



Ayuntamiento de Mérida
2018-2021

Inventario del Arbolado Urbano de la Ciudad de Mérida



Índice de temas

Resumen ejecutivo	5
1. Introducción y objetivos	8
Objetivo general	9
Objetivos particulares	9
2. Metodología	10
3. Resultados	12
3.1 Análisis de las parcelas.....	12
3.2 Estructura del arbolado.....	14
3.2.1 Especies.....	14
3.2.2 Cantidades y densidad de árboles	15
3.2.3 Tamaño	16
3.2.3 Altura	18
3.2.4 Condiciones	18
3.2.4 Índices biológicos	19
4. Servicio ambiental del arbolado de Mérida	23
4.1 Fijación de Co ₂	23
4.2 Fijación neta de carbono	26
4.2 Incremento en infiltración	28
4.2.1 Reducción de escorrentía por estrato	29
4.3 Producción de oxígeno.....	29
4.4 Remoción de contaminantes	30
4.5 Bioemisiones de los árboles.....	32
5. Conclusión y recomendaciones	34
5.1 Arbolado	34
5.2 Servicio ambiental	36
5.3 Pronósticos	37
5.4 Metas potenciales para establecer.....	40
5.5 Recomendaciones	40
5.5.1 Lineamientos generales	40
5.5.2 Para el seguimiento y mejora constante.....	42
5.5.3 Para la selección de especies.....	42
6.1 Anexo I. Listado de especies con claves de i-Tree	45
6.2 Anexo IA. Listado de especies recomendadas por i-Tree Especies	46
6.3 Anexo II. Modelo eco y mediciones de campo para i-Tree	47
6.4 Anexo III. Efectos relativos del arbolado	52
6.5 Anexo IV. Recomendaciones generales para mejorar la calidad del aire	52
7. Agradecimientos	54
8. Citas bibliográficas	55

Índice de cuadros

Cuadro 0. Tipos de beneficios y características que proporcionan los árboles de Mérida.	8
Cuadro 1. Distritos establecidos en Mérida y sus características en el inventario.	10
Cuadro 2. Parámetros dasométricos medidos en los árboles y su explicación.	11
Cuadro 3. Listado de especies más importantes y su cantidad en la población.	15
Cuadro 4. Distribución de la población por distrito y densidad por hectárea en Mérida, Yucatán.	16
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.	22
Cuadro 7. Área foliar por hectárea en porcentaje y densidad por estrado para Mérida.	23
Cuadro 8. Carbono fijo por distrito y por unidad de área y su equivalencia en CO ₂	24
Cuadro 9. Capacidad de secuestro bruto y neto de carbono por distrito en Mérida.	27
Cuadro 10. Efecto sobre la infiltración y reducción de drenaje de las principales especies en Mérida.....	28
Cuadro 11. Producción de oxígeno por las especies más importantes de árboles en Mérida.	29
Cuadro 11.1 Capacidad de remoción por contaminante.....	30
Cuadro 12. Fijación de contaminantes/especie en orden de importancia relativa y de posición en la tabla de población.	31
Cuadro 13. Especies más importantes para el servicio ambiental de remoción de contaminantes en EUA.	31
Cuadro 14. Comparativo de producción de VOC entre dos ciudades y Mérida.	33
Cuadro 15. Comparativo del arbolado de Mérida con otras ciudades.	35
Cuadro 16. Comparativo relativo del arbolado de Mérida con otras ciudades en función a su superficie y población.	36
Cuadro 17. Pronóstico de población y capacidad de secuestro de C para tres escenarios de reforestación durante 15 años en Mérida.	39
Cuadro 18. Porcentaje de árboles vivos en la población por su región de origen en el inventario.	43
Cuadro 19. Familias más representativas en el inventario por grupo.	44
Cuadro 20. Familias recomendadas por i-Tree Species para Mérida.	44

Índice de figuras

Figura 1. Distritos de Mérida y su superficie.....	11
Figura 2. Porcentaje de usos de suelo identificados en el inventario de Mérida, Yucatán. por distrito.	12
Figura 3. Porcentaje de cobertura arbórea y espacio plantable por distrito en Mérida Yucatán. Las líneas rojas indican el promedio general.	13
Figura 4. Cubierta de suelo encontrada en el inventario de Mérida, Yucatán.	14
Figura 5. Especies más importantes encontradas en Mérida divididas por grupo: palmas, frutales y árboles.	14
Figura 6. Diámetros de los árboles muestreados en el inventario.....	16
Figura 7. Tamaño de los árboles por clase diamétrica y el acumulado.....	17
Figura 8. Distribución de altura de los árboles muestreados para el inventario de Mérida.	17
Figura 9. Diámetros de las principales especies del inventario de Mérida, Yucatán.	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, porcentaje 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.	24
Figura 15. Capacidad de fijación anual de C por las principales especies de Mérida.	25
Figura 16. Secuestro de carbono bruto, neto y equivalente en CO ₂ por distrito en Mérida.	26
Figura 17. Capacidad de fijación de carbono neto y la reducción con el bruto de las principales especies de árboles en Mérida.	26
Figura 18. Efecto del arbolado por distrito en el incremento de infiltración.	29
Figura 19. Producción de oxígeno por distrito en Mérida.	30
Figura 20. Remoción mensual de contaminantes en Mérida en kg.....	32
Figura 21. Producción de VOC por las principales especies de árboles de Mérida.....	33
Figura 22. Distribución de la población de árboles por distrito y porcentaje de cobertura.	34
Figura 23. Efectos del cambio climático en la vegetación urbana y puntos susceptibles de alterar con manejo.	37

Resumen ejecutivo

El entendimiento de la estructura del arbolado urbano en 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, a través de un inventario forestal implementado entre octubre de 2016 y 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 fórmulas 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/año)

Almacenamiento de carbono: 182,100 t (US\$ 26,700,000)

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/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 muestrados en las parcelas se estima una población de 2,318,000 árboles (+/- 128,510). Las 592 parcelas se distribuyeron al azar en ocho 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 Chaká. 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 resultó 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.

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. 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 permitan mejorar el arbolado y se podrá desprender un presupuesto de manejo, equipamiento y seguimiento que dé resultados en corto plazo.

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, atmósfera 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 reducción de la cantidad de gases de efecto invernadero.	Absorción de CO ₂ , O ₃ , PM _{2.5} , PM ₁₀ , SO ₂ y NO ₂ . 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 de los edificios y 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.

* a/c.- aire acondicionado

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, Yucatán, 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.

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 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, con base en 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 seis años para reportar avances o retrocesos en el arbolado urbano de la ciudad.

2. Método

El inventario de arbolado 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. La definición de variables a evaluar y el establecimiento de parcelas de muestreo para realizar el inventario también se hicieron 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 ocho 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 tres visitas no fue posible contactar a los dueños o a alguien que permitiera el paso para el muestreo.

DISTRIBUCIÓN DE MUESTREO					
Descripción	Clave	Área (ha)	Muestreadas	Sup Muest. (ha)	Intensidad Muestreo
Distrito 01	D01	4,161	112	5.06	0.12%
Distrito 02	D02	2,074	50	2.26	0.11%
Distrito 03	D03	1,341	32	1.45	0.11%
Distrito 04	D04	1,591	36	1.63	0.10%
Distrito 05	D05	4,730	117	5.29	0.11%
Distrito 06	D06	4,808	113	5.11	0.11%
Distrito 07	D07	4,285	104	4.7	0.11%
Distrito 08	D08	1,105	28	1.27	0.11%
		24,095	592	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 aprovecharon calles y avenidas para delimitar las áreas y facilitar el acceso. La figura 1 muestra las divisiones que se propusieron para Mérida; básicamente son cuatro distritos de más de 4,000 ha y cuatro 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, los otros abarcan más superficie y sobre todo 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, opción de captura



	Parámetros	Unidad	Definición
	Clave ESPECIE ^{III}	Un. ^{III}	Nombre común o científico ^{III}
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 mas baja de la copa
ANCHO DE COPA	5	N-S	metros de la copa a la dirección indicada
	6	E-W	metros de la copa a 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 5	diámetro medido con cinta diamétrica
	11	ALTURA DE DAP	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

móvil generada por el programa, de tal manera que la información es poco probable que sufriera errores por captura.

También se diseñó un croquis a escala para que se capturaran en papel las principales características de la parcela y la ubicación de los árboles, a fin de 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 calidad de la información y quedan como parte del reporte.

El hecho de que este estudio tenga una base aleatoria es muy importante ya que es la única manera de evitar sesgos en la información y garantiza que se pueda 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 incluye el 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 son los distritos "chicos", es decir, el 2, 3, 4 y 8 del centro; y el otro formado por los distritos "grandes" que son los de más de 4,000 hectáreas y que corresponden al 1, 5, 6, y 7.

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 cobertura con el fin de reconocer los sitios con potencial para ser plantados, además de que, específicamente una variable evaluada al momento de llegar a la parcela, era el porcentaje de área plantable y cobertura arbórea.

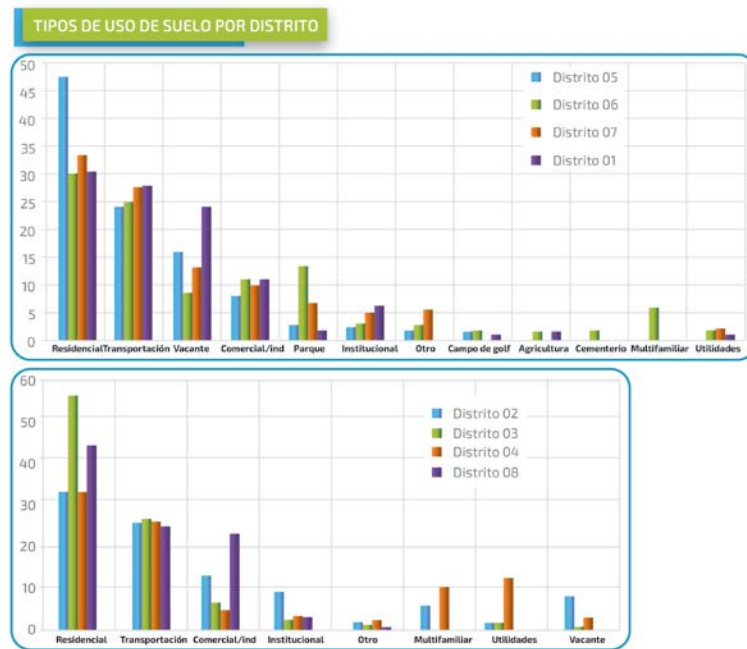


Figura 2. Porcentaje de usos de suelo identificados en el inventario de Mérida, Yucatán, por distrito.

En la figura 2 se puede observar que prácticamente la mitad de la superficie de la ciudad ya está convertida en calles (transportación), residencias o edificios comerciales y por lo tanto queda fuera la posibilidad de que sea plantada; 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 muchos menos categorías en los distritos chicos ya que contienen más construcciones y obra. Como era de esperarse, en el distrito ocho sobresale la categoría comercial y no participa en la vacante. Por el contrario, en los distritos grandes, la categoría que sobresale es la de terrenos vacantes, sobre todo en el distrito 1, lo que indica que existen áreas potenciales para reforestación, aunque habría que revisar el tipo de propiedad. El distrito 6 por supuesto indica un porcentaje alto en la categoría de parque por los diversos espacios que en él se asientan, como el de Bepensa, y el Paseo Verde (Parque lineal metropolitano de Mérida).

Por otro lado, dentro de cada parcela se midió la cobertura arbórea estimando el área que cubría el follaje de los árboles (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 arbórea que se muestra en las siguientes figuras indica que dicha cobertura es menor al promedio en los distritos chicos donde está incluido el centro de la ciudad y en los grandes es muy pareja. El promedio para toda la ciudad es de 21.2%, pero el rango de variación es de 15 a 25%, que es muy amplio.

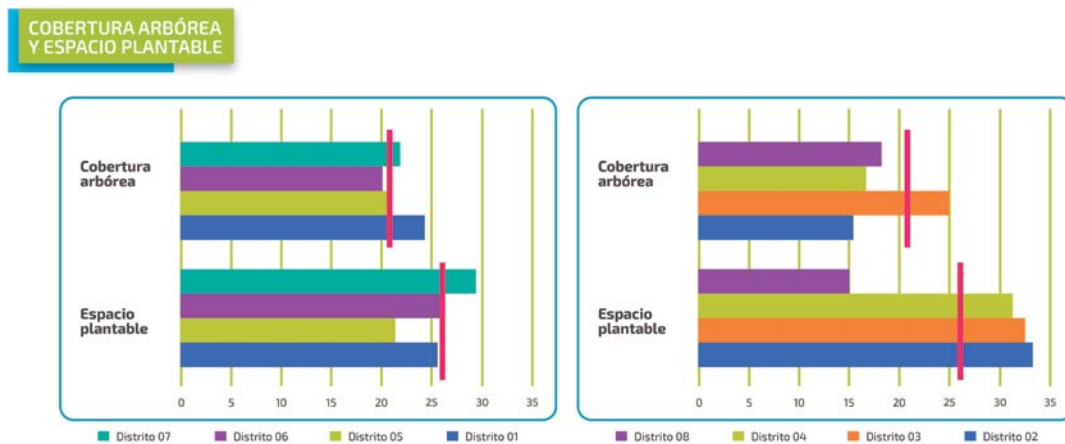


Figura 3. Porcentaje de cobertura arbórea y espacio plantable por distrito en Mérida

El espacio plantable en los distritos chicos es mayor que de los grandes, y está por encima del promedio, con excepción del Centro donde claramente es muy limitado, apenas un 15%. La cubierta del suelo se refiere al material que actualmente está encima éste y excluye la cobertura arbórea y la de arbustos. Existen varios tipos de cobertura en una misma parcela, las cuales se estimaron 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%).

TIPOS DE COBERTURA DE SUELO

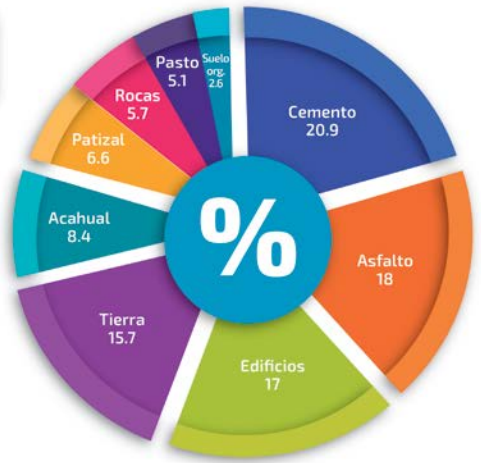


Figura 4. Cubierta de suelo encontrada en el inventario de Mérida, Yucatán.

3.2 Estructura del arbolado

3.2.1 Especies

Se encontraron 134 especies de árboles, de las cuales 89% estaba registrado en el i-Tree y el resto se caracterizó por clase (helecho-Ficlass, palma-Cyclclass y latifoliada maderable-Maiclass). En el anexo 1 se enlistan las especies encontradas, su clave del programa, nombre común en la región; aquellas especies que no están en el programa porque no existen las ecuaciones alométricas para la determinación de su tamaño y demás variables secundarias, 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%, siendo la naranja agria la más importante con el 10% de la población total.
- 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.

LISTADO DE ESPECIES MÁS IMPORTANTES Y SU CANTIDAD EN LA POBLACIÓN

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>	Cirueta	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>	Jabin	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 una 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 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 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

DISTRIBUCIÓN DE LA POBLACIÓN POR DISTRITO Y DENSIDAD POR HECTÁREA

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/Promedio	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, Yucatan.

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.

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 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.

TAMAÑO DE LOS ÁRBOLES POR ALTURA (m)

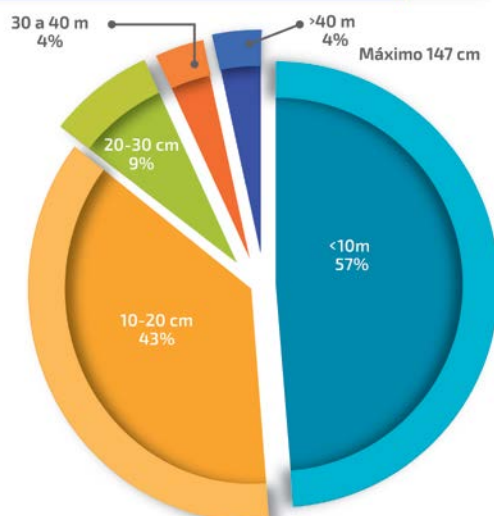


Figura 6. Diámetros de los árboles muestreados en el inventario.

3.2.3 Tamaño

El tamaño de los árboles es muy importante ya que 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. 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 muestra 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.

