

**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES
DEPARTAMENTO DE MANEJO DE RECURSOS FORESTALES**

**CONSTRUCCIÓN DE MODELOS DE ESTIMACIÓN DE
BIOMASA Y ÁREA FOLIAR PARA DIEZ ESPECIES
ARBÓREAS URBANAS DE LA CIUDAD DE SANTIAGO**

Memoria para optar al Título
Profesional de Ingeniero Forestal

Cynnamon Dobbs Brown

Calificaciones:	Nota	Firma
Prof. Guía Sr. Jaime Hernández P.	
Prof. Consejero Sr. Patricio Corvalán V	
Prof. Consejero Sr. Juan Caldentey P.	

SANTIAGO-CHILE

2005

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES

DEPARTAMENTO DE MANEJO DE RECURSOS FORESTALES

**CONSTRUCCIÓN DE MODