Equivalent (toneladas)
Distrito 08	13,005	47,688	14,369	7.9 %	52,690
Distrito 01	8,908	32,666	37,065	20.4 %	135,919
Distrito 07	8,434	30,928	36,138	19.8 %	132,517
Tot/prom	7,557	27,712	182,092		667,732
Distrito 06	7,000	25,669	33,656	18.5 %	123,418
Distrito 05	6,978	25,587	33,004	18.1 %	121,025
Distrito 04	6,974	25,575	11,098	6.1 %	40,697
Distrito 03	6,576	24,116	8,820	4.8 %	32,342
Distrito 02	3,829	14,041	7,942	4.4 %	29,124

Cuadro 8. Carbono fijo por distrito y por unidad de área y su equivalencia en CO₂.

Por lo anterior se presenta el siguiente cuadro que indica la equivalencia entre las dos formas de ver el servicio ambiental para que quede claro, y se sugiere tenerlo presente al analizar los gráficos. El cuadro anterior presenta el C fijo en madera por distrito y está ordenado por carbono almacenado por unidad de área y con la fila amarilla se indica el

promedio y/o total. En este caso solo los distritos 8,1 y 7 se encuentran por arriba del promedio y es importante ver que el distrito 8 a pesar de ser de los chicos, de hecho, el más chico, es el que tiene más C almacenado por hectárea. Esto, una vez más, se debe al tamaño grande de los árboles en el distrito. Y claro en la cantidad bruta en toneladas el Distrito 8 ya no es de los más importantes en este caso es la superficie la que importa. En estos términos el distrito 1, que se puede considerar el económicamente más alto de la ciudad, es el que tiene más C almacenado (20.4% del total) y tiene que ver con el posible mejor cuidado de los árboles por lo que seguramente son más grandes en promedio que los otros distritos.

Por otro lado, el secuestro de Carbono se mide en términos de un periodo, que normalmente es un año, y tiene que ver con la eficiencia fotosintética de las especies y por lo tanto con la cantidad de hojas, tipo y tamaño de las mismas. En la siguiente figura vemos el C secuestrado en 2015 por las 13 principales especies, que conforman prácticamente el 60% de la población total. Se puede ver que la naranja, por su número y tipo de hoja es la especie que más fija, y que al final de las 13 especies ya se había acumulado el 50% del C secuestrado con las 8,000 toneladas del total de **16,637 t** que reporta el i-tree. También en este caso los ficus, Ramón y Flamboyán presentan altos niveles de capacidad de secuestro por las razones mencionadas de tamaño y tipo de hoja.

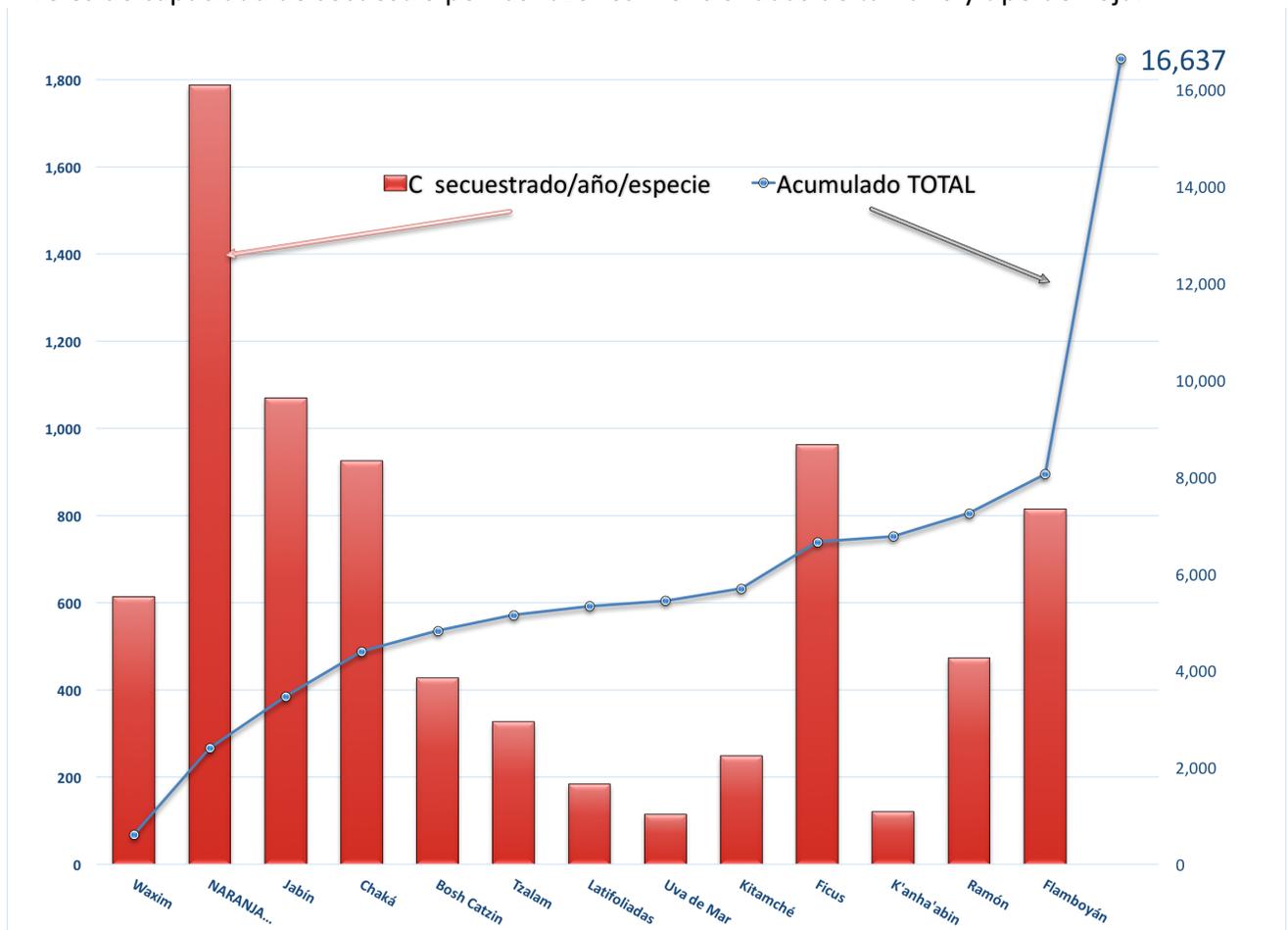


Figura 15 Capacidad de fijación anual de C por las principales especies de Mérida.

En cuanto a la capacidad de fijación por distrito a continuación tenemos la siguiente figura que muestra el C bruto, neto y su equivalente de CO₂ que es fijado en un año. En esta figura se nota una vez más la influencia del tamaño de los árboles en el beneficio ambiental, concretamente el D8 dentro de los distritos chicos tiene prácticamente el doble de capacidad de fijación neta de C que el D2 y D3 y diez veces más que el D4. La gran diferencia en el D4 puede ser por dos factores, primero por las especies que tiene donde resulta que la naranja agria es la especie con 26% de la población del distrito (el más alto de todos) y segundo por la condición de sus árboles que para ser un distrito chico tiene un porcentaje alto de árboles muertos y muriendo.

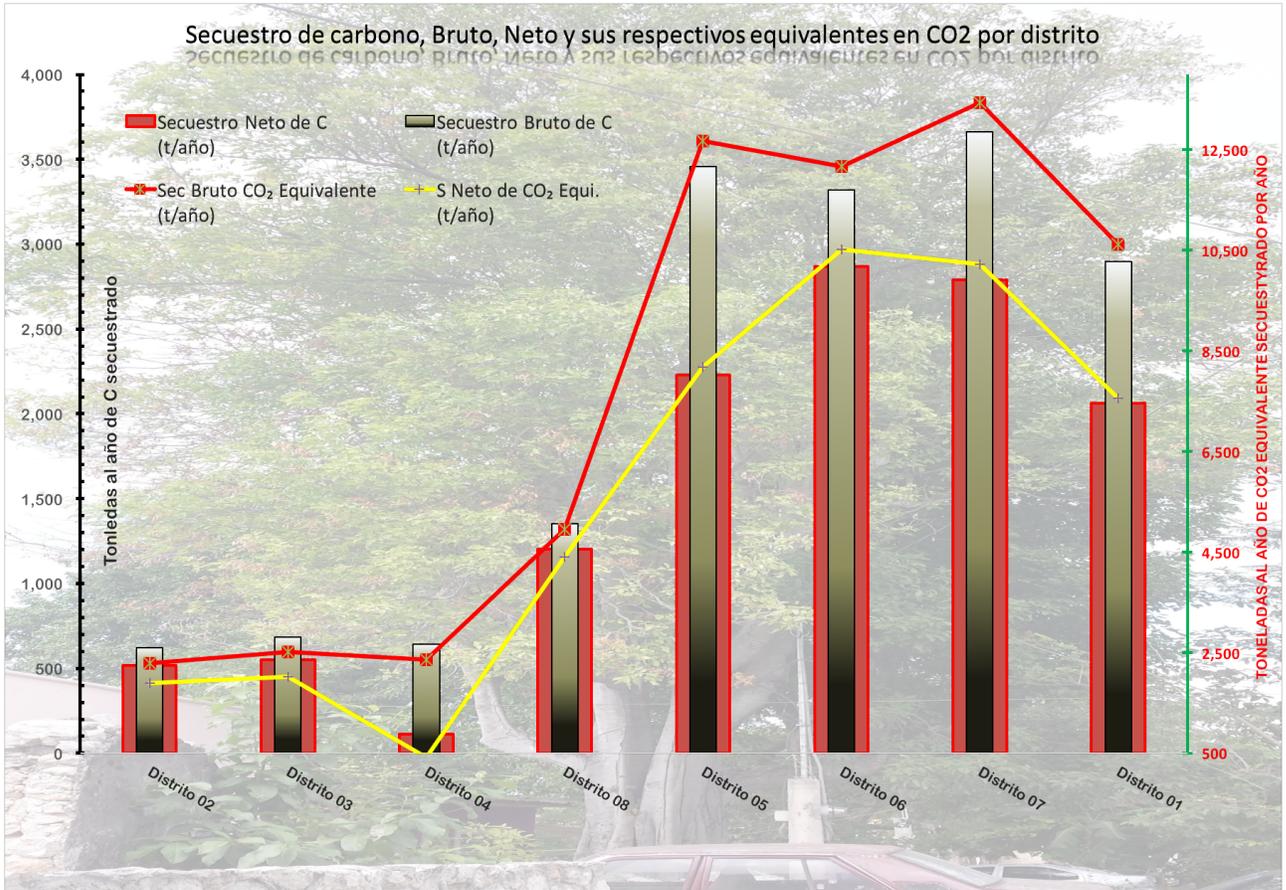


Figura 16 Secuestro de carbono bruto, neto y equivalente en CO₂ por Distrito en Mérida.

4.2 Fijación Neta de Carbono

Los árboles como todo ser vivo respiran y liberan CO₂, afortunadamente liberan mucho menos de lo que alcanzan a fijar en las cadenas de lignina de la madera, pero si liberan una cantidad. En la siguiente figura, vemos el secuestro neto de las principales especies. En términos generales, con respecto al valor reportado anteriormente la disminución promedio es de 25%, con variaciones fuertes entre especies como se puede ver. El valor mostrado es la cantidad de toneladas de C fijo ya neto de las principales especies, y las barras representan la variación en porcentaje de reducción del C bruto al C neto.

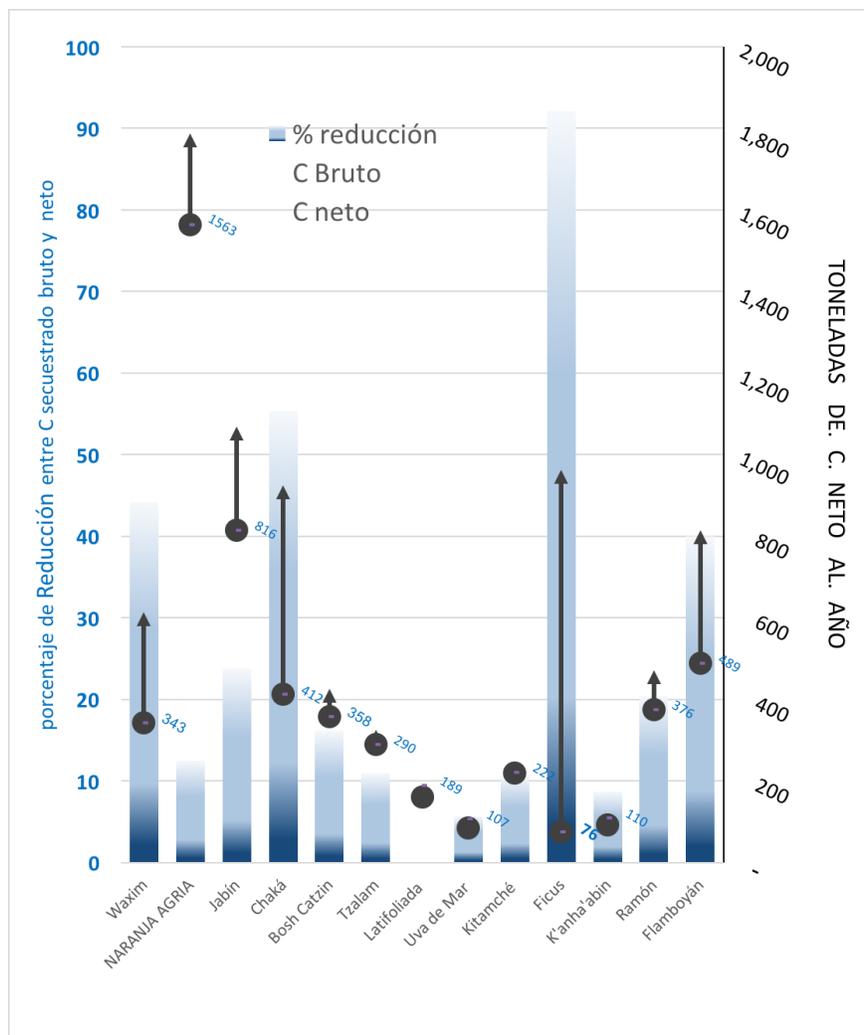


Figura 17 Capacidad de fijación de Carbono Neto y la reducción con el bruto de las principales especies de árboles en Mérida.

Se puede ver que las especies con mayor porcentaje de reducción son aquellas con mayor diferencia entre el C secuestrado Bruto y el Neto. Esta información nos sirve para seleccionar especies que realmente sean efectivas en el secuestro de carbono, caso específico el del FICUS. Esta especie es muy eficiente secuestrando como lo vimos en la gráfica de secuestro bruto, con 962 t/año, pero por su metabolismo aparentemente consume mucha energía y libera gran cantidad de CO₂ por lo que su nivel de fijación neto esta en 76 t/año, es decir es tan solo un 8% del valor bruto lo que significa una reducción del 92% del valor original. Otras especies que liberan mucho CO₂ y por lo tanto sus valores netos bajan mucho más que el promedio de 25% son Waxim (44% del valor bruto), Chaka (55%) y el Flamboyán que disminuye a un 40% del valor de C secuestrado bruto. Mientras que la naranja agria solo disminuye un 13% de su valor de C secuestrado bruto.

En lo que respecta a la capacidad de secuestro en el siguiente cuadro se muestra separado por distritos y se mide en kilogramos por año por hectárea. Considerando todos los distritos y especies de Mérida la disminución de **16,636 a 12,334 t/año** fue de 25.8%

Estrato	Capacidad. De. secuestro BRUTO de C (kg/año/ha)	Secuestro BRUTO de C (t/año)	Capacidad de secuestro NETO de C (kg/año/ha)	Secuestro NETO de C (t/año)
Distrito 08	1,223	1,351	1,087	1,201
Distrito 07	855	3,663	651	2,788
Distrito 06	690	3,318	597	2,870
Total/Promedio	690	16,636	512	12,334
Distrito 01	696	2,896	496	2,062
Distrito 05	731	3,457	472	2,231
Distrito 03	511	685	410	550
Distrito 02	301	623	249	517
Distrito 04	405	644	72	114

Cuadro 9. Capacidad de secuestro bruto y neto de carbono por distrito en Mérida.

Los distritos se ordenaron por la capacidad de secuestro NETO por unidad de área de mayor a menor y el renglón amarillo indica el promedio, o total según sea el caso, lo que nos permite ver que a pesar de ser el distrito más chico el número 8, tiene la mayor capacidad de fijación Neta/Ha por lo que se comentaba anteriormente, el tamaño de sus árboles. El analizar a los distritos por su capacidad de fijación por unidad de área permite hacer una comparación en los mismos términos ya que los valores brutos o netos siempre tendrán la influencia del tamaño o superficie de los distritos junto con el tamaño de su arbolado. Por ejemplo, el D5 tiene el segundo lugar en secuestro bruto, lo que es de esperarse por ser el segundo mayor y con el 25% de la población, pero el hecho de que su capacidad este por debajo del promedio en un 8% indica que el estado general de los árboles es malo porque no puede secuestrar C igual que otro distrito grande. En el mismo tenor tenemos que el D4 prácticamente no alcanza a secuestrar nada y esto implica que el crecimiento del arbolado será muy lento y tardará mucho en mejorarse la capacidad de beneficios ambientales en ese distrito si no se hace algo al respecto. Como comparación el secuestro neto por hectárea en Mérida fue de 0.51 t/ha/año que está a niveles de Barcelona (0.54), y Boston (0.49) y Syracuse (0.54 t/ha/año) en los Estados Unidos (Chaparro, L., 2009).

4.2 Incremento en infiltración

El incremento en infiltración que logran los árboles es por dos efectos. El primero más intuitivo es por los canales o perforaciones que en el suelo hacen las raíces que aceleran la infiltración al subsuelo. El segundo es por el efecto de desaceleración de las hojas a las gotas de lluvia que permite que caigan más despacio y menos intenso que a su vez, permite su absorción por el suelo al mismo tiempo que reduce la erosión por el golpe. Además, si la lluvia no es torrencial existe una intercepción de agua en las hojas que se queda en la superficie y eventualmente se vuelve a evaporar al medio pero que NO llega al suelo y por lo tanto no causa ni erosión ni drenaje porque no se infiltra.

Este servicio es totalmente dependiente del tipo de arbolado, especie y sus características de raíces y hojas. El siguiente cuadro muestra los datos para las 15 principales especies

Nombre común	Area Foliar (ha)	Transpiración (m ³ /año)	Agua Interceptada (m ³ /año)	Incremento en infiltración (m ³ /año)
Total de la poblacion.	13,532	11,838,069	2,436,680	454,998
Waxim	556	486,026	100,041	18,680
NARANJA	833	728,471	149,944	27,999
Jabín	1,063	930,282	191,484	35,755
Chaká	427	373,308	76,839	14,348
Bosh Catzin	342	299,293	61,605	11,503
Tzalam	476	416,309	85,691	16,001
Coco	816	713,733	146,911	27,432
Latifoliada	160	140,048	28,827	5,383
PLATANO	146	128,095	26,366	4,923
Uva de Mar	96	84,355	17,363	3,242
Kitamché	224	196,222	40,389	7,542
Guanabana	166	144,797	29,804	5,565
Laurel de la india	633	553,532	113,936	21,275
Genero Palma	400	349,753	71,991	13,443
K'anha'abin	115	101,007	20,791	3,882

Cuadro 10. Efecto sobre la infiltración y reducción de drenaje de las principales especies en Mérida.

que entre ellas acumulan el 48%, es decir la mitad, del incremento en infiltración de todo el arbolado o sea 216,975 m³ del total de los 454,998 m³ totales calculados. Sobresalen de la lista el Jabín, como el más promotor de la infiltración, y luego la naranja agria y el coco con casi la misma cantidad, aunque

cabe señalar que la población de coco es mucho menor

que la naranja lo que habla de su gran capacidad de incremento en infiltración. Esta característica es importante considerarla en la selección de especies por beneficio ambiental en situaciones que lo requieran. Otro de los importantes es el laurel de la india por su amplio sistema radicular que forma, y que es la causa precisamente de que no se recomiende en situaciones urbanas con poco espacio o en banquetas y situaciones que lo limiten. En este mismo cuadro además se incluyen las relaciones hídricas de las especies y su área foliar.

La transpiración es la cantidad de agua que se mueve a través de la planta y se libera en la atmosfera, mientras que la evaporación de los árboles es la cantidad de agua liberada a la atmosfera desde la superficie de la planta (hojas y tallo). Estos valores dependen de lo exuberante del follaje en el canope y en este momento sirven como base para futuras comparaciones que se puedan realizar. Cabe mencionar que entre mayor sea el valor de transpiración e interceptación y consecuente evaporación del agua, el arbolado estará en mejores condiciones de proveer una mejor sensación de frescura y humedad.

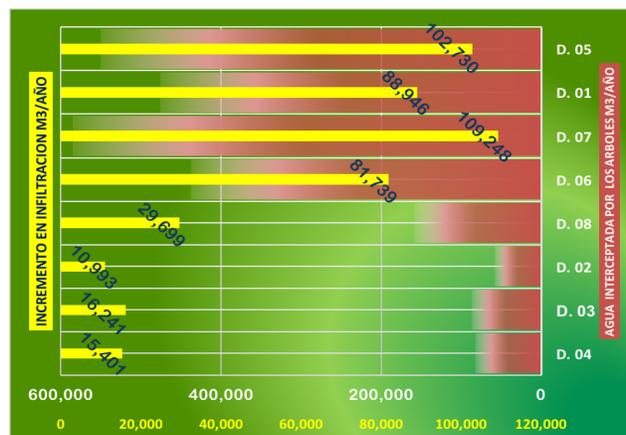


Figura 18 Efecto del arbolado por distrito en el incremento de infiltración.

4.2.1 Reducción de escorrentía por estrato

El análisis del aumento de infiltración o reducción de escurrimientos de agua por causa de los arboles por distrito se muestra en la figura anterior. Junto con los metros cúbicos de agua que se infiltran por el arbolado se muestra el agua interceptada y por lo tanto re- evaporada a la superficie. El factor entre el agua interceptada y el agua infiltrada es de 5.3

4.3 Producción de oxígeno

Otro servicio ambiental es la liberación de oxígeno por causa de la fotosíntesis que es un servicio complementario y aditivo a la fijación de CO₂. La producción neta de oxígeno en un árbol está directamente relacionada con la cantidad de CO₂ que secuestra, que a su vez está ligada a la acumulación de biomasa por la especie. En total la producción de oxígeno por todo el arbolado se calculó en **32,890 t** las 15 especies del siguiente cuadro, solamente entre ellas producen el 59% (19,430 t) de este total. A pesar de lo anterior este beneficio es prácticamente insignificantes ya que existe una gran cantidad de oxígeno en la atmosfera y lo que puedan aportar los arboles no es significativo.

Este parámetro se comporta directamente proporcional a la cantidad de árboles que existen en cada estrato como se ve en la siguiente figura. También se presenta la capacidad de producción por unidad de área y vemos nuevamente el efecto y la importancia de árboles grandes con el ejemplo del D8 que es que tiene mayor producción/hectárea de todos.

Especie	Oxigeno (t)	Area foliar (ha)
NARANJA AGRIA	4,170	833
Jabín	2,170	1,063
Laurel de la india	2,100	633
Flamboyán	1,300	394
Algarrobo	1,220	333
Chaká	1,100	427
Ramón	1,000	471
Bosh Catzin	950	342
Waxim	910	556
Guaya o Huaya	860	294
AGUACATE	810	257
Tzalam	770	476
MANGO	720	181
almendro	710	263
Caimito	640	270

Cuadro 11. Producción de oxígeno por las especies más importantes de árboles en Mérida.

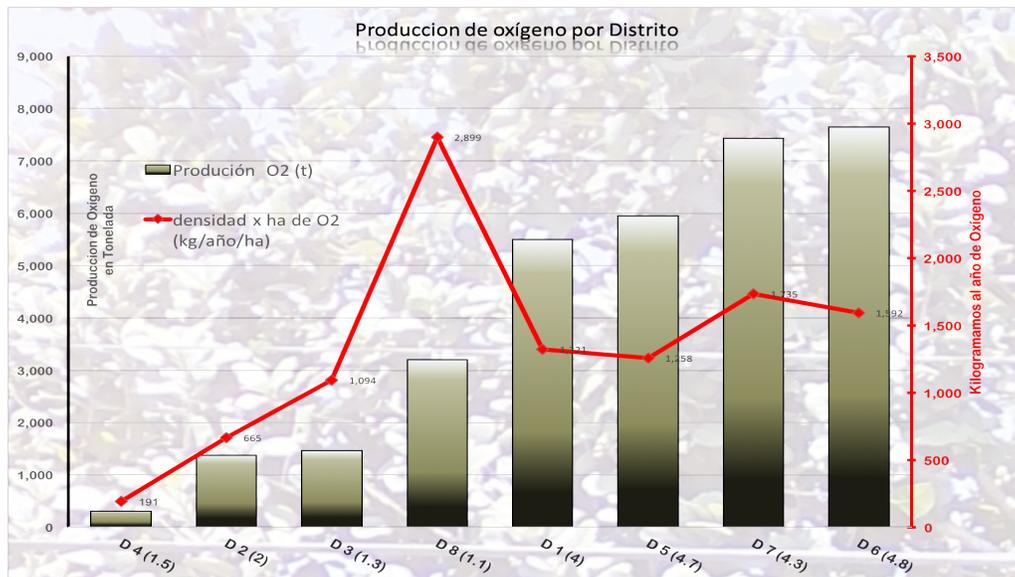


Figura 19 Producción de oxígeno por distrito en Mérida.

4.4 Remoción de contaminantes

La remoción de contaminantes es uno de los principales beneficios ambientales que proporcionan los árboles ya que tienen efectos directos sobre la salud como es el caso de la remoción de PM_{2.5}, que está muy relacionado con afectaciones a las vías respiratorias.

En el caso de los gases de efecto invernadero el efecto en la salud es por decirlo de alguna manera indirecto o como una consecuencia de la reducción de gases que causan el aumento de la temperatura. El caso de las PM_{2.5}, se remueven cuando se depositan en la superficie de las hojas, y pueden volver a ser resuspendidas a la atmósfera si no se remueve por lluvia o son transferidas al suelo. Una combinación de eventos puede causar valores positivos o negativos dependiendo de factores atmosféricos (ver el anexo 2 para más detalles).

El arbolado de Mérida tiene una capacidad de remoción de **175,600 t/año** de la siguiente manera:

Contaminante	t/año	%/total
Ozono	89.3	51%
Monóxido de C	54.8	31%
PM 2.5	11.9	7%
Dioxido de azufre	10.1	6%
Nitratos	9.5	5%
TOTAL	175.5	

Lo anterior consecuencia de las especies existentes, su tamaño y cantidad de hojas como lo podemos ver en el listado de las principales especies que remueven contaminantes. La lista esta ordenada por grupos primero están las especies que entre todas fijan la mitad de los contaminantes y dentro de ese grupo están ordenadas por su importancia por su población. La finalidad es de proveer argumentos ambientales para la selección de especies con el criterio de remoción de contaminantes. Por ejemplo, el algarrobo (*Samanea saman*) es la 39^{ava} especie por su población (14,216 individuos apenas el 0.6%), pero se encuentra dentro de las 12 más importantes especies que remueven contaminantes. Incluso existe bastante literatura

	Especie	t/año
	Ton. totales removidas	175.55
12 especies 50% de la remoción	1 Waxim	7.21
	2 NARANJA AGRIA	10.80
	3 Jabín	13.80
	4 Chaká	5.54
	5 Bosh Catzin	4.44
	6 Tzalam	6.17
	7 Coco	10.58
	13 Laurel de la india	8.21
	14 Genero Palma	5.19
	17 Ramón	6.12
	18 Flamboyán	5.11
	39 Algarrobo	4.32
5 mas y 60%	19 Guaya o Huaya	3.82
	21 AGUACATE	3.34
	29 Caimito	3.51
	37 almendro	3.42
	38 MAMEY	3.23
7 especies+ y 70%	11 Kitamché	2.91
	16 Palma Real	2.32
	35 MANGO	2.35
	41 ZAPOTE	2.69
	52 TAMARINDO	2.68
	59 Pich	2.75
	48 Almendro	2.31
9 especies mas y el 80%	8 Latifoliada maderable	2.08
	9 PLATANO	1.90
	12 GUANABANA	2.15
	27 CIRICOTE	1.96
	30 Huano	2.24
	43 Roble	1.61
	46 Ceiba	2.12
	69 Laurel	1.88
	22 Citrico	1.56

Cuadro 12. Fijación de contaminantes/especie en orden de importancia relativa y de posición en la tabla de población.

que identifica ya a las especies por su tolerancia y capacidad de remover contaminantes específicos. Dentro de la suite de programas de i-Tree, el *i-Tree Species* cuenta con una base de datos para seleccionar especies con criterios muy específicos de capacidad de remoción de contaminantes que se desee, y tolerancia a otros, además claro de poder filtrar por condiciones climáticas y tamaño máximo potencial. El siguiente cuadro muestra las especies más importantes para mejorar la calidad del aire en climas templados, específicamente en EUA.

Ozono	Monóxido de C	Total	
<i>Ulmus procera</i>	<i>Tilia americana*</i>	<i>Ulmus procera*</i>	*= especie o diferente cultivar recomendado como árbol para la calle en condiciones
<i>Tilia europea *</i>	<i>Fagus grandifolia</i>	<i>Tilia europea</i>	
<i>Fagus grandifolia</i>	<i>Tilia tomentosa*</i>	<i>Liriodendron tulipifera *S</i>	
<i>Betula alleghaniensis</i>	<i>Ulmus rubra</i>	<i>Fagus grandifolia</i>	
<i>Liriodendron tulipifera *S</i>	<i>Fagus sylvatica</i>	<i>Tilia platyphyllos*</i>	I= tolerancia intermedia a contaminantes,
<i>Tilia americana *</i>	<i>Betula alleghaniensis</i>	<i>Betula alleghaniensis</i>	S= sensible a contaminantes, T= tolerante a SO2,
<i>Fagus sylvatica</i>	<i>Tilia euchlora*</i>	<i>Fagus sylvatica</i>	
<i>Tilia platyphyllos *S</i>	<i>Ulmus procera*</i>	<i>Tilia americana*</i>	Desconocido para NO2.
<i>Betula papyrifera</i>	<i>Ginkgo biloba*</i>	<i>Ulmus americana</i>	
	<i>Liriodendron tulipifera *</i>	<i>Ulmus thomas</i>	
Pequeñas Partículas PM	Dióxido de S y N	Total	
<i>Ulmus procera *</i>	<i>Ulmus procera *</i>	<i>Tilia cordata*</i>	I/U= tolerancia intermedia a SO2
<i>Platanus x acerifolia *</i>	<i>Tilia europea *</i>	<i>Tilia tomentosa*</i>	S/U = sensible a SO2 desconocido a NO2 y
<i>Cupressocyparis x leylandii</i>	<i>Populus deltoides T</i>	<i>Betula papyrifera</i>	
<i>Juglans nigra</i>	<i>Platanus x acerifolia *T</i>	<i>Celtis laevigata *</i>	T/S =tolerante a SO2 y sensible a NO2
<i>Tilia europea</i>	<i>Liriodendron tulipifera *T</i>	<i>Fraxinus excelsior *</i>	
<i>Abies alba</i>	<i>Juglans nigra</i>	<i>Ulmus crassifolia</i>	
<i>Larix decidua</i>	<i>Betula alleghaniensis</i>	<i>Betula nigra *</i>	
<i>Picea rubens</i>	<i>Fagus grandifolia</i>	<i>Larix decidua</i>	

Fuente: Nowak, 2000 Nota: zonas bioclimáticas y otros factores se tienen que considerar

Cuadro 13. Especies más importantes para el servicio ambiental de remoción de contaminantes en EUA.

Finalmente, por su dependencia de la temperatura y luz a continuación se presenta la remoción mensual de contaminantes por el arbolado de Mérida.

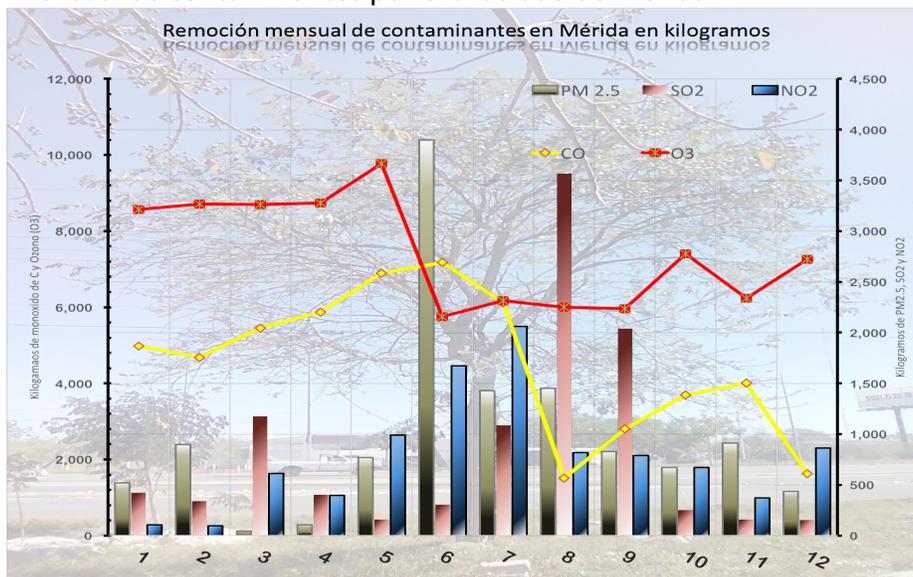


Figura 20 Remoción mensual de contaminantes en Mérida en kg.

Esta remoción de contaminantes i-Tree ECO la valúa equivalente a \$22,500,000.00 pesos basados en los siguientes valores para cada contaminante: \$27.38 por kilogramo de monóxido de carbono(CO), \$192.72 por kilogramo Ozono (O3), \$192.72 por kilogramo de Nitratos (NO2), \$47.19 por kilogramo de sulfatos (SO2), y \$128.70 por kilogramo de PM_{2.5}. Estos valores provienen de los valores europeos calculados por van Essen et al (2011) o de ecuaciones de regresión de BenMAP (Nowak et al, 1994).

4.5 Bioemisiones de los árboles

Se refiere a la emisión de compuestos orgánicos volátiles (VOC del inglés) e incluye Monoterpenos, Isopreno y la suma de ambos, estos compuestos contribuyen a la formación de ozono, y Monóxido de Carbono por foto descomposición (ruptura química por efecto de la luz). La cantidad de emisiones depende de la especie, hojas, biomasa, temperatura del aire y otros factores atmosféricos. En el siguiente Cuadro comparativo entre 3 ciudades (Chaparro, L.,2009) vemos que Mérida produce considerablemente más

VOC	Barcelona	Brooklyn	Mérida
Isopropeno	95.4	49.9	272
Monoterpeno	52.6	13.9	61.5
TOTAL	148	63.8	333.5
Cantidad de arboles	1,419,823	610,000	2,317,795
Hectáreas	10,121	18,290	24,000

que las otras ciudades, pero hay que recordar que la temperatura juega un papel importante, y en Mérida nunca hay las bajas temperaturas que, en las otras ciudades, además, tanto la superficie como la cantidad de árboles es mayor. En la siguiente

figura se ve la cantidad liberada por las principales especies, y este factor puede ser determinante en un

momento dado para la selección o no selección de una especie para programas de reforestación.

Cuadro 14. Comparativo de producción de VOC entre dos ciudades y Mérida

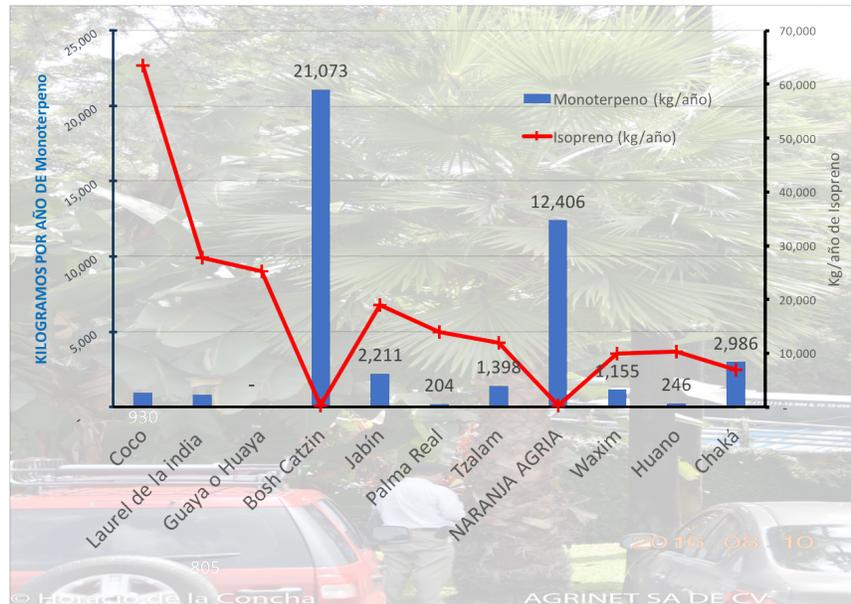


Figura 21 Producción de VOC por las principales especies de árboles de Mérida.

Los VOC son compuestos de Carbono con alta presión de vapor a temperatura ambiente, resultante de su bajo punto de ebullición que causa que las moléculas se evaporen o sublimen del estado líquido al sólido. La mayoría de olores y esencias naturales tienen esta característica precisamente para moverse por el aire y causar su efecto. En algunos árboles se cree que es para atraer a polinizadores, entre otros efectos y a repeler otros insectos dañinos.

5. Conclusión y recomendaciones

Derivado de las condiciones del arbolado y del servicio ambiental que proveen, a continuación, se emiten recomendaciones y aspectos a considerar cuando se tomen decisiones de acciones a realizar. Vale la pena mencionar que el i-Tree genera reportes con información diversa, y que afortunadamente para el caso de Mérida si se pudieron incluir los datos de contaminación local que se obtuvieron con la estación de medición de la SEDUMA (Secretaría de desarrollo Urbano y Medio Ambiente) localizada en la oficina en el centro de la ciudad de Mérida en la Calle 64 No. 437 x 53 y 47-A. Por otro lado, los datos de clima que se incorporaron al programa para los cálculos de escorrentía fueron los del aeropuerto internacional Manuel Crescencio Rejón.

La siguiente figura resume mucha de la información mencionada y da una idea de las diferencias geográficas entre distritos.

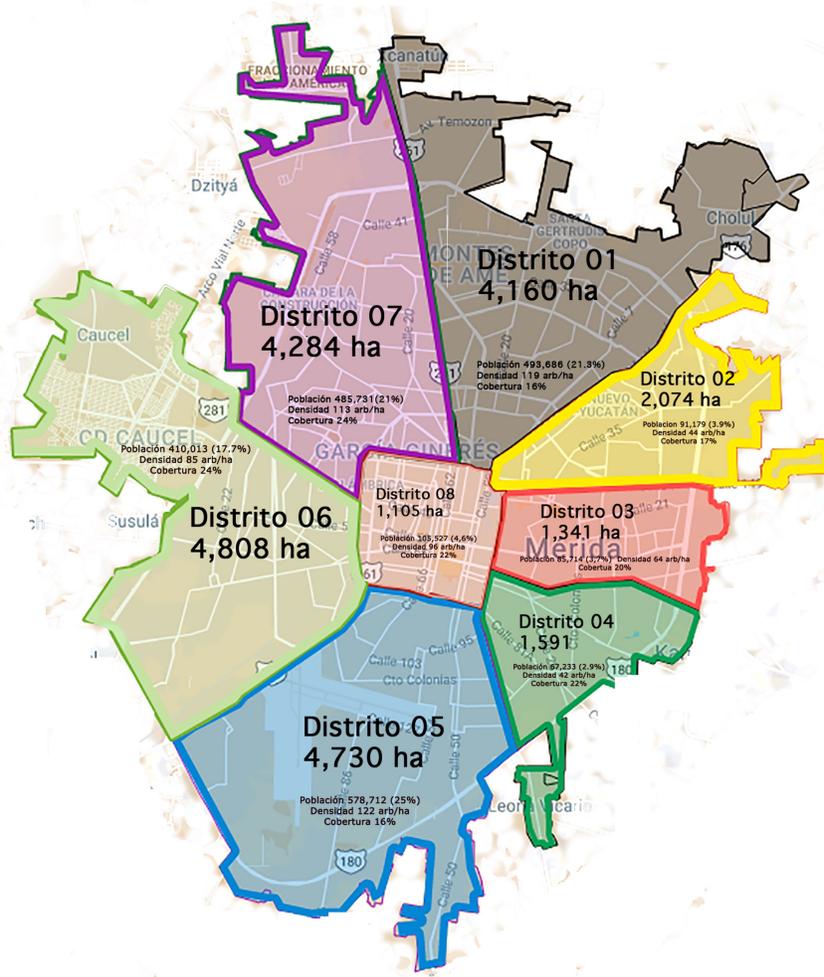


Figura 22. Distribución de la población de árboles por distrito y % de cobertura.

Es claro de esta figura que hay distritos en mejores condiciones que otros, sin importar el tamaño, y que esto tiene más relación con el nivel de desarrollo. Por ejemplo, arriba del promedio de cobertura están los distritos 4 y 8 de los chicos y 6 y 7 de los distritos grandes, mientras que la parte noreste de la ciudad (distritos 1,2, y 3) están por debajo del promedio de cobertura arbórea, así como el 5 que se puede catalogar de industrial. Cabe mencionar que el porcentaje de cobertura por distrito se calculó del promedio de cobertura estimado para las parcelas medidas. Es decir, el programa no lo calcula por estrato solo en general, y por eso se tiene que realizar con los datos tomados. En cuanto a densidad de árboles por hectárea podemos ver tres grupos los de más de 100 arboles/ha son los distritos 1,7 y 5, luego entre 50 y 100 a/ha el 8,6 y 3 y debajo de 50 a/ha. los distritos 2 y 4 del lado este de la ciudad. En función a esto hay que considerar programas de plantación más intensos en este lado de la ciudad.

5.1 Arbolado

En términos generales, y revisando el siguiente cuadro donde podemos ver el comparativo del arbolado de Mérida contra 11 ciudades, Playa del Carmen en México y 10 en el extranjero, tenemos que hay condiciones para calificar de prometedor el arbolado actual de Mérida. Por ejemplo, el porcentaje de cobertura está dentro del promedio, la población de árboles tampoco está baja, ni la cantidad de Carbono almacenado, en cuanto a carbono secuestrado por año la cifra está por arriba de Washington que tiene una población de árboles similar, aunque de menor población, pero también forma parte de una metrópolis.

CIUDAD	Porcentaje de Cobertura	Población	Carbono Almacenado	Carbono secuestrado /año
	arboles	de arboles	(toneladas)	(toneladas/año)
London, UK	14.0	8,421,000	2,367,000	77,200
New York, US	21.0	5,212,000	1,226,000	38,400
Toronto, Canada	20.0	10,200,000	1,100,100	46,700
Barcelona, Spain	25.2	1,419,823	113,437	5,422
Mérida, Yuc. MX	21.2	2,318,000	182,100	16,640
El Paso, TX	5.1	1,281,000	92,800	7,430
Washington, US	28.6	1,928,000	474,000	14,600
Boston, US	22.3	1,183,000	289,000	9,500
Milwaukee, WI	21.6	3,377,000	434,000	15,500
Edinburgh, UK	17.0	638,000	145,611	4,721
Playa del Carmen, MX	20.2	582,775	50,260	5,011
Providence, US	23.9	415,000	124,000	4,030
PROMEDIO	20.0	1,639,355	189,790	11,145

Cuadro 15. Comparativo del arbolado de Mérida con otras ciudades.

Claro que en esta comparación el clima es muy importante y el tipo de clima de Mérida y vegetación (Selva baja caducifolia) no es uno que favorezca árboles grandes, lo que se demuestra en el diámetro promedio y altura de árboles que indica que son chicos, y revisando las especies vemos algunas son de tipo pionero.

Una comparación más interesante es la que se puede hacer con estas cifras poniéndolas en perspectiva con la población de la ciudad y a su área metropolitana o superficie. En ese sentido el siguiente cuadro muestra en cuadros rojos los valores arriba del promedio para las 12 ciudades después de dividir las cantidades brutas de árboles entre el número de habitantes y las hectáreas de la ciudad. El arbolado de Mérida está por debajo del promedio en tamaño, es decir los árboles son más chicos que el promedio, incluso más de la mitad del tamaño promedio, expresado en kg de biomasa.

CIUDAD	Cantidad de árboles por		Tamaño de	Capacidad de
	Hectárea	Habitante	árboles (kg)	Fijación/ha/año
Playa del Carmen MX	103.5	3.0	86.2	890.1
Washington, US	108.9	3.0	245.9	824.9
Providence, US	77.8	2.3	298.8	755.4
Toronto, CA	161.9	3.9	107.9	741.3
MÉRIDA, Yuc	96.0	2.7	78.6	693.3
Milwaukee, WI	135.6	5.7	128.5	622.5
Barcelona, SP	139.2	0.9	79.9	531.6
London, UK	53.6	1.0	281.1	491.1
New York, US	66.1	0.6	235.2	486.7
Edinburgh, UK	55.6	1.3	228.2	411.7
Boston, US	51.0	1.9	244.3	409.5
El Paso, TX	31.3	2.0	72.4	181.3
PROMEDIO	90.0	2.4	173.9	586.6

Cuadro 16. Comparativo relativo del arbolado de Mérida con otras ciudades en función a su superficie y población.

Sin embargo, en los otros indicadores se encuentra arriba del promedio e incluso en la capacidad de fijación es de los más altos, probablemente porque como se comentó anteriormente, la temperatura ambiental nunca baja de la mínima para que la mayoría de la vegetación pueda continuar fijando contaminantes todo el año y muchas de las especies no pierden sus hojas.

Puede entonces decirse que Mérida goza con un arbolado en población competitivo, es decir existen suficientes individuos para lograr una cobertura y servicios ambientales mejores, sin embargo, estos son pequeños y están mal distribuidos.

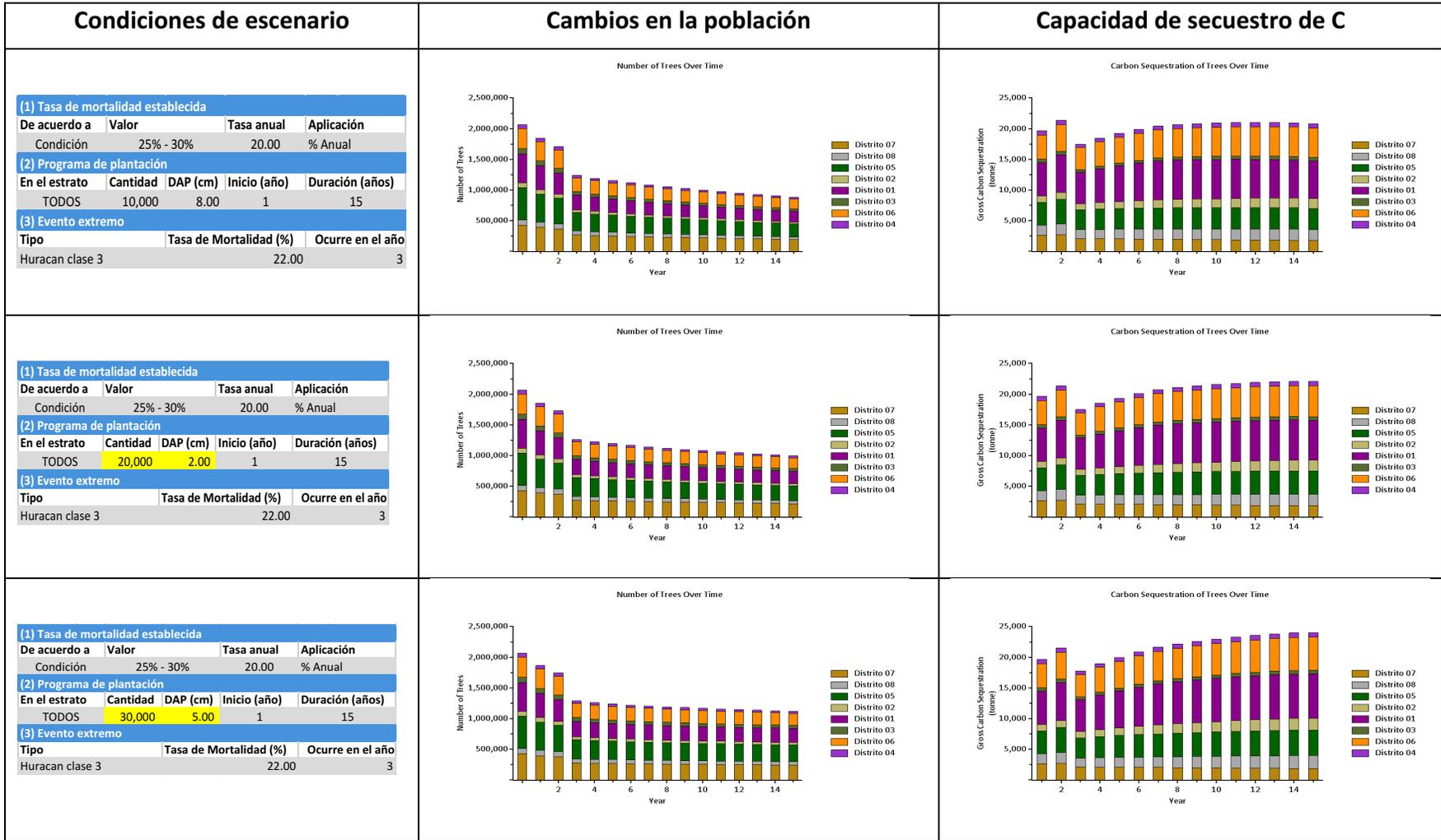
5.3 Pronósticos

El i-Tree tiene dentro de sus opciones para cálculos la opción de poder llevar a cabo proyecciones de escenarios en función a 3 variables que permiten ver el comportamiento de la población y el de sus servicios ambientales a largo plazo. Las variables que se pueden modificar son:

- 1) **Tasa de Mortalidad anual**, los árboles por ser seres vivos tienen una tasa de mortalidad natural que varía según las condiciones en que encuentren. El programa tiene como tasas bases de mortalidad 3, 10 y 50% para árboles sanos, enfermos y muriendo (de acuerdo a la clasificación de condición de copa descrita en el manual de toma de datos). Además, el programa permite especificar para género, condición o estrato condiciones específicas de mortalidad. En el caso que se va a presentar se incrementó el porcentaje de mortalidad a 20% anual de los árboles críticos o enfermos ya que son más susceptibles de morir en la medida que las condiciones ambientales, por aumento en la contaminación y temperaturas, se compliquen.
- 2) La segunda variable que se puede modificar es la de **programa de plantación**, en este caso es posible variar el lugar donde se lleve a cabo o distrito, la cantidad de árboles y su tamaño expresado en DAP (cm) y por supuesto el inicio y duración del programa. Para el siguiente ejemplo esta fue la única variable que se cambió para mostrar la importancia de un buen programa de reforestación. Con tal motivo, se definieron tres escenarios:
 - I. Siembra en todos los distritos a razón de 10,000/año de 8 cm (3") de diámetro.
 - II. Igual, pero 20,000/año de 2.5 cm (1") que es lo más similar al programa actual y
 - III. Siembra en todos los distritos, pero de 30,000/año de 5 cm (2") DAP que sería un incremento del 50% sobre el programa actual.
- 3) Finalmente, la herramienta tiene la opción de introducir **variables catastróficas** para la población en la forma de clima o plaga y en qué momento que se presenten. Para la presente corrida se estableció la presencia de un huracán clase 3 en el año 3 con una tasa de mortalidad de 22% en toda la población.

Todas las corridas se hicieron a 15 años y con una temporada de crecimiento de todo el año ya que Mérida no tiene limitaciones de temperatura. Con las tasas de mortalidad establecidas, y el huracán en el año 3, la población disminuyó en los 3 casos, esta disminución fue mayor entre menos individuos se replantan.

Por otro lado, el secuestro de C del arbolado tiene una relación directa con el tamaño/edad del arbolado, al grado de que el impacto de la reducción en número de individuos se alcanza a compensar ya que la capacidad de secuestro no disminuye al contrario aumento. Sin embargo, no aumenta significativamente y aunque en el último escenario se logra el mayor aumento en capacidad de 16,640 a 24,038 t/año y representa el 44% el incremento neto es de sólo 7,398 t/año que es tan sólo un aumento de 493 t cada año lo cual si lo comparamos con lo que contaminan los coches no es significativo. El incremento en la capacidad de secuestro tiene que ser en términos porcentuales en más de dos dígitos para tener un efecto de mejora en el aire que se respira.



Cuadro 17. Pronóstico de población y capacidad de secuestro de C para 3 escenarios de reforestación durante 15 años en Mérida.

5.4 Metas potenciales para establecer

El establecimiento de metas en función a servicios ambientales o a factores que indirectamente midan el desempeño de los árboles es la manera más eficiente y trascendente de evaluar al arbolado. Las cantidades o montos a incluir en las metas deben de considerarse en función al presupuesto posible para el programa de mejora, que forma parte de un Plan maestro de manejo de arbolado cuya finalidad es que en base al presente inventario defina acciones concretas para llegar a las metas propuestas en los distritos adecuados según las necesidades detectadas.

Basado en la información del inventario, las condiciones de Mérida en cuanto a crecimiento y necesidades se pueden establecer algunas metas que son factibles, alcanzables y con un presupuesto razonable son:

-  Mantener el porcentaje de cobertura arbórea en 20%.
-  Incrementar la diversidad de especies.
-  Aumentar en 10%/anual la capacidad de secuestro de CO₂ del arbolado, es decir al menos 2,000 t al año.

Se pueden ir construyendo metas específicas por estrato en función a las características de cada uno e incluir especificaciones en cuanto a manejo o mantenimiento de especies concretas. Mucho va a depender de la visión que se tenga, de hacia donde se quiere llegar con el arbolado y de los recursos con que se cuente, o en su defecto lo anterior sentara las bases para elaborar un presupuesto a mediano plazo de lo necesario en equipamiento, capacitación y en personal y gastos de operación (vehículos, gasolina, etc.) para lograr las metas. La elaboración de un presupuesto forma parte de la elaboración de un plan maestro para el arbolado que se considera la siguiente fase posterior al inventario. Esto implica una revisión de los programas de reforestación que, si bien se han estado realizando con mucho esfuerzo, es necesario considerar coordinación o asociación con viveristas para proveer diversidad, tamaño, calidad de raíces y sanidad de planta que permita reforestaciones más efectivas que cumplan con metas de servicio ambiental.

5.5 Recomendaciones

Las recomendaciones al igual que las metas se deben establecer en función a la visión que se tenga y a la dirección que se le quiera dar al arbolado. Se pueden enumerar algunas recomendaciones generales que se desprenden de lo observado en el inventario. Pero se tiene que analizar estrato por estrato para emitir las específicas para cada uno que acompañe a las acciones que se van a realizar.

5.5.1 Lineamientos Generales

Con la información presentada quedo establecido que hay dos grandes necesidades del arbolado de Mérida, primero que tiene que desarrollarse y contar con más individuos de mayor tamaño que provean de mayor servicio ambiental. En segundo lugar, por la fragilidad de la población a eventos catastróficos y al acelerado crecimiento de la mancha urbana hay que buscar mantener a la población de árboles al menos en la cantidad per

cápita que se tiene actualmente y esto requiere de renovar efectivamente, recuperar los que sea posible y cuidar los existentes. Con estos dos conceptos en mente se presentan las siguientes recomendaciones generales.

1.Regular el retiro de arbolado en nuevas construcciones.

-  Establecer una norma para que las nuevas viviendas tengan zonas arboladas que favorezcan la infiltración y arbolado para sombra, procurando dejar en obra todos los árboles de más de 25 cm de DAP.
-  Establecer un programa de rescate de árboles con DAP entre 10-20 cm para replantar en zonas sin árboles del trazo de nuevas calles, avenidas o conjuntos habitacionales.
-  Identificar áreas bajas de acumulación de agua para instalar jardineras o clusters de palmas que tienen un efecto significativo sobre el aumento de infiltración.

2. Implementar un programa de cuidado (nutrición, sanidad y mejora de suelo) para mejorar árboles de 10-20 cm de DAP.

-  Aplicar materia orgánica (mulch) en zonas de goteo para mejorar la estructura y calidad de suelo de los árboles y desarrollar metodología para definir la necesidad de fertilizar un árbol en cuanto a producto y cantidad.
-  Implementar un programa de fertilización emergente en el arbolado de áreas de suelos pobres donde los árboles muestren deficiencias para estimular el desarrollo de copas más sanas y abundantes.
-  Llevar a cabo labores de descompactación de suelo para mejorar infiltración utilizando aire, o medios mecánicos a una buena profundidad.
-  Por la importancia que tienen los cítricos como género, por la cantidad (297,401 o 13% del total de la población), se debería de considerar un programa de difusión contra la enfermedad del Huanglongbing que pudiera entrar a la ciudad y diezmar la población de cítricos. Aconsejar a la población a cuidar un poco más sus árboles y estar pendientes de síntomas de la enfermedad ya que una vez infectado un árbol es imposible su control.

3. Intensificar el programa de reforestación urbana en cantidad, calidad, selección de especies y tamaño de árboles utilizados

-  Establecer una norma de calidad de planta para reforestación en términos de calidad de raíz, porte, diámetro y altura para sitios específicos.
-  Seleccionar y definir la metodología para el trasplante de árboles grandes según el sitio a donde se vaya a trasplantar.
-  Establecer criterios de selección de especies para aumentar la biodiversidad y estudiar la promoción de frutales como opción para el público en general.
-  Analizar con viveristas, o internamente si con el establecimiento de un vivero municipal, se puede resolver la urgente necesidad de producir planta de mejor calidad en follaje y raíces, así como mayor tamaño (+ de 15 cm DAP) y con procedencias de semillas locales o certificadas para asegurar las especies necesarias que provean de un mayor servicio ambiental.

5.5.2 Para el seguimiento y mejora constante

Con la finalidad de establecer los avances a los trabajos se pueden llevar a cabo dos acciones de seguimiento. La primera es el establecimiento de parcelas permanentes de muestreo que no son más que sitios, seleccionados de las parcelas del inventario que cuenten con las especies más significativas en condiciones promedio para realizar medidas 2 a 3 veces por año para detectar cambios en crecimiento, presencia de plagas, anomalías u otras cosas afectando el arbolado. Y, por otro lado, es necesario establecer la actualización de todo el inventario, es decir rehacerlo con una frecuencia, para el caso de Mérida de al menos 5-8 años para ver los efectos del manejo del mismo.

Así mismo es importante realizar un censo de los arbolados de los parques públicos para contar ya con toda la información relevante del arbolado, sobre todo considerando que existen 555 parques y aunque en superficie abarcan solo 456 ha (1.9% de la superficie total de la ciudad) es necesario contar con la información. Se recomienda que en este caso se realice un censo total ya que estos parques son públicos, bajo control del estado y un inventario total de los individuos permitirá llevar un mejor control de mantenimiento y desarrollo. Paralelamente es posible también inventariar árboles monumentales o dignos de preservar, es decir que sean de diámetros mayores a 2 m por ejemplo y alturas mayores a 25 m en buen estado, entre otras cosas para añadirlos al servicio ambiental de todo el arbolado y para tener una lista de supervisión para evitar que se conviertan en árboles de riesgo y se obligue el retiro de los mismos.

En este punto también es importante considerar, como se mencionó anteriormente, la elaboración de un Plan Maestro de Manejo y desarrollo sustentable del Arbolado Urbano de Mérida. En este plan se pueden establecer metas concretas, distrito por distrito.

5.5.3 Para la selección de especies

Los criterios para la selección de especies tienen que considerar la estructura del arbolado que como vimos es que el 80% de la población está en 34 especies de las 134 encontradas y el 70% de la población en solo 22 especies en la ciudad. Lo cual como se mencionó anteriormente no es un precisamente una población muy diversa. El otro factor es que sea nativa y en este sentido el i-tree emite un reporte donde indica el origen de las especies.

De acuerdo a este reporte el 60% de las especies en Mérida es nativa de la región norte, sud América y otra en el área que se puede decir son de la misma zona climática de Mérida. En otras palabras, apenas un 24% son exóticas o introducidas de otro continente, lo cual no es una cifra preocupante, aunque si hay que tenerla en consideración. Las 16% desconocidas incluye las no encontradas en el i-tree por ser endémicas y otras por eso solo se considera que el 24% son exóticas.

Estrato	Africa & Asia	Africa & Australia	Asia & Australia +	Europa & Asia	Norte America +	Norte & Sud America	Norte & Sud America +	Desconocido
Distrito 01	0.20	1.90	9.30	1.00	12.70	38.00	6.80	30.20
Distrito 02	3.30	3.30	24.40		15.50	33.30	10.00	10.00
Distrito 03	3.50	1.20	43.10		16.30	29.10	1.20	5.80
Distrito 04	1.60	3.10	40.70		14.10	26.60	1.60	12.50
Distrito 05	0.50	1.20	22.60	0.70	19.80	34.40	6.20	14.60
Distrito 06	1.10	0.30	20.20	2.00	19.60	43.20	1.20	12.50
Distrito 07	1.50	0.90	21.60		15.80	45.80	5.40	9.00
Distrito 08	1.00	1.00	32.70	2.00	14.40	24.00	3.90	20.20
Area estudio	1.00	1.30	21.00	0.90	16.70	38.10	5.00	16.20

Cuadro 18. Porcentaje de árboles vivos en la población por su región de origen en el inventario.

Por otro lado, como se mencionó anteriormente la biodiversidad de especies en Mérida es relativa, y esto se puede comprobar en el siguiente cuadro donde se muestra el número de familias y cuantas especies presentes la conforman. Es decir, analizando separadamente las palmas y los frutales, de los árboles hay 42 familias representadas por las 94 especies presentes y dentro de estas una familia, las *Fabaceae*, con 22 especies y otras 4 familias, *Moraceae* con 6 especies, *Bignoniaceae* con 5, *Meliaceae* y *Magnoliaceae* con 4 y 3 especies cada una de tal manera que las 40 especies de las 5 familias representan al 41% de la población de árboles. Esto es importante considerarlo al momento de selección ya que como Santamour F.⁵ Indico en su propuesta de 1990, la regla 30/20/10 es una buena directriz para la selección de especies donde no se debe pasar del 30% de los individuos de la población que pertenezcan a una familia, 20% a un género y 10% de una especie.

En el caso de Mérida tres especies conforman el 30% de la población el Waxim (*Leucaena leucocephala*), la naranja agria (*Citrus aurantium*) y el Jabín (*Piscidia piscipula*). Por lo tanto, teóricamente ninguna de estas tres especies sería recomendable utilizar para

plantación con excepción de la Naranja agria (o cítricos e incluso otros frutales en general) que tienen otros fines y además ambientalmente son bastante eficientes, sin embargo, hay estar conscientes de los riesgos sobre todo por la enfermedad del Dragón Amarillo. Con este criterio en mente deberíamos descartar a todas las especies de las 5 familias de la lista, y se deberían seleccionar de las 54

Arboles	%	Frutales	%2	Palmas	%3
Fabaceae	23%	Rutaceae	22%	Areaceae	81%
Moraceae	6%	Annonaceae	9%	Asparagaceae	6%
Bignoniaceae	5%	Boraginaceae	9%	Cycadaceae	6%
Meliaceae	4%	Lauraceae	9%	Agavaceae	6%
Magnoliaceae	3%	Sapotaceae	9%		
Polygonaceae	3%	Acanthaceae	4%		
Rutaceae	3%	Anacardiaceae	4%		
Solanaceae	3%	Euphorbiaceae	4%		
Annonaceae	2%	Grossulariaceae	4%		
Apocynaceae	2%	Malvaceae	4%		

Cuadro 19. Familias más representativas en el inventario por grupo.

⁵ <https://www.ces.ncsu.edu/fletcher/programs/nursery/metria/metria07/m79.pdf>

especies restantes para aumentar la diversidad. También se podría utilizar el IDR como criterio de selección y la eficiencia en servicios ambientales.

En relación a este último punto dentro de la suite de programas de la herramienta i-Tree existe una opción el *i-Tree Species*⁶ que no es otra cosa más que una base de datos con la información de la capacidad de realizar servicio ambiental de las especies. Esta base de datos es accesible y contiene filtros para seleccionar especies con menor sensibilidad a contaminantes y más eficientes en la fijación de los mismos para un lugar determinado, y gracias a que los datos climáticos de Mérida ya se encuentran cargados en el programa fue posible obtener una lista de posibles especies. Esta lista permite ampliar la gama de especies potenciales a recomendar, además de las condiciones del lugar, se pide que la lista tuviera especies con crecimiento máximo de 15 m y que incluyera el 20% de las mejores especies posibles con:

- (1) Muy buena⁷ capacidad de remoción de contaminantes en general (se puede especificar de entre 5 contaminantes),
- (2) Que fueran excelentes en cuanto reducción de radiación por rayos UV y
- (3) Eficientes para reducir la temperatura del aire.

Lo que no se pidió que considerara, para que la lista no fuera muy corta, fue la capacidad

de secuestro, reducción de velocidad de viento ni baja alergenicidad o producción de compuestos volátiles (VOC). La lista arroja 117 especies de las cuales 10 ya se encuentran presentes y se pueden ver en la lista del anexo 1 de claves de especies encontradas. Las 107 especies con potencial se encuentran agrupadas en 26 Familias, como se muestra en el

FAMILIAS	SP	FAMILIAS2	SP3
Moraceae	18	Acanthaceae	2
Fabaceae	8	Clusiaceae	2
Bignoniaceae	6	Combretaceae	2
Meliaceae	1	Fagaceae	2
Malvaceae	17	Polygonaceae	2
Lauraceae	11	Sapindaceae	2
Leguminosae	7	Annonaceae	1
Celastraceae	4	Betulaceae	1
Sapotaceae	4	Ebenaceae	1
Anacardiaceae	3	Elaeocarpaceae	1
Muntingiaceae	3	Lamiaceae	1
Myrtaceae	3	Lecythidaceae	1
Pinaceae	3	Rubiaceae	1

siguiente cuadro, y si eliminamos las 5 familias con mayor cantidad de especies nos quedan 22

Cuadro 20. Familias recomendadas por *i-Tree species* para Mérida.

familias, ya que no hubo ninguna especie recomendada de la familia Magnoliaceae, con 74 especies posibles (ver anexo 1^a).

Este criterio es únicamente basado en incrementar la biodiversidad y plantar especies con mayor servicio ambiental. Es importante integrar otros criterios como resistencia a ciertas características de sitio de plantación (pH, salinidad, nivel freático alto, etc.), susceptibilidad a plagas e incluso características paisajísticas.

⁶ <https://species.itreetools.org/selector/>

⁷ Utiliza una escala de 0 a 10 donde 10 indica que la característica es muy importante y 0 que no lo es.