TAMAÑO DE LOS ÁRBOLES POR DAP

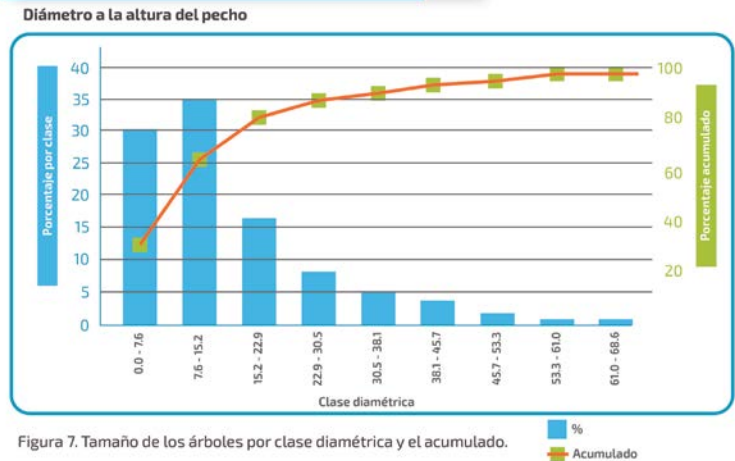


Figura 7. Tamaño de los árboles por clase diamétrica y el acumulado.

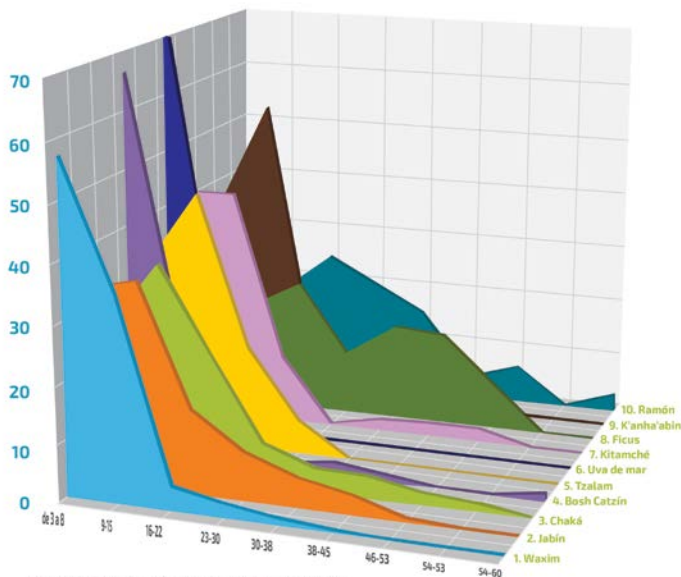


Figura 8. Distribución de altura de los árboles muestreados para el inventario de Mérida.

TAMAÑO DE LOS ÁRBOLES POR ALTURA (m)

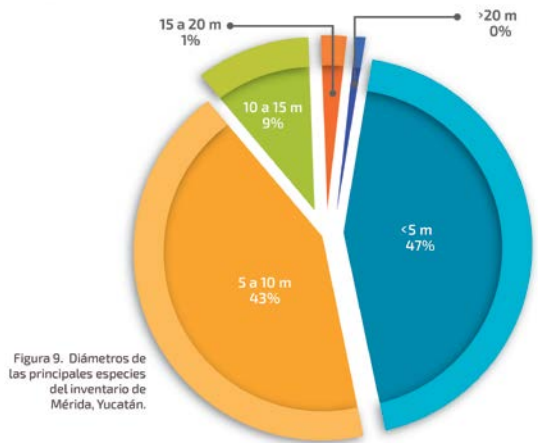


Figura 9. Diámetros de las principales especies del inventario de Mérida, Yucatán.

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 diamétricas 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.

3.2.3 Altura

En cuanto a la 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 más recomendable utilizar especies de la región que están adaptadas al clima y 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 en 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



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

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.

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 canope 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.

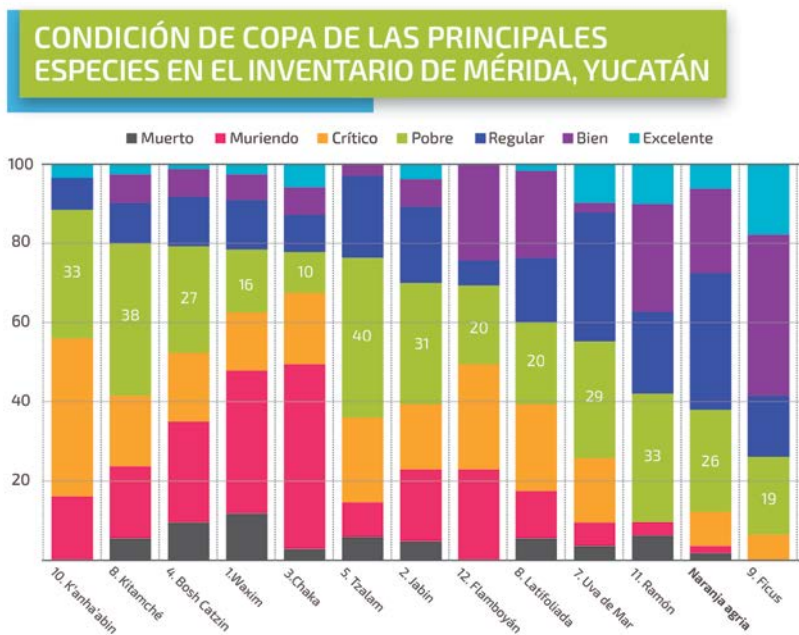


Figura 11. Condición de copa de las principales especies en el inventario de Mérida, Yucatán.

3.2.4 Índices biológicos

Los índices biológicos que calcula el i-Tree son 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 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 a 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.



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 58 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.

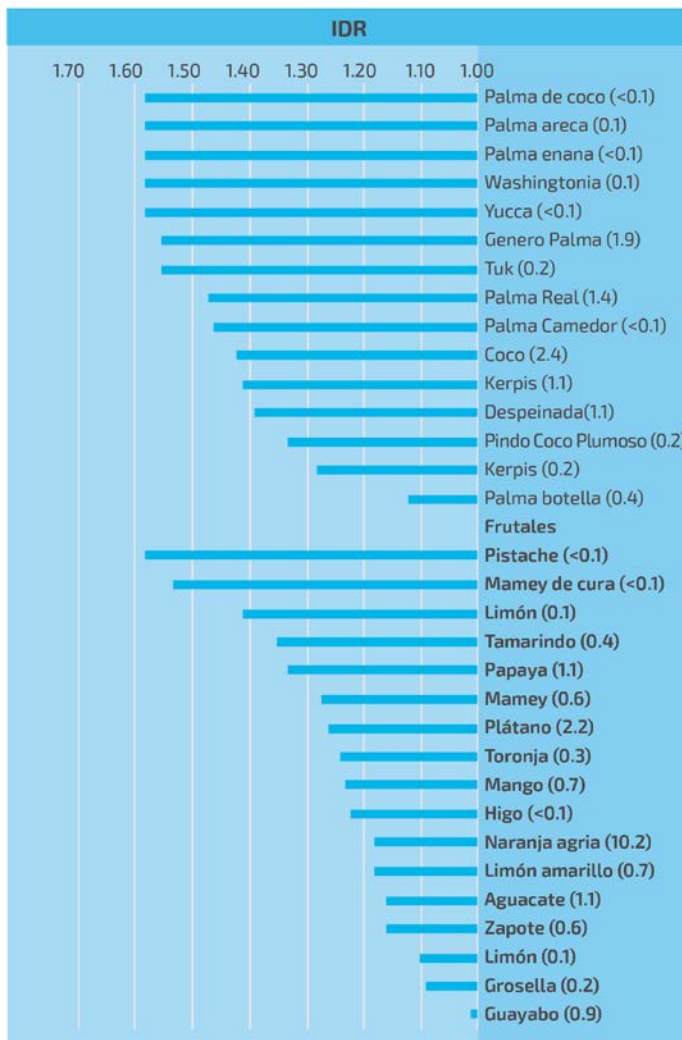


Figura 13. IDR para palmas y frutales, en paréntesis el porcentaje de la especie de la población total.

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

IDR DE ESPECIES DE ÁRBOLES DEL INVENTARIO Y SU CANTIDAD EN LA POBLACIÓN

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 Tach	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	Citrico (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	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).

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.

	Distrito	No Especies	Especies /h	Shannon	Simpson
Chicos	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
Grandes	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

Índices de diversidad por distritos agrupados por tamaño.

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 está 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 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.

Distrito	Area Foliar (ha)	Area Foliar (%)	Densidad de área foliar (m/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

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

SERVICIO AMBIENTAL DE LAS PRINCIPALES ESPECIES EN MÉRIDA POR CARBONO FIJO EN MADERA

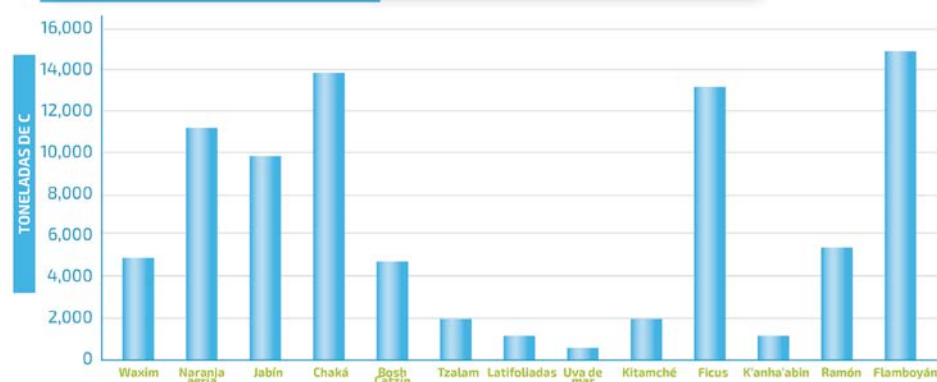


Figura 14. Carbono fijo en madera para las principales especies del arbolado de Mérida.

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.

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).

Distrito	Carbón Almacenado (kg/ha)	CO ₂ Equivalen (kg/ha)	Carbón Almacenado (toneladas)	Carbón Almacenado (%)	CO ₂ Equivalente (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.

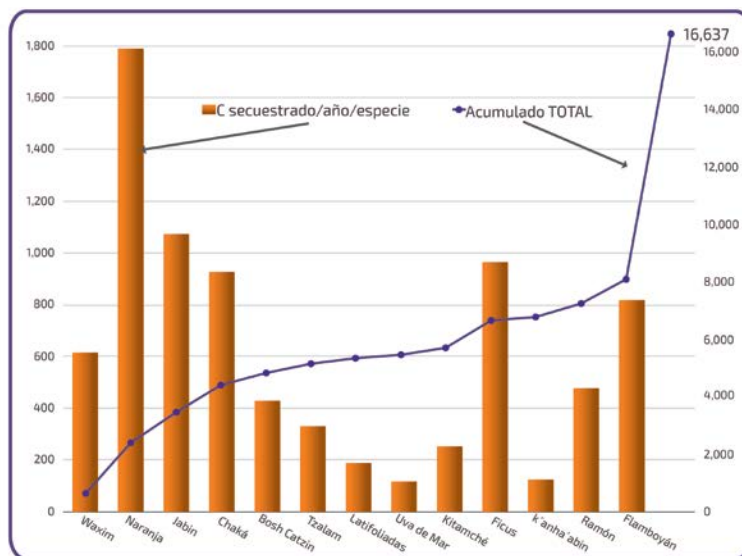


Figura 15. Capacidad de fijación anual de C por las principales especies de Mérida.

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 agría 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.

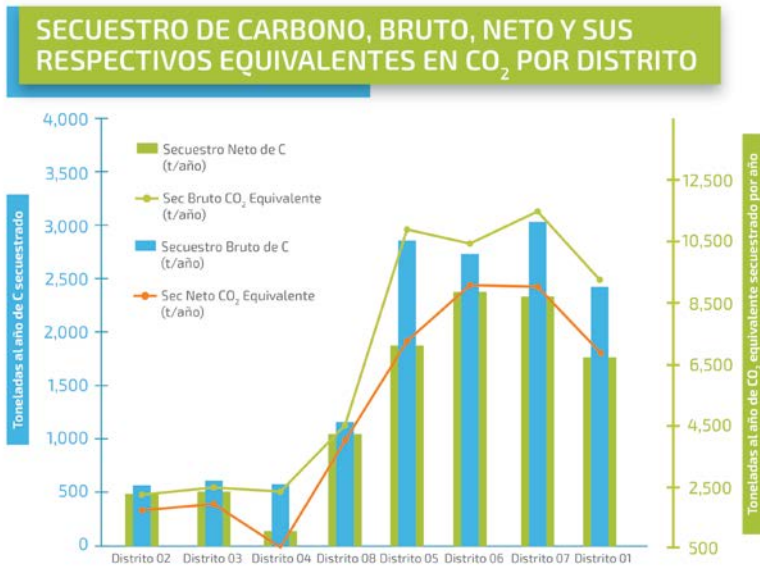


Figura 16. Secuestro de carbono bruto, neto y equivalente en CO₂ por distrito en Mérida.

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,

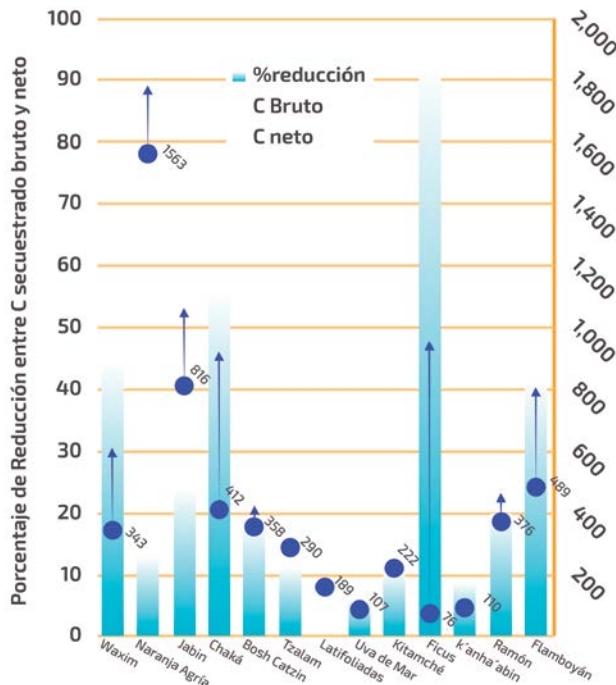


Figura 17. Capacidad de fijación de carbono neto y la reducción con el bruto de las principales especies de árboles en Mérida.

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.

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%

CAPACIDAD DE SECUESTRO BRUTO Y NETO DE CARBONO POR DISTRITO EN MÉRIDA				
Distrito	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 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.

Nombre común	Area Foliar (ha)	Transpiración (m ³ /año)	Agua Interceptada (m ³ /año)	Incremento en infiltración (m ³ /año)
Total de la población	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 Catzín	342	299,293	61,605	11,503
Tzalam	476	416,309	85,961	16,001
Coco	816	713,733	146,911	27,432
Latifoliada	160	140,048	28,827	5,383
Plátano	146	128,095	26,366	4,923
Uva de mar	96	84,355	17,363	3,242
Kitmaché	224	196,222	40,389	7,542
Guanábana	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.

La transpiración es la cantidad de agua que se mueve a través de la planta y se libera en la atmósfera, mientras que la evaporación de los árboles es la cantidad de agua liberada a la atmósfera 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.

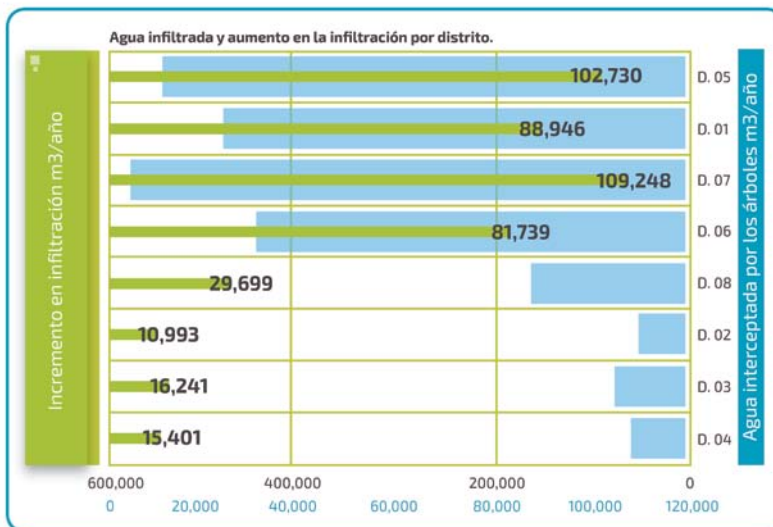


Figura 18. Efecto del arbolado por distrito en el incremento de infiltración.