Indice de ANEXOS

Anexo I. Listado de especies con claves de i-Tree

Anexo Ia. Listado de especies recomendadas por i-Tree Species

Anexo II. Modelo Eco y Mediciones de Campo para i-Tree

Anexo III. Efectos relativos del árbolado

Anexo IV. Recomendaciones generales para mejorar la calidad del aire

Anexo I. Listado de especies con claves de i-Tree

	Nom Científico	clave	Nom Comun	Familia		Nom Científico	clave	Nom Comun	Familia
1	Acrocomia	AC10	Tuk	Arecaceae	40	Ficus macrocarpa	FIMA	Ficus	Moraceae
2	Acrocomia aculeata	ACAC2	Tuk	Arecaceae	41	Ficus variegata	FIVA	Ficus	Moraceae
3	Adonidia merrilli	ADME	Kerpis	Arecaceae	42	Filicopsida	FICLASS	Helecho	Monilophyta
4	Beaucarnea	BE1	Despeñada	Asparagaceae	43	Guazuma ulmifolia	GUUL	Pikoy	Solanaceae
5	Chamaedorea	CH9	Palma Camedor	Arecaceae	44	Gymnocladus dioicus	MaClass	MaClass	Fabaceae
6	Cocos	CO7	Palma de coco	Arecaceae	45	Hamelia patens	HAPA3	X'kanan	Rubiaceae
7	Cocos nucifera	CONU	Coco	Arecaceae	46	Havardia	HA13	Chucum	Fabaceae
8	Cycadopsida	Cyclclass	Genero Palma	Cycadaceae	47	Hibiscus rosa-sinensis	HIROSI	Tulipán yucateco	Malvaceae
9	Hyophorbe lagenicaulis	HYLA	Palma botella	Arecaceae	48	Jacaratia	JAB	ku'umche'	Caricaceae
10	Phoenix roebelenii	PHRO	Palma enana	Arecaceae	49	Jatropha	JA7	Pomolche	Euphorbiaceae
11	Roystonea regia	RORE	Palma Real	Arecaceae	50	Leucaena leucocephala	LELE	Waxim	Fabaceae
12	Sabal mexicana	SAME8	Huano	Arecaceae	51	Lonchocarpus	LO4	Balché	Fabaceae
13	Syagrus romanzoffiana	SYRO	Pindo Coco Plumoso	Arecaceae	52	Lysiloma latissiliquum	LYLA	Tzalam	Fabaceae
14	Thrinax radiata	THPA	Chit	Arecaceae	53	Maclura pomifera	MAPO	Naranjo de lousiana	Moraceae
15	Washingtonia robusta	WARO	Washingtonia	Arecaceae	54	Magnolia acuminata	MAAC	Magnolia	Magnoliaceae
16	Yucca aloifolia	YUAL	Yucca	Agavaceae	55	Magnolia salicifolia	MaClass	MaClass	Magnoliaceae
1	Annona	AN8	GUANABANA	Annonaceae	56	Magnoliopsida	MaClass	Latifoliada maderable	Magnoliaceae
2	Annona reticulata	ANRE	ANONA	Annonaceae	57	Melicoccus bijugatus	MEBI	Guaya o Huaya	Clusiaceae
3	Carica papaya	CAPA3	PAPAYA	Primulaceae	58	Mimosa	MIM4	Mimosa	Fabaceae
4	Citrus aurantium	CIAU2	NARANJA AGRIA	Rutaceae	59	Morinda citrifolia	MOC13	Noni	Polygonaceae
5	Citrus limon	CILI	LIMON AMARILLO	Rutaceae	60	Moringa oleifera	MOOL	Moringa	Fabaceae
6	Citrus reticulata	CIRE3	MANDARINA	Rutaceae	61	Muntingia	MU3	Capulín	Muntingiaceae
7	Citrus x jambhiri	CIA	LIMON	Rutaceae	62	Murraya paniculata	MUPA1	Limonaria	Verbenaceae
8	Citrus x paradisi	CIPA	TORONIA	Rutaceae	63	Nectandra coriacea	NECO	Laurelillo	Celastraceae
9	Cnidioscolus aconitifolius	CNAC	CHAYA	Euphorbiaceae	64	Nothofagus obliqua	MaClass	MaClass	Nothofagaceae
10	Cordia	CO29	CIRICOTE	Boraginaceae	65	Ouratea	OU1	Laurel	Ochnaceae
11	Ficus carica	FICA	HIGO	Malvaceae	66	Ouratea striata	MaClass	MaClass	Ochnaceae
12	Limonium arborescens	LIAR10	LIMON	Plumbaginaceae	67	Pinus	PI2	Pino (conifera)	Pinaceae
13	Mangifera indica	MAIN	MANGO	Theaceae	68	Pinus pinaster	PIPI6	Pino frances	Pinaceae
14	Manihara zapota	MAZA	ZAPOTE	Sapotaceae	69	Piscidia piscipula	PIPI1	Jabín	Fabaceae
15	Musa	MU5	PLATANO	Musaceae	70	Pithecolobium dulce	PIDU	Ts'luche	Polygonaceae
16	Persea americana	PEAM	AGUACATE	Lauraceae	71	Plumeria rubra	PLRU	Flor de Mayo	Fabaceae
17	Pistacia vera	PIVE	PISTACHE	Anacardiaceae	72	Populus x inopina	MaClass	MaClass	Salicaceae
18	Pouteria sapota	POSA13	MAMEY	Sapotaceae	73	Pouteria	PO15	Chooch y Kaniste	Sapotaceae
19	Psidium guajava	PSGU	GUAYABO	Lauraceae	74	Pouteria caimito	POCA3	Caimito	Sapotaceae
20	Ribes rubrum	RIRU80	GROSELLA	Grossulariaceae	75	Prosopis alba	MaClass	MaClass	Fabaceae
21	Spondias purpurea	SPPU	CIRUELA	Acanthaceae	76	Prosopis chilensis	PRCH	algarrobo	Fabaceae
22	Tamarindus indica	TAIN	TAMARINDO	Boraginaceae	77	Prunus amygdalus	PRAM2	almendro	Rosaceae
23	Ternstroemia stahlilii	TEST3	MAMEY DE CURA	Pentaphylacaceae	78	Prunus dulcis	PRDU	Almendro	Rosaceae
1	Acacia	ACSP2	Bosh Catzin	Fabaceae	79	Pseudobombax ellipticum	PSEL5	Amapola	Fabaceae
2	Albizia	ALLE	Algarrobo blanco	Fabaceae	80	Punica granatum	PUGR	granada	Clusiaceae
3	Annona muricata	ANMU	guanabano	Annonaceae	81	Quercus	QU	Encino	Fagaceae
4	Annona squamosa	ANSQ	Saramullo	Annonaceae	82	Samanea saman	PISA2	Algarrobo	Fabaceae
5	Araucaria	ARB	Araucaria	Araucariaceae	83	Senna racemosa	SERAS	K'anha'abin	Fabaceae
6	Azadirachta	AZ1	Neem	Meliaceae	84	Simarouba glauca	SIGL	Pa' sak	Simaroubaceae
7	Azadirachta indica	AZIN	Neem	Meliaceae	85	Swietenia	SW1	Caoba	Meliaceae
8	Bauhinia variegata	BAVA	Pata de Vaca	Fabaceae	86	Tabebuia	TASP	roble	Bigoniaceae
9	Beaucarnea recurvata	MaClass	MaClass	Fabaceae	87	Tabebuia chrysantha	TACH	Maculis Amarillo	Bigoniaceae
10	Bougainvillea	BO9	Bugambillas	Fabaceae	88	Tabebuia rosea	TARO	Maculis	Bigoniaceae
11	Brosimum alicastrum	BRAL3	Ramón	Moraceae	89	Tecoma stans	TEST	X'can Lol	Bigoniaceae
12	Brugmansia	MaClass	MaClass	Solanaceae	90	Terminalia catappa	TECA	Almendro	Bigoniaceae
13	Bursera simaruba	BUSI	Chaká	Burseraceae	91	Thevetia peruviana	THPE3	Campanita	Apocynaceae
14	Byrsonima	BY1	Nance	Malpighiaceae	92	Thuja	TH9	Thuja	Cupressaceae
15	Caesalpinia	CA5	Kitamché	Fabaceae	93	Trema micrantha	TRMI	Pikoy	Cannabaceae
16	Caesalpinia pulcherrima	CAPU13	Chak Sikin	Nyctaginaceae	94	Ziziphus mauritiana	ZIMA	JUZUBE	Rhamnaceae
17	Caryota urens	MaClass	MaClass	Primulaceae					
18	Casimiroa edulis	MaClass	MaClass	Rutaceae					
19	Cassia fistula	CAFI	Lluvia de oro	Rubiaceae					
20	Cecropia	CE4	Guarumbo	Urticaceae					
21	Cedrela odorata	CEED	Cedro	Meliaceae					
22	Ceiba pentandra	CEPE	Ceiba	Malvaceae					
23	Cestrum nocturnum	CENO	dama de noche	Solanaceae					
24	Chrysophyllum cainito	CHCA10	Caimito	Combretaceae					
25	Citrus	CISP	Citrico	Rutaceae					
26	Citrus australasica	CIAU1	Citrico	Rutaceae					
27	Coccoloba	CO4	Uva de Mar	Polygonaceae					
28	Crescentia cujete	CRCU	Jicara	Muntingiaceae					
29	Cupressus	CU	Cedros (Conifera)	Cupressaceae					
30	Cyanea habenata	MaClass	MaClass	Campanulaceae					
31	Delonix regia	DERE	Flamboyán	Fabaceae					
32	Diospyros	DIG	Zapote Negro ó Tauch	Ebenaceae					
33	Diphysa	DIF7	Diphysa	Fabaceae					
34	Dracaena	DR	Dracaena	Asparagaceae					
35	Dyopsis lutescens	CHLU	Palma areca	Apiaceae					
36	Ehretia	EH1	Roble	Boraginaceae					
37	Enterolobium cyclocarpum	ENCY	Pich	Apocynaceae					
38	Ficus	F11	Laurel de la india	Moraceae					
39	Ficus binnendijkii	FIBI	Ficus	Moraceae					

Ficus macrocarpa Especies recomendadas por i-tree species como eficientes para captura de contaminantes

GUANABANA Frutales
Yucca Palmas

Anexo Ia. Listado de especies recomendadas por *i-Tree Species*

Familia	Nombre científico
1 Acanthaceae	<i>Spondias purpurea</i>
2 Boraginaceae	<i>Tamarindus indica</i>
3 Clusiaceae	<i>Melicoccus bijugatus</i>
4 Fabaceae	<i>Ceiba pentandra</i>
5 Fabaceae	<i>Delonix regia</i>
6 Lauraceae	<i>Persea americana</i>
7 Moraceae	<i>Ficus macrocarpa</i>
8 Moraceae	<i>Manilkara zapota</i>
9 Muntingiaceae	<i>Crescentia cujete</i>
10 Musaceae	<i>Bursera simaruba</i>
11 Acanthaceae	<i>Spondias dulcis</i>
12	<i>Spondias mombin</i>
13 Anacardiaceae	<i>Schinus longifolius</i>
14	<i>Schinus molle</i>
15	<i>Schinus polygamus</i>
16 Annonaceae	<i>Cananga odorata</i>
17 Betulaceae	<i>Alnus rhombifolia</i>
18 Bignoniaceae	<i>Jacaranda mimosifolia</i>
19	<i>Kigelia africana</i>
20	<i>Spathodea campanulata</i>
21	<i>Terminalia ivorensis</i>
22	<i>Terminalia myriocarpa</i>
23	<i>Terminalia oblonga</i>
24 Celastraceae	<i>Nectandra hihua</i>
25	<i>Nectandra krugii</i>
26	<i>Nectandra membranacea</i>
27	<i>Nectandra turbacensis</i>
28 Clusiaceae	<i>Calophyllum antillanum</i>
29	<i>Calophyllum inophyllum</i>
30 Combretaceae	<i>Bucida buceras</i>
31	<i>Bucida molinetii</i>
32 Ebenaceae	<i>Diospyros ebenum</i>
33 Elaeocarpaceae	<i>Elaeocarpus bifidus</i>
34 Fabaceae	<i>Albizia adinocephala</i>
35	<i>Albizia carbonaria</i>
36	<i>Albizia chinensis</i>
37	<i>Albizia lebbbeck</i>
38	<i>Albizia lebbekoides</i>
39	<i>Albizia lophanta</i>
40	<i>Albizia procera</i>
41	<i>Albizia saponaria</i>
42 Fagaceae	<i>Quercus engelmannii</i>
43	<i>Quercus ilex</i>
44 Lamiaceae	<i>Gmelina arborea</i>
45 Lauraceae	<i>Cinnamomum burmannii</i>
46	<i>Cinnamomum camphora</i>
47	<i>Cinnamomum elongatum</i>
48	<i>Cinnamomum montanum</i>
49	<i>Cinnamomum verum</i>
50	<i>Persea borbonia</i>
51	<i>Persea humilis</i>
52	<i>Persea krugii</i>
53	<i>Persea lingue</i>
54	<i>Persea palustris</i>
55	<i>Persea urbaniana</i>
56 Lecythidaceae	<i>Couropita guianensis</i>
57 Leguminosae	<i>Dalbergia ecastaphyllum</i>
58	<i>Dalbergia monetaria</i>
59	<i>Dalbergia sissoo</i>
Poco recomendable por diversidad	
Medianamente recomendable	

Familia	Nombre científico
60 Leguminosae	<i>Falcataria moluccana</i>
61	<i>Pterocarpus indicus</i>
62	<i>Pterocarpus macrocarpus</i>
63	<i>Pterocarpus officinalis</i>
64 Malvaceae	<i>Adansonia digitata</i>
65	<i>Brachychiton acerifolius</i>
66	<i>Brachychiton populneum</i>
67	<i>Hibiscus arnottianus</i>
68	<i>Hibiscus brackenridgei</i>
69	<i>Hibiscus calyphyllus</i>
70	<i>Hibiscus clayi</i>
71	<i>Hibiscus clypeatus</i>
72	<i>Hibiscus elatus</i>
73	<i>Hibiscus kokio</i>
74	<i>Hibiscus macrophyllus</i>
75	<i>Hibiscus mutabilis</i>
76	<i>Hibiscus pernambucensis</i>
77	<i>Hibiscus waimaeae</i>
78	<i>Pachira insignis</i>
79	<i>Sterculia apetala</i>
80	<i>Sterculia discolor</i>
81 Meliaceae	<i>Swietenia mahogani</i>
82 Moraceae	<i>Artocarpus altilis</i>
83	<i>Artocarpus heterophyllus</i>
84	<i>Broussonetia papyrifera</i>
85	<i>Ficus altissima</i>
86	<i>Ficus americana</i>
87	<i>Ficus aurea</i>
88	<i>Ficus benghalensis</i>
89	<i>Ficus benjamina</i>
90	<i>Ficus citrifolia</i>
91	<i>Ficus drupacea</i>
92	<i>Ficus lutea</i>
93	<i>Ficus nota</i>
94	<i>Ficus obtusifolia</i>
95	<i>Ficus organensis</i>
96	<i>Ficus religiosa</i>
97	<i>Ficus rubiginosa</i>
98	<i>Ficus stahlii</i>
99	<i>Ficus trigonata</i>
100 Muntingiaceae	<i>Crescentia alata</i>
101	<i>Crescentia linearifolia</i>
102	<i>Crescentia portoricensis</i>
103 Myrtaceae	<i>Syzygium cumini</i>
104	<i>Thespesia grandiflora</i>
105	<i>Umbellularia californica</i>
106 Pinaceae	<i>Pinus brutia</i>
107	<i>Pinus pinea</i>
108	<i>Pinus radiata</i>
109 Polygonaceae	<i>Coccoloba microstachya</i>
110	<i>Coccoloba pubescens</i>
111 Rubiaceae	<i>Mastichodendron</i>
112 Sapindaceae	<i>Cupaniopsis anacardioides</i>
113	<i>Koelreuteria elegans</i>
114 Sapotaceae	<i>Manilkara bidentata</i>
115	<i>Manilkara jaimiqui</i>
116	<i>Manilkara pleeana</i>
117	<i>Manilkara valenzuela</i>
	<i>Bursera simaruba</i> especies existentes
Muy recomendable por diversidad	