4.2.1 Reducción de escorrentía por estrato

El análisis del aumento de infiltración o reducción de escurrimientos de agua por causa de los árboles 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 importante 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 cuadro 4, solamente entre ellas producen el 59% de este total.

A pesar de lo anterior este beneficio es prácticamente insignificantes ya que existe una gran cantidad de oxígeno en la atmósfera y lo que puedan aportar los árboles no es significativo.

Especie	Oxígeno (t)	Área 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 Catzín	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.

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.

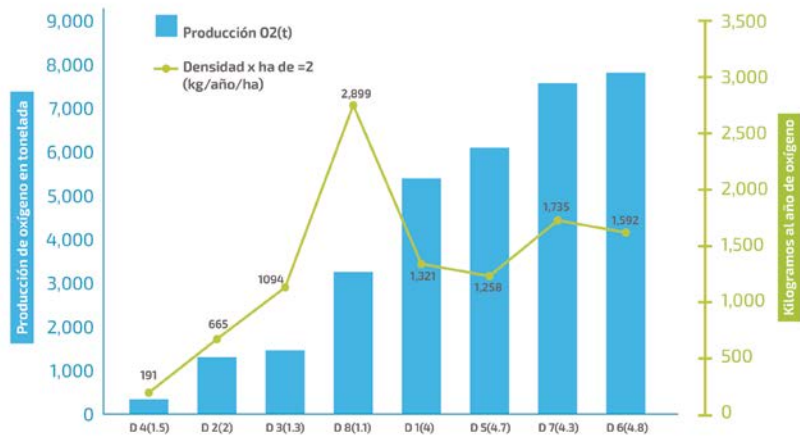


Figura 19. Producción de oxígeno por distrito en Mérida.

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 PM2.5, 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 PM2.5, 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 %
Dióxido de azufre	10.1	6 %
Nitratos	9.5	5 %
TOTAL	175.5	

Cuadro 11.1 Capacidad de remoción por contaminante

La 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 39ava 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 que identifica ya a la especie 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 potencial máximo. El siguiente cuadro muestra las especies más importantes para mejorar la calidad del aire en climas templados, específicamente en EUA.

Ozono	Monóxido de carbono	
<i>Ulmus procera</i>	<i>Tilia americana</i> *	*=Especie recomienda como árbol para la calle.
<i>Tilia europea</i>	<i>Fagus grandifolia</i>	1=Tolerancia intermedia a contaminantes.
<i>Fagus alleghaniensis</i>	<i>Tilia tormentosa</i> *	
<i>Liriodendron tulipifera</i> *S	<i>Ulmus ubra</i>	
<i>Tilia americana</i> *	<i>Fagus sylvatica</i>	S=Sensible a contaminantes.
<i>Fagus sylvatica</i>	<i>Betula alleghaniensis</i>	
<i>Tilia platyphyllos</i> *S	<i>Tilia euchlora</i> *	
	<i>Ulmus procera</i> *	T=Tolerante a SO2
	<i>Ginkgo biloba</i> *	desconocido para NO2.
	<i>Liriodendron tulipifera</i> *	
Pequeñas Partículas	Dióxido de S y N	
<i>Ulmus procera</i> *	<i>Ulmus procera</i> *	1/U=Tolerancia intermedia a SO2.
<i>Platanus x acerifolia</i> *	<i>Tilia europea</i> *	
<i>Cupressocyparis x leylandii</i>	<i>Populus deltoides</i> T	
<i>Juglans nigra</i>	<i>Platanus x acerifolia</i> * T	S/U=Sensible a SO2.
<i>Tilia europea</i>	<i>Liriodendron tulipifera</i> * T	
<i>Abies alba</i>	<i>Juglans nigra</i>	T/S =Tolerante a SO2 y sensible a NO2
<i>Larix decidua</i>	<i>Betula alleghaniensis</i>	
<i>Picea rubens</i>	<i>Fagus grandifolia</i>	

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

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

	Especie	t/año
	Ton. totales removidas	175.55
12 especies 50% de la remoción	1 Waxim	7.21
	2 Naranja agria	10.8
	3 Jabín	13.8
	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 Ramon	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 Plátano	1.9
	12 Guanábana	2.15
	27 Ciricote	1.96
	30 Huano	2.24
	43 Roble	1.61
	46 Ceiba	2.12
	69 Laurel	1.88
	22 Cítrico	1.56

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.

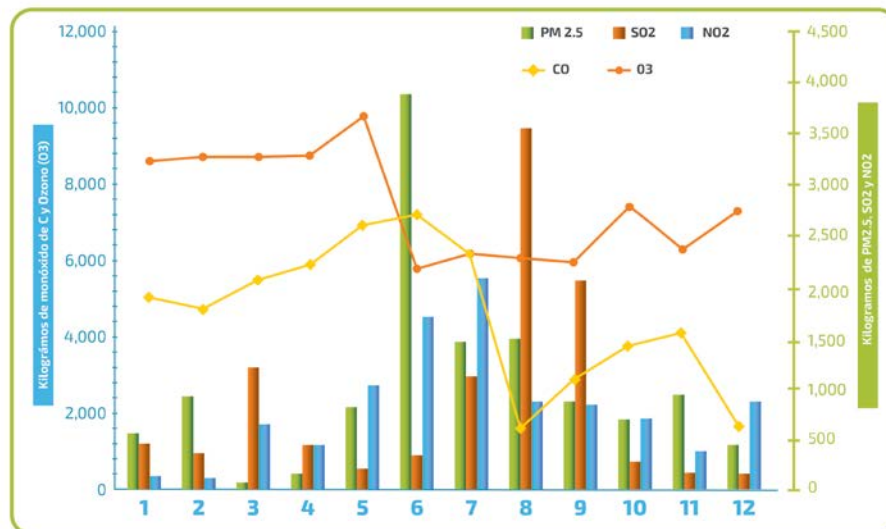


Figura 20. Remoción mensual de contaminantes en Mérida en kg.

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 PM2.5. 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 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.

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 árboles	1,419,823	610,000	2,317,795
Hectáreas	10,121	18,290	24,000

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

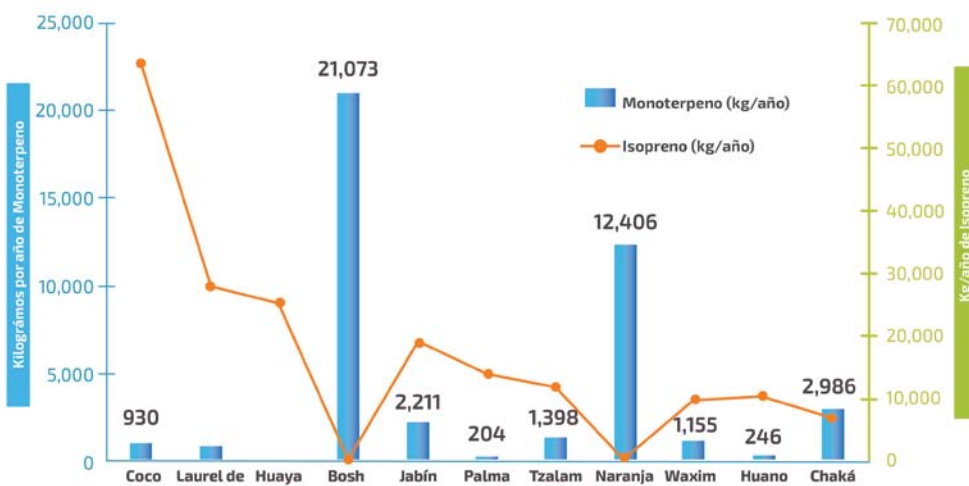


Figura 21. Producción de VOC por las principales especies de árboles de Mérida.

5. Conclusión y recomendaciones



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

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.

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 árboles/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
	árboles	de árboles	(toneladas)	(toneladas/año)
Londres, UK	14.0	8,421,000	2,367,000	77,200
Nueva York, US	21.0	5,212,000	1,226,000	38,400
Toronto, Canadá	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
Edinburgo, UK	17.0	638,000	145,611	4,721
Playa del Carmen Q.Roo MX	20.2	582,775	50,260	5,011
Providence	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 Q.Roo 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, Canada	161.9	3.9	107.9	741.3
Mérida, Yuc. MX	96.0	2.7	78.6	693.3
Milwaukee, WI	135.6	5.7	128.5	622.5
Barcelona, Spain	139.2	0.9	79.9	531.6
Londres, UK	53.6	1.0	281.1	491.1
Nueva York, US	66.1	0.6	235.2	486.7
Edinburgo, 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.