Anexo II. Modelo Eco y Mediciones de Campo para i-Tree

i-Tree Eco está diseñado para utilizar datos de campo estandarizados de parcelas ubicadas aleatoriamente y contaminación local por hora y datos meteorológicos para cuantificar la estructura forestal urbana y sus numerosos efectos (Nowak y Crane 2000), incluyendo:

- 🌳 Estructura forestal urbana (por ejemplo, composición de especies, salud de los árboles, área foliar, etc.).
- 🌳 Cantidad de contaminación eliminada cada hora por el bosque urbano, y su porcentaje asociado de mejora de la calidad del aire durante un año.
- 🌳 El carbono total almacenado y el carbono neto anualmente secuestrado por el bosque urbano.
- 🌳 Efectos de los árboles sobre el uso energético de construcción y los consecuentes efectos sobre las emisiones de dióxido de carbono de fuentes de poder.
- 🌳 Valor estructural del bosque, así como el valor de la eliminación de la contaminación atmosférica y del almacenamiento y secuestro de carbono.
- 🌳 Impacto potencial de las infestaciones por plagas, tales como el escarabajo asiático, broca esmeralda de los fresnos, polilla gitana y la enfermedad holandesa del olmo.

Normalmente, todos los datos de campo se recogen durante la temporada de hojas para evaluar adecuadamente los árboles. Una toma típica de datos incluye el uso de la tierra, el suelo y la cubierta del árbol, el árbol individual, los atributos de las especies, el diámetro del tallo, la altura, el ancho de la corona, la copa de la corona y la distancia y dirección a edificios residenciales (Nowak et al 2005; Nowak et al 2008).

Durante la recolección de datos, los árboles se identifican con la clasificación taxonómica más específica posible. Los árboles que no son clasificados al nivel de la especie deben clasificarse por género (por ejemplo, Ficus) o grupos de especies (por ejemplo, latifoliadas). En este informe, especies de árboles, géneros o grupos de especies se denominan colectivamente especies arbóreas.

Características del árbol:

El área foliar de los árboles se evaluó mediante la medición de las dimensiones de la corona y el porcentaje de la copa de corona que faltaba. En el caso de que no se recogieran estas variables de datos, éstas son estimadas por el modelo.

Un análisis de especies invasoras no está disponible para estudios fuera de los Estados Unidos. Para los Estados Unidos, las especies invasoras se identifican utilizando una lista de especies invasivas para el estado en el que se encuentra el bosque urbano. Estas listas no son exhaustivas y abarcan especies invasoras de diversos grados de invasividad y distribución. Para las especies de árboles que son identificadas como invasivas por la lista de especies invasoras del estado se hacen referencias cruzadas con datos de rango nativo. Esto ayuda a eliminar especies que están en la lista de especies invasoras del estado, pero que son nativas del área de estudio.

Eliminación de la contaminación atmosférica:

La eliminación de la contaminación se calcula para el ozono, el dióxido de azufre, el dióxido de nitrógeno, el monóxido de carbono y las partículas de menos de 2,5 micras. Las partículas de menos de 10 micras (PM₁₀) son otro contaminante importante del aire. Dado que i-Tree Eco analiza material en partículas de menos de 2,5 micras (PM_{2.5}) que es un subconjunto de PM₁₀, esta no ha sido incluidos en este análisis. Por lo general, la PM_{2.5} es más pertinente en los debates sobre los efectos de la contaminación en la salud humana.

Las estimaciones de la eliminación de la contaminación atmosférica se derivan de las resistencias de los canopes, calculadas para el ozono, el azufre y dióxidos de nitrógeno basados en un modelo híbrido de deposición de hojas grandes y multicapa (Baldocchi 1988, Baldocchi et al 1987). Como la eliminación del monóxido de carbono y de las partículas en la vegetación no está directamente relacionada con la transpiración, las tasas de remoción (velocidades de deposición) para estos contaminantes se basaron en valores medidos de la literatura (Bidwell y Fraser 1972, Lovett 1994) que se ajustaron en función de la fenología de las hojas y el área foliar.

La eliminación de partículas incorporó una tasa de resuspensión del 50 por ciento de las partículas de vuelta a la atmósfera (Zinke 1967). Las recientes actualizaciones (2011) del modelo de calidad del aire se basan en simulaciones mejoradas del índice de área foliar, el procesamiento e interpolación de la contaminación y los valores monetarios de los contaminantes actualizados (Hirabayashi et al 2011; Hirabayashi et al 2012; Hirabayashi 2011).

Los árboles eliminan PM_{2.5} cuando la materia particulada se deposita sobre las superficies de las hojas (Nowak et al 2013). Estos PM_{2.5} depositados pueden ser resuspendidos a la atmósfera o eliminados durante eventos de lluvia y disueltos o transferidos al suelo. Esta combinación de eventos puede conducir en la eliminación de la contaminación positiva o negativa y al valor dependiendo de varios factores. Generalmente, la eliminación de PM_{2.5} es positiva con beneficios positivos. Sin embargo, hay algunos casos en que la eliminación neta es negativa o bien las partículas resuspendidas conducen a un aumento de las concentraciones de contaminación y valores negativos. Durante algunos meses (por ejemplo, sin lluvia), los árboles resuspenden más partículas de las que eliminan. La resuspensión también puede llevar a un aumento de las concentraciones totales de PM_{2.5} si las condiciones de la capa límite son menores durante los períodos netos de resuspensión que durante los períodos netos de eliminación. Dado que el valor de eliminación de la contaminación se basa en el cambio en la concentración de la contaminación, es posible tener situaciones en las que los árboles eliminan PM_{2.5} pero aumentan las concentraciones y, por lo tanto, tienen valores negativos durante los períodos de eliminación global positiva. Estos eventos no son comunes, pero pueden ocurrir.

Para reportes en los Estados Unidos, el valor de eliminación de la contaminación atmosférica por defecto se calcula sobre la base de la incidencia local de efectos adversos de salud y los costos medianos nacionales de externalidad. El número de efectos adversos para la salud y el valor económico asociado se calcula valor para el ozono, el dióxido de azufre, el dióxido de nitrógeno y las partículas de menos de 2,5 micrones utilizando datos del Programa de Análisis y Mapeo de Beneficios Ambientales de la Agencia de

Protección Ambiental de los Estados Unidos (BenMAP) (Nowak et al., 2014). El modelo utiliza un enfoque de daño-función que se basa en el cambio local en la contaminación, concentración y población. Los costos de externalidad mediana nacional se utilizaron para calcular el valor del monóxido de carbono (Murray y col., 1994).

Para los reportes internacionales, se utilizan los valores de contaminación local definidos por el usuario. Para los informes internacionales que no tienen valores locales, las estimaciones se basan en los valores europeos de la externalidad mediana (van Essen et al 2011) o BenMAP

(Nowak et al 2014) que incorporan estimaciones de población definidas por el usuario. Los valores son entonces convertidos a moneda local con tipos de cambio definidos por el usuario.

Para este análisis, el valor de eliminación de la contaminación se calcula sobre la base de los precios de 27.380 pesos mexicanos por tonelada (CO), Mex \$ 192.772 por tonelada (O3), Mex \$ 192.772 por tonelada (NO2), Mex \$ 47.194 por tonelada (SO2), Mex \$ 128,705 por tonelada (partículas de menos de 2,5 micras).

Almacenamiento y Secuestro de Carbono:

El almacenamiento de carbono es la cantidad de carbono unido en las partes subterráneas y subterráneas de la vegetación leñosa. Para calcular el almacenamiento de carbono actual, la biomasa para cada árbol se calculó usando ecuaciones de la literatura y datos de árboles medidos. Los árboles de cultivo abierto y mantenidos tienden a tener menos biomasa de la prevista por las ecuaciones de biomasa derivadas del bosque. Para ajustar esta diferencia, los resultados de biomasa para árboles urbanos se multiplicaron por 0.8. No se realizó ningún ajuste para los árboles que se encuentran en condiciones naturales. La biomasa seca de los árboles fue convertida en carbono almacenado multiplicando por 0.5.

El secuestro de carbono es la eliminación del dióxido de carbono del aire por las plantas. Para estimar la cantidad bruta de carbono secuestrada anualmente, el crecimiento del diámetro promedio de los géneros apropiados y la clase de diámetro y fue añadida la condición del árbol al diámetro del árbol existente (año x) para estimar el diámetro del

árbol y el almacenamiento de carbono en el año $x + 1$.

Los valores de almacenamiento de carbono y secuestro de carbono se basan en valores de carbono locales estimados o personalizados. Para los reportes internacionales que no tienen valores locales, las estimaciones se basan en el valor del carbono para los Estados Unidos. (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos 2015, Grupo de Trabajo Interagencial sobre el Costo Social del Carbono 2015) y convertidos a moneda local con tipos de cambio definidos por el usuario. Para este análisis, los valores de almacenamiento de carbono y secuestro de carbono se calculan en base a Mex \$ 146.7 por tonelada.

Producción de oxígeno:

La cantidad de O_2 producido se calcula a partir del secuestro de carbono basado en pesos atómicos: liberación neta de O_2 (Kg / año) = captura neta de secuestro de C (kg / año) \times 32/12. Para estimar la tasa neta de captura de carbono, la cantidad de carbono secuestrado como resultado del crecimiento de los árboles se reduce por la cantidad perdida resultante de la mortalidad de los árboles. Así, el carbono neto secuestrado y la producción neta anual de oxígeno de la cuenta forestal urbana para la descomposición. Para los proyectos de inventario completo, la producción de oxígeno se calcula a partir del secuestro bruto de carbono y no cuenta en la descomposición.

Escorrentía evitada por aumento de infiltración

La escorrentía superficial anual evitada se calcula sobre la base de la interceptación de lluvias por la vegetación, específicamente la diferencia entre el escurrimiento anual con y sin vegetación. Aunque las hojas, las ramas y la corteza del árbol pueden interceptar la precipitación y así mitigar la escorrentía superficial, sólo la precipitación interceptada por las hojas se cuenta en este análisis.

El valor de escorrentía evitada se basa en valores locales estimados o definidos por el usuario. Para los informes internacionales que no tienen valores locales, el valor promedio nacional de los Estados Unidos se utiliza y se convierte en moneda local con tipos de cambio definidos por

el usuario. El valor de escorrentía evitada de los Estados Unidos se basa en la Serie Guía de Árboles Comunitarios del Servicio Forestal de los Estados Unidos (McPherson et al, 1999; 2000; 2001; 2002; 2003; 2004; 2006a; 2006b; 2006c; 2007; 2010; Peper et al 2009; 2010; Vargas et al 2007a; 2007b; 2008). Para este análisis, el valor de escorrentía evitado se calcula sobre la base del precio de US \$ 2.361 por m^3 .

Uso de Energía en Edificios:

Se recopilaron datos de campo apropiados, se calcularon los efectos estacionales de los árboles en el uso de energía para edificios residenciales basados en los procedimientos descritos en la literatura (McPherson y Simpson 1999) usando la distancia y la dirección de los árboles desde las estructuras residenciales, la altura de los árboles y los datos de las condiciones de los árboles. Para calcular el valor monetario del ahorro energético, se utilizan precios locales o personalizados por MWH o MBTU.

Para este análisis, el valor de ahorro de energía se calcula sobre la base de los precios de Mex \$ 116.15 por MWH y Mex \$ 17.30 por MBTU.

Potenciales impactos de plagas:

El análisis potencial completo del riesgo de plagas no está disponible para estudios fuera de los Estados Unidos. El número de árboles en riesgo a las plagas analizadas es reportado, aunque la lista de plagas se basa en insectos conocidos y enfermedades en los Estados Unidos.

Mapas de la gama de plagas para 2012 del Equipo Forestal de Empresas de Tecnología de la Salud (FHTET) (Forest Health Technology Enterprise Team 2014) se utilizaron para determinar la proximidad de cada plaga al condado en el que el bosque urbano se encuentra. Para el condado, se estableció si el insecto / enfermedad ocurre dentro del condado, es dentro de 400 kilómetros de la frontera del condado, está entre 400 y 1210 kilómetros de distancia, o es mayor que 1210 kilómetros de distancia. FHTET no tenía mapas de rango de plagas para la enfermedad de olmo holandés y la niebla de castaña. El rango de estas plagas se basó en la ocurrencia conocida y en el rango de huéspedes, respectivamente (Centro de Evaluación

de Amenaza Ambiental del Bosque oriental; Worrall 2007).

(toneladas) de (British Columbia Ministry 2005; Comisión Forestal de Georgia 2009).

Efectos relativos de árboles:

El valor relativo de los beneficios de los árboles que se consignan en el Anexo II es calculado para secuestro y eliminación de contaminantes atmosféricos equivalentes a cantidades de emisiones municipales de carbono, emisiones de automóviles de pasajeros y emisiones de la casa.

Las emisiones municipales de carbono se basan en las emisiones de carbono per cápita de los Estados Unidos en 2010 (Carbon Dioxide Information Analysis Center 2010). Las emisiones per cápita se multiplicaron por la población de la ciudad para estimar las emisiones totales de carbono de la ciudad.

Tasas de emisión de vehículos ligeros (g/mi) para CO, NOx, COV, PM10 y SO2 para 2010 (Bureau of Transportation Statistics 2010; Heirigs et al 2004), PM_{2.5} para 2011-2015 (California Air Resources Board 2013) y CO2 para 2011 (U.S. Environmental Protection Agency 2010) se multiplicaron por millas promedio conducidas por vehículo en 2011 (Federal Highway Administration 2013) para determinar las emisiones promedio por vehículo. Las emisiones de los hogares se basan en el consumo medio de electricidad kWh, el uso de gas natural Btu, el uso de combustible Btu, el queroseno, el uso de Btu, el uso de GLP Btu y el uso de madera Btu por hogar en 2009 (Energy Information Administration 2013; y 2014).

 Las emisiones de CO2, SO2 y NOx por kWh provienen de Leonardo Academy 2011. Emisión de CO por kWh asume que 1/3 del uno por ciento de las emisiones de C es CO basado en Energy Information Administration 1994. Emisiones PM10 por kWh provienen de Layton 2004.

 Emisiones de CO2, NOx, SO2 y CO por Btu para gas natural, propano y butano (media utilizada para representar GLP), Combustible # 4 y # 6 (promedio utilizado para representar la gasolina y el queroseno) de Leonardo Academy 2011.

 Emisiones de CO2 por Btu de madera de Energy Information Administration 2014.

 Emisiones de CO, NOx y SOx por Btu sobre la base de las emisiones totales y la quema de madera

Anexo III. Efectos relativos del arbolado

El bosque urbano del Inventario Mérida, Yuc. ofrece beneficios que incluyen almacenamiento y secuestro de carbono y eliminación de contaminantes. Para estimar el valor relativo de estos beneficios, se compararon los beneficios de los árboles con las emisiones de carbono municipales promedio, las emisiones promedio de automóviles de pasajeros y las emisiones medias de los hogares. (Véase el Anexo II para la metodología).

El almacenamiento de carbono es equivalente a:

-  Cantidad de carbono emitida en Mérida en 16 días
-  Emisiones anuales de carbono (C) de 142,200 automóviles
-  Emisiones anuales de C de 58,200 casas unifamiliares

La remoción de monóxido de carbono es equivalente a:

-  Emisiones anuales de monóxido de carbono de 555 automóviles
-  Emisiones anuales de monóxido de carbono de 1,530 casas unifamiliares

La remoción de dióxido de nitrógeno es equivalente a:

-  Emisiones anuales de dióxido de nitrógeno de 1,490 automóviles
-  Emisiones anuales de dióxido de nitrógeno de 672 casas unifamiliares

La remoción de dióxido de azufre es equivalente a:

-  Emisiones anuales de dióxido de azufre de 119,000 automóviles
-  Emisiones anuales de dióxido de azufre de 315 casas unifamiliares

El secuestro anual de carbono es equivalente a:

-  Cantidad de carbono emitida en Mérida en 1.5 días
-  Emisiones anuales de C de 13,000 automóviles
-  Emisiones anuales de C de 5,300 casas unifamiliares

Anexo IV. Recomendaciones generales para mejorar la calidad del aire

La vegetación urbana puede afectar directa e indirectamente la calidad del aire local y regional alterando el ambiente de la atmósfera urbana. Cuatro maneras principales en que los árboles urbanos afectan la calidad del aire son (Nowak 1995):

- ✿ Reducción de la temperatura y otros efectos del microclima
- ✿ Eliminación de contaminantes del aire
- ✿ Emisión de compuestos orgánicos volátiles (VOC) y emisiones de mantenimiento de árboles
- ✿ Efectos energéticos en edificios

Los efectos acumulativos e interactivos de los árboles sobre el clima, la eliminación de la contaminación y las emisiones de VOC y centrales eléctricas determinan el impacto de los árboles en la contaminación del aire. Los estudios acumulativos sobre los impactos de los árboles urbanos sobre el ozono han revelado que el aumento de la cubierta urbana del dosel, particularmente con las especies que emiten bajo VOC, conduce a la reducción de concentraciones de ozono en las ciudades (Nowak 2000). Las decisiones locales de gestión urbana también pueden ayudar a mejorar la calidad del aire.

Las estrategias de manejo forestal urbano para ayudar a mejorar la calidad del aire incluyen (Nowak 2000):

Estrategia	Resultado
Aumentar el número de árboles sanos	Aumenta la eliminación de contaminación
Sostener la cubierta arbórea existente	Mantiene los niveles de eliminación de la contaminación
Maximizar el uso de árboles de baja emisión de VOC	Reducir la formación de ozono y monóxido de carbono
Sostener árboles grandes y sanos	Los árboles grandes tienen los mayores efectos por árbol
Utilizar árboles de larga vida	Reducir las emisiones de contaminantes a largo plazo de la siembra y remoción
Utilizar árboles de bajo mantenimiento	Reducir las emisiones de contaminantes de las actividades de mantenimiento
Reducir el uso de combustibles fósiles en el mantenimiento de la vegetación	Reducir las emisiones contaminantes
Plantar árboles en lugares que conservan energía	Reducir las emisiones contaminantes de las centrales eléctricas
Plantar árboles para dar sombra a los automóviles estacionados	Reducir las emisiones vehiculares VOC
Suministrar abundante agua a la vegetación	Mejorar la eliminación de la contaminación y la reducción de la temperatura
Plantar árboles en áreas contaminadas o muy pobladas	Maximizar los beneficios de la calidad del aire en los árboles
Evitar las especies sensibles a los contaminantes	Mejorar la salud de los árboles
Utilizar árboles perennes para eliminar partículas	Elimina partículas a lo largo de todo el año

7. Citas Bibliográficas

1. Baldocchi, D. 1988. **A multi-layer model for estimating sulfur dioxide deposition to a deciduous oak forest canopy.** Atmospheric Environment. 22: 869-884.
2. Baldocchi, D.D.; Hicks, B.B.; Camara, P. 1987. **A canopy stomatal resistance model for gaseous deposition to vegetated surfaces.** Atmospheric Environment. 21: 91-101.
3. Bidwell, R.G.S.; Fraser, D.E. 1972. **Carbon monoxide uptake and metabolism by leaves.** Canadian Journal of Botany. 50: 1435-1439.
4. British Columbia Ministry of Water, Land, and Air Protection. 2005. **Residential wood burning emissions in British Columbia.** British Columbia.
5. Bolniarz, D. and H. Dennis, P. Ryan 1996. **The use of volunteer initiatives in conducting urban forest resource inventories.** Journal of Arboriculture 22(2) March. 75-81.
6. California Air Resources Board. 2013. **Methods to Find the Cost-Effectiveness of Funding Air Quality Projects. Table 3 Average Auto Emission Factors.** CA: California Environmental Protection Agency, Air Resources Board.
7. Carbon Dioxide Information Analysis Center. 2010. **CO2 Emissions (metric tons per capita).** Washington, DC: The World Bank.
8. Chaparro, L. y J. Terradas. 2009. **Ecological Services of urban Forest in Barcelona.** CREA. Universitat Autònoma de Barcelona.
<https://www.itreetools.org/resources/reports/Barcelona%20Ecosystem%20Analysis.pdf>
9. Federal Highway Administration. 2013. Highway Statistics 2011. Washington, DC: Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation. Table VM-1.
10. Energy Information Administration. 2013. **CE2.1 Fuel consumption totals and averages, U.S. homes.** Washington, DC: Energy Information Administration, U.S. Department of Energy.
11. Energy Information Administration. 2014. **CE5.2 Household wood consumption.** Washington, DC: Energy Information Administration, U.S. Department of Energy.
12. Freilicher, E.M. 2010. **Evaluating Federal Urban Forestry Performance Measures in Massachusetts (U.S.A.).** Univ. of Mass Amherst. Master Thesis 1911 Feb 2014.
<http://scholarworks.umass.edu/theses/509>
13. Georgia Forestry Commission. 2009. **Biomass Energy Conversion for Electricity and Pellets Worksheet.** Dry Branch, GA: Georgia Forestry Commission.
14. Hirabayashi, S. 2012. **i-Tree Eco Precipitation Interception Model Descriptions,**
http://www.itreetools.org/eco/resources/iTree_Eco_Precipitation_Interception_Model_Descriptions_V1_2.pdf
15. Hirabayashi, S.; Kroll, C.; Nowak, D. 2011. **Component-based development and sensitivity analyses of an air pollutant dry deposition model.** Environmental Modeling and Software. 26(6): 804-816.
16. Hirabayashi, S.; Kroll, C.; Nowak, D. 2012. **i-Tree Eco Dry Deposition Model Descriptions V 1.0**
17. Interagency Working Group on Social Cost of Carbon, United States Government. 2015. **Technical Support Document: Technical Update of the Social Cost of Carbon for Regulatory Impact Analysis** Under Executive Order 12866. <http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/omb/inforeg/scc-tds-final-july-2015.pdf>
18. Lovett, G.M. 1994. **Atmospheric deposition of nutrients and pollutants in North America: an ecological perspective.** Ecological Applications. 4: 629-650.
19. McPherson, E.G. 2014. **Monitoring million trees LA: Tree performance During the early years and future benefits.** Arboriculture & Urban Forestry 40(5): 286-301.

20. McPherson, E.G., J.R. James, P.J. Peper, Sh.L. Vargas, X.E. Kelaine. 2007 **Northeast community tree guide: benefits, costs and strategic planting**. Gen. Tech Rep. PSW-GTR-202. Albany CA, U.S.D.A., Forest Service, Pacific SW research St. 106 p.
21. Murray, F.J.; Marsh L.; Bradford, P.A. 1994. **New York State Energy Plan**, vol. II: issue reports. Albany, NY: New York State Energy Office.
22. Nowak, D.J. 1995. Trees pollute? **A "TREE" explains it all**. In: Proceedings of the 7th National Urban Forestry Conference. Washington, DC: American Forests: 28-30.
23. Nowak, D.J. 2000. **The interactions between urban forests and global climate change**. In: Abdollahi, K.K.; Ning, Z.H.; Appeaning, A., eds. Global Climate Change and the Urban Forest. Baton Rouge, LA: GCRCC and Franklin Press: 31-44.
24. Nowak, D.J.; Crane, D.E. 2000. **The Urban Forest Effects (UFORE) Model: quantifying urban forest structure and functions**. In: Hansen, M.; Burk, T., eds. Integrated tools for natural resources inventories in the 21st century. Proceedings of IUFRO conference. Gen. Tech. Rep. NC-212. St. Paul, MN: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, North Central Research Station: 714-720.
25. Nowak, D.J.; Hoehn, R.E.; Crane, D.E.; Stevens, J.C.; Walton, J.T; Bond, J. 2008. **A ground-based method of assessing urban forest structure and ecosystem services**. Arboriculture and Urban Forestry. 34(6): 347-358.
26. Nowak, D.J.; Crane, D.E.; Stevens, J.C.; Hoehn, R.E. 2005. **The urban forest effects (UFORE) model: field data collection manual**. V1b. Newtown Square, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Research Station, 34 p.
http://www.fs.fed.us/ne/syracuse/Tools/downloads/UFORE_Manual.pdf.
27. Nowak, D.J., Hirabayashi, S., Bodine, A., Hoehn, R. 2013. **Modeled PM2.5 removal by trees in ten U.S. cities and associated health effects**. Environmental Pollution. 178: 395-402
28. Soares, A.L. et al. **Benefits and costs of street trees in Lisbon, Portugal**. Urban Forestry & Urban greening (2011), doi: 10.1016/j.ufug.2010.12.001
29. Santamour, F.S. Jr. 1990. **Trees for Urban planting: diversity uniformity and common sense**. Proceedings of the Seventh Conference of the Metropolitan Tree Improvement Alliance. The Morton Arboretum Lisle, Illinois
30. Trejo-Torres, J.C. & G.D. Gann. 2014-2016. **Plantas del Mayab: Plantas para Todos**. v. 2.0, portal de internet. The Institute for Regional Conservation – Programa para la Península de Yucatán. Mérida, Yucatán, México. [Portal botánico www.plantasdelmayab.com, disponible desde 01/enero/2014].
31. van Essen, H.; Schrotten, A.; Otten, M.; Sutter, D.; Schreyer, C.; Zandonella, R.; Maibach, M.; Doll, C. 2011. **External Costs of Transport in Europe**. Netherlands: CE Delft. 161 p.
32. Vargas, K.E.; McPherson, E.G.; et.al. 2007a. **Interior West Tree Guide**.
33. Vargas, K.E.; McPherson, E.G.; Simpson, J.R.; Peper, P.J.; Gardner, S.L.; Xiao, Q. 2007b. **Temperate Interior West Community Tree Guide: Benefits, Costs, and Strategic Planting**.
34. Vargas, K.E.; McPherson, E.G.; Simpson, J.R.; Peper, P.J.; Gardner, S.L.; Xiao, Q. 2008. **Tropical community tree guide: benefits, costs, and strategic planting**. PSW-GTR-216. Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-216. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station, Albany, CA.
35. Worrall, J.J. 2007. **Chestnut Blight. Forest and Shade Tree Pathology**. Page 35
http://www.forestpathology.org/dis_chestnut.html
36. Zinke, P.J. 1967. **Forest interception studies in the United States**. In: Sopper, W.E.; Lull, H.W., eds. Forest Hydrology. Oxford, UK: Pergamon Press: 137-161