5.2 Servicio ambiental

Los servicios ambientales que provee el arbolado de Mérida determinados en este trabajo, forman la línea base para comparaciones a futuro y por el momento no es posible clasificarlos o determinar si son buenos, malos, suficientes o insuficientes. Se podría comprobar con las condiciones o niveles de contaminación y las expectativas de crecimiento poblacional para determinar el impacto potencial del arbolado para ayudar en el control, en el presente trabajo debe de incorporarse al Plan Municipal de Infraestructura Verde del Municipio de Mérida.. Lo que si señalan son las áreas que requieren más atención para crear un mejor ambiente para sus habitantes, donde claramente los distritos chicos 2, 3 y 4, donde se presentan los más bajos niveles de servicios ambientales, se debe poner más atención.

Por otro lado, es importante considerar que el cambio climático, como se puede ver en la siguiente figura, va a tener cada vez más impacto en el ambiente de las ciudades y Mérida no se queda atrás. Las altas temperaturas por el efecto de islas de calor y los gases invernadero son particularmente notables en los últimos años, por lo que debemos de establecer metas para tener un bosque urbano en buenas condiciones para combatir dicho efecto.

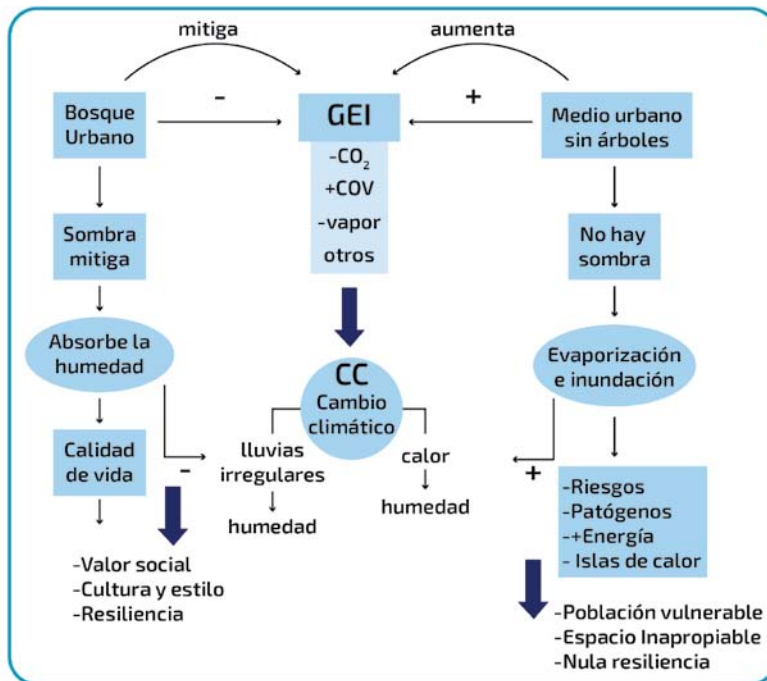


Figura 23. Efectos del cambio climático en la vegetación urbana y puntos susceptibles de alterar con manejo.

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 mortandad 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 aumenta. 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.

Condiciones de escenario

(1) Tasa de mortalidad establecida

De acuerdo a	Valor	Tasa anual	Aplicación
Condición	25% - 30%	20.00	% Anual

(2) Programa de planeación

En el estrato	Cantidad	DAP (cm)	Inicio (año)	Duración (años)
TODOS	10,000	8.00	1	15

(3) Evento extremo

Tipo	Tasa de Mortalidad (%)	Ocurre en el año
Huracán clase 3	22.00	3

(1) Tasa de mortalidad establecida

De acuerdo a	Valor	Tasa anual	Aplicación
Condición	25% - 30%	20.00	% Anual

(2) Programa de planeación

En el estrato	Cantidad	DAP (cm)	Inicio (año)	Duración (años)
TODOS	20,000	2.00	1	15

(3) Evento extremo

Tipo	Tasa de Mortalidad (%)	Ocurre en el año
Huracán clase 3	22.00	3

(1) Tasa de mortalidad establecida

De acuerdo a	Valor	Tasa anual	Aplicación
Condición	25% - 30%	20.00	% Anual

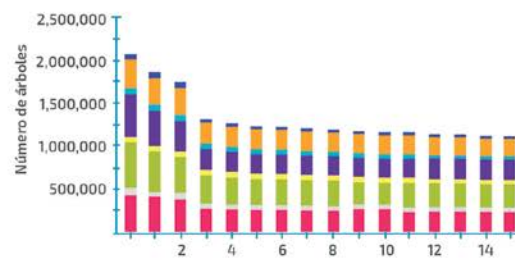
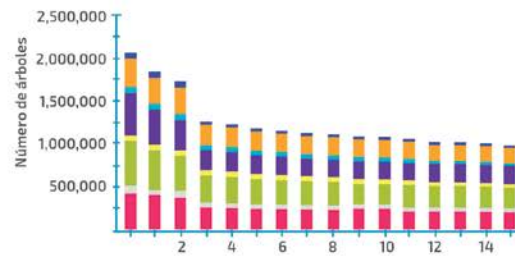
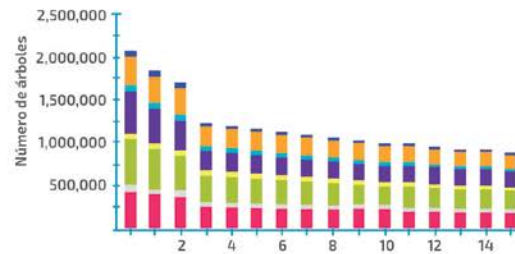
(2) Programa de planeación

En el estrato	Cantidad	DAP (cm)	Inicio (año)	Duración (años)
TODOS	30,000	5.00	1	15

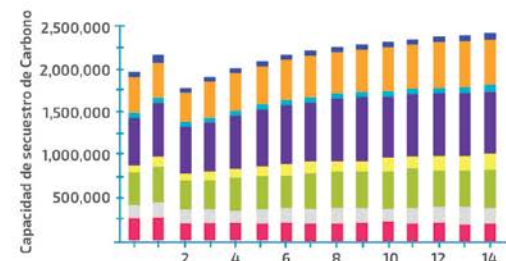
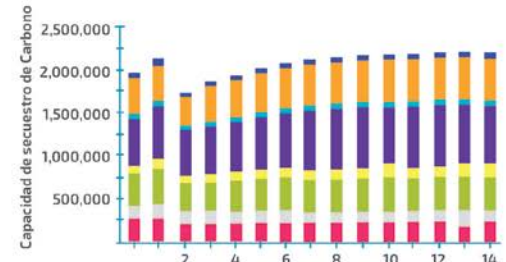
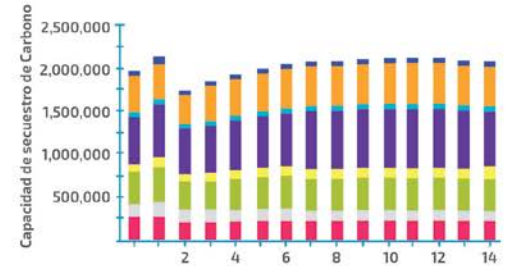
(3) Evento extremo

Tipo	Tasa de Mortalidad (%)	Ocurre en el año
Huracán clase 3	22.00	1

Cambios de población



Capacidad de secuestro de C



■ Distrito 07
■ Distrito 08
■ Distrito 05
■ Distrito 02
■ Distrito 01
■ Distrito 03
■ Distrito 06
■ Distrito 04

■ Distrito 07
■ Distrito 08
■ Distrito 05
■ Distrito 02
■ Distrito 01
■ Distrito 03
■ Distrito 06
■ Distrito 04

■ Distrito 07
■ Distrito 08
■ Distrito 05
■ Distrito 02
■ Distrito 01
■ Distrito 03
■ Distrito 06
■ Distrito 04

Cuadro 17. Pronóstico de población y capacidad de secuestro de C para tres 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 forme parte del Plan Municipal de Infraestructura Verde, cuya finalidad es que con 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 más de 600 parques en la ciudad de Mérida y aunque en superficie abarcan solo 456 ha (1.9% de la superficie total de la ciudad) es necesario contar con la información de la cubierta vegetal con la que cuentan. Se recomienda que en el caso de los parques se realice un censo total del arbolado ya que son los árboles el medio mediante el cual la naturaleza se entreteje con el medio urbano. 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, para tal efecto, se tomará como base la lista de JOYAS BOTANICAS realizada por la Dirección de Desarrollo Urbano del Ayuntamiento de Mérida que incluye 80 individuos aproximadamente, clasificados principalmente por su gran tamaño. Es importante proteger los árboles monumentales de la ciudad y evitar el riesgo de que puedan ser dañados o retirados.

En el marco del Plan Municipal de Infraestructura Verde 2015 -2018, con la información recabada con el presente estudio de Inventario del Arbolado Urbano de la Ciudad de Mérida y como se establece en el nuevo Reglamento del Arbolado Urbano, es necesario que cada tres años o cada cambio de administración municipal, se implementen acciones integrales para incrementar la cantidad, ampliar el acceso y mejorar el manejo, del arbolado y de las áreas verdes, en busca de una ciudad armónica y sustentable,

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, sudamérica 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	África y Asia	África y Australia	Asia y Australia +	Europa y Asia	Norteamérica +	Norteamérica y Sudamérica	Norteamérica y Sudamérica +	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. Indicó 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 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 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

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

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

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 buena 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 arrojó 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 siguiente cuadro, y si eliminamos las 5 familias con mayor cantidad de especies nos quedan 22 familias, ya que no hubo ninguna especie recomendada de la familia Magnoliaceae, con 74 especies posibles (ver anexo 1^a).

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

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

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.

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

	Nombre científico	Clave	Nombre común	Familia		Nombre científico	Clave	Nombre común	Familia
1	<i>Acrocomia</i>	AC10	Tuk	Arecaceae	28	<i>Crescentia cujete</i>	CRCU	Jicara	Muntingiaceae
2	<i>Acrocomia aculeata</i>	ACAC2	Tuk	Arecaceae	29	<i>Cupressus</i>	CU	Cedros (conifera)	Cupressaceae
3	<i>Adonidia merrilli</i>	ADME	Kerpis	Arecaceae	30	<i>Cyanea habenata</i>	MaClass	MaClass	Campanulaceae
4	<i>Beaucarnea</i>	BE1	BQ/10/17	Asparagaceae	31	<i>Delonix regia</i>	DERE	Flamboyán	Fabaceae
5	<i>Chamaedorea</i>	CH9	Palma Camedea	Arecaceae	32	<i>Diospyros</i>	DI6	Zapote negro ó Tauch	Ebenaceae
6	<i>Cocos</i>	CO7	Palma de coco	Arecaceae	33	<i>Diphysa</i>	DI7	Diphysa	Fabaceae
7	<i>Cocos nucifera</i>	CONU	Caca	Arecaceae	34	<i>Dracaena</i>	DR	Dracaena	Asparagaceae
8	<i>Cycadopsida</i>	Cydass	Género palma	Cycadaceae	35	<i>Dypsis lutescens</i>	CHLU	Palma areca	Apiaceae
9	<i>Hyophorbe lagenicaulis</i>	HYLA	Palma totella	Arecaceae	36	<i>Ehretia</i>	EHT	Roble	Boraginaceae
10	<i>Phoenix roebelenii</i>	PHRO	Palmera enana	Arecaceae	37	<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	ENCY	Pich	Apocynaceae
11	<i>Roystonea regia</i>	RORE	Palma Real	Arecaceae	38	<i>Ficus</i>	FI1	Laurel de la india	Moraceae
12	<i>Sabal mexicana</i>	SAMES	Huano	Arecaceae	39	<i>Ficus binnendijkii</i>	FIBI	Ficus	Moraceae
13	<i>Syagrus romanzoffiana</i>	SYRO	Pineo Coco Plumosa	Arecaceae	40	<i>Ficus macrocarpa</i>	FIMA	Ficus	Moraceae
14	<i>Thrinax radiata</i>	THPA	Chil	Arecaceae	41	<i>Ficus variegata</i>	FIVA	Ficus	Moraceae
15	<i>Washingtonia robusta</i>	WARO	Washingtonia	Arecaceae	42	<i>Filicopsida</i>	FICLASS	Helecho	Monilophyta
16	<i>Yucca aloifolia</i>	YUAL	Yucca	Agacaceae	43	<i>Guazuma ulmifolia</i>	GUUL	Pixoy	Solanaceae
1	<i>Annona</i>	ANB	Guanabana	Annonaceae	44	<i>Gymnocladus dioica</i>	MaClass	MaClass	Fabaceae
2	<i>Annona reticulata</i>	ANRE	Anona	Annonaceae	45	<i>Hamelia patens</i>	HAPA3	X'kanan	Rubiaceae
3	<i>Carica papaya</i>	CAPA3	Papaya	Primulaceae	46	<i>Havardia</i>	HAT3	Chukum	Fabaceae
4	<i>Citrus aurantium</i>	CIAU2	Naranja agria	Rutaceae	47	<i>Hibiscus rosa-sinensis</i>	HIROSI	Tulipan yucateco	Malvaceae
5	<i>Citrus limon</i>	CILI	Limon amarillo	Rutaceae	48	<i>Jacaratia</i>	JAB	Ku'umche'	Caricaceae
6	<i>Citrus reticulata</i>	CIRE3	Mandarina	Rutaceae	49	<i>Jatropha</i>	JA7	Pomolche	Euphorbiaceae
7	<i>Citrus x jambhiri</i>	CIJA	Limon	Rutaceae	50	<i>Leucaena leucocephala</i>	LELE	Waxim	Fabaceae
8	<i>Citrus x paradisi</i>	CIPA	Toronja	Rutaceae	51	<i>Lanchoarpus</i>	LO4	Balché	Fabaceae
9	<i>Cnidioscolus aconitifolius</i>	CNAC	Chaya	Euphorbiaceae	52	<i>Lisyloa latislaquum</i>	LYLA	Tzalam	Fabaceae
10	<i>Cordia</i>	CO29	Circote	Boraginaceae	53	<i>Maclura pomifera</i>	MAPD	Naranja de louisiana	Moraceae
11	<i>Ficus carica</i>	FICA	Higo	Malvaceae	54	<i>Magnolia acuminata</i>	MAAC	Magnolia	Magnoliaceae
12	<i>Limonium arborescens</i>	LIAR10	Limon	Plumbaginaceae	55	<i>Magnolia salicifolia</i>	MaClass	MaClass	Magnoliaceae
13	<i>Mangifera indica</i>	MAIN	Mango	Theaceae	56	<i>Magnolopsida</i>	MaClass	Latifoliada maderable	Magnoliaceae
14	<i>Manilkara zapota</i>	MAZA	Zapote	Sapotaceae	57	<i>Melicoccus bijugatus</i>	MEBI	Huaya	Clusiaceae
15	<i>Musa</i>	MUS	Platano	Musaceae	58	<i>Mimosa</i>	MI4	Mimosa	Fabaceae
16	<i>Persea americana</i>	PEAM	Aguacate	Lauraceae	59	<i>Morinda citrifolia</i>	MOC13	Noni	Polygonaceae
17	<i>Pistacia vera</i>	PIVE	Pistache	Anacardiaceae	60	<i>Moringa oleifera</i>	MOOL	Moringa	Fabaceae
18	<i>Pouteria sapota</i>	POSAT3	Mamey	Sapotaceae	61	<i>Muntingia</i>	MU3	Capulin	Muntingiaceae
19	<i>Psidium guajava</i>	PSGU	Guayabo	Lauraceae	62	<i>Murraya paniculata</i>	MUPA1	Limonaria	Verbenaceae
20	<i>Ribes rubrum</i>	RIRUB0	Grosella	Grossulariaceae	63	<i>Nectandra coriacea</i>	NECO	Laurelillo	Celastraceae
21	<i>Spondias purpurea</i>	SPPU	Ciruela	Acanthaceae	64	<i>Nothofagus obliqua</i>	MaClass	MaClass	Nothofagaceae
22	<i>Tamarindus indica</i>	TAIN	Tamarindo	Boraginaceae	65	<i>Ouatea</i>	OUI	Laurea	Ochnaceae
23	<i>Ternstroemia stahlii</i>	TEST3	Mamey de cura	Pentaphylacaceae	66	<i>Ouatea striata</i>	MaClass	MaClass	Ochnaceae
1	<i>Acacia</i>	ACSP2	Boshi catzín	Fabaceae	67	<i>Pinus</i>	PI2	Pino conifera	Pinaceae
2	<i>Albizia</i>	ALLE	Algarrobo blanco	Fabaceae	68	<i>Pinus pinaster</i>	PIPI6	Pino francés	Pinaceae
3	<i>Annona muricata</i>	ANMU	Guanabano	Annonaceae	69	<i>Piscidia piscipula</i>	PIPI1	Jabín	Fabaceae
4	<i>Annona squamosa</i>	ANSQ	Saramullo	Annonaceae	70	<i>Pithecellobium dulce</i>	PIDU	Ts'iuche	Polygonaceae
5	<i>Araucaria</i>	AR3	Araucarea	Araucariaceae	71	<i>Plumeria rubra</i>	PLRU	Flor de mayo	Fabaceae
6	<i>Azadirachta</i>	AZI	Neem	Meliaceae	72	<i>Populus x inopina</i>	MaClass	MaClass	Salicaceae
7	<i>Azadirachta indica</i>	AZIN	Neem	Meliaceae	73	<i>Pouteria</i>	PO15	Chooch y Kaniste	Sapotaceae
8	<i>Bauhinia variegata</i>	BAVA	Pata de vaca	Fabaceae	74	<i>Pouteria caimito</i>	POCA3	Caimito	Sapotaceae
9	<i>Baucarnea recurvata</i>	MaClass	MaClass	Fabaceae	75	<i>Prosopis alba</i>	MaClass	MaClass	Fabaceae
10	<i>Bougainvillea</i>	BO9	Bugambileas	Fabaceae	76	<i>Prosopis chilensis</i>	PRCH	Algarrobo	Fabaceae
11	<i>Brosimum alicastrum</i>	BRAL3	Ramon	Moraceae	77	<i>Prunus amygdalus</i>	PRAM2	Almendro	Rosaceae
12	<i>Brugmansia</i>	MaClass	MaClass	Solanaceae	78	<i>Prunus dulcis</i>	PRDU	Almendro	Rosaceae
13	<i>Bursera simaruba</i>	BUSI	Chaká	Burceraceae	79	<i>Pseudobombax ellipticus</i>	PSELS	Amapola	Fabaceae
14	<i>Byrsonima</i>	BY1	Nance	Malpighiaceae	80	<i>Punica granatum</i>	PUGR	Granada	Clusiaceae
15	<i>Caesalpinia</i>	CA5	kitamché	Fabaceae	81	<i>Quercus</i>	QU	Encino	Fagaceae
16	<i>Caesalpinia pulcherrima</i>	CAPU13	Chak sikin	Nyctaginaceae	82	<i>Samanea saman</i>	PISA2	Algarrobo	Fabaceae
17	<i>Caryota urens</i>	MaClass	MaClass	Primulaceae	83	<i>Senno racemosa</i>	SERAS	K'anha'abin	Fabaceae
18	<i>Casimiroa edulis</i>	MaClass	MaClass	Rutaceae	84	<i>Simarouba glauca</i>	SIGL	Pa'sak	Simaroubaceae
19	<i>Cassia fistula</i>	CAFI	Lluvia de oro	Rubiaceae	85	<i>Swietenia</i>	SW1	Caoba	Meliaceae
20	<i>Cecropia</i>	CE4	Guarumbo	Urticaceae	86	<i>Tabebuia</i>	TASP	Roble	Bignoniaceae
21	<i>Cedrela odorata</i>	CEOD	Cedro	Mielaceae	87	<i>Tabebuia chrysantha</i>	TACH	Maculis amarillo	Bignoniaceae
22	<i>Celba pentandra</i>	CEPE	Celba	Malvaceae	88	<i>Tabebuia rosea</i>	TARO	Maculis	Bignoniaceae
23	<i>Cestrum nocturnum</i>	CENO	Dama de noche	Solanaceae	89	<i>Tecoma stans</i>	TEST	X'kan Lol	Bignoniaceae
24	<i>Chrysophyllum cainito</i>	CHCA10	Caimito	Combretaceae	90	<i>Terminalia catappa</i>	TECA	Almendro	Bignoniaceae
25	<i>Citrus</i>	CISP	Citrico	Rutaceae	91	<i>Thevetia peruviana</i>	THPE3	Campanita	Apocynaceae
26	<i>Citrus australasica</i>	CIAU1	Citrico	Rutaceae	92	<i>Thuja</i>	TH9	Thuja	Cupressaceae
27	<i>Coccoloba</i>	CO4	Uva de mar	Polygonaceae	93	<i>Trema micrantha</i>	TRMI	Pixoy	Cannabaceae
					94	<i>Ziziphus mauritiana</i>	ZIMA	Jujube	Rhamnaceae

6.2 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 lebbek</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>Couroupita 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>Perocarpus 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 waimeae</i>
78		<i>Pachira insignis</i>
79		<i>Sterculia apetala</i>
80		<i>Sterculia discolor</i>
81	Meliaceae	<i>Swietenia mahagoni</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>Koeleruteria 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

6.3 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 (PM2.5) que es un subconjunto de PM10, esta no ha sido incluidos en este análisis. Por lo general, la PM2.5 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 (Balducchi 1988, Balducchi 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 re suspensión 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 PM2.5 cuando la materia particulada se deposita sobre las superficies de las hojas (Nowak et al 2013). Estos PM2.5 depositados pueden ser re suspendidos 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 PM2.5 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 re suspenden más partículas de las que eliminan. La re suspensión también puede llevar a un aumento de las concentraciones totales de PM2.5 si las condiciones de la capa límite son menores durante los períodos netos de re suspensión 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 PM2.5 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 (monóxido de carbono), Mex \$ 192.772 por tonelada (ozono), Mex \$ 192.772 por tonelada (dióxido de nitrógeno), Mex \$ 47.194 por tonelada (dióxido de azufre), 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 O₂ producido se calcula a partir del secuestro de carbono basado en pesos atómicos: liberación neta de O₂ (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.

Escurrentía evitada por aumento de infiltración

La escurrentía 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 escurrentía superficial, sólo la precipitación interceptada por las hojas se cuenta en este análisis.

El valor de escurrentía 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 escurrentía 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 escurrentía evitado se calcula sobre la base del precio de US \$ 2.361 por m³.

Uso de Energía en Edificios:

Si 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).

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, NO_x, COV, PM10 y SO₂ para 2010 (Bureau of Transportation Statistics 2010; Heirigs et al 2004), PM2.5 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 NO_x 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, NO_x, 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, NO_x y SO_x por Btu sobre la base de las emisiones totales y la quema de madera (toneladas) de (British Columbia Ministry 2005; Comisión Forestal de Georgia 2009).

6.4 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

6.5 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

7. Agradecimientos

Publicado el 16 de noviembre de 2017

Autores: M en C. Horacio de la Concha, Arq. Leticia Roche Cano y LARN. Adriana García Burgos

Agradecimiento de los autores

Queremos agradecer en primera instancia al Lic. Mauricio Vila Dosal, alcalde de la ciudad de Mérida, y la LARN. Sayda Melina Rodríguez Gómez, directora de la Unidad de Desarrollo Sustentable, por haber creído e impulsado este proyecto, lo cual fue determinante para haberlo podido llevar a cabo.

Así mismo, agradecemos a los chicos de la Universidad Autónoma de Yucatán, de la Universidad Marista de Mérida y a la Universidad Autónoma de Chapingo en Yucatán, por haberse involucrado al grado de compromiso en que lo hicieron para poder generar el levantamiento de las muestras que hoy han traído los resultados con lo que se trabajó para la generación de este documento.

Alexis Emir Zapata Trejo
Kenia Xiomara Mata Cruz
Erika Pacheco Pech
Maria Jocelyn Reynoso Chi
Mairely del Rosario Tec Alonzo
Joe Billy Cohuoh Hernández
Nalleli Karina Uc Gómez
Karen Mariana Deolarte Martínez
Mauricio De La Rosa Paredes
Ana Cecilia Pinto Braga
Montserrat Serritos Castañeda
Arely de la Cruz Martín Ek
Geider Manuel Puc Aké
Rodrigo Ismael Tee Pan
Sinthia María Pool Celis
Selene Abigail Nuñez Cauich
Ulises Martínez
Sergio Flores Rivera
Maleny Belem Mendoza García
Fabiola Ivette López Hernández

Así mismo a los voluntarios que por mero amor al arte se acercaron para colaborar con sus virtudes con este proyecto, a cambio de la mera satisfacción de contribuir con lo que por muchos años han estado tratando de impulsar: el cuidado de arbolado urbano.

Carlos Pantoja Argáez y Miriam Del Rosario Vázquez Pérez

Y a quienes nos apoyaron con su conocimiento y experiencia con su asesoría y tiempo de capacitación y revisión

Dr. Roger Orellana
Biol. Zaac Nicté Solis Matos
Dr. Alonso Andrés Vera Martínez

8. 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](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.; Schroten, 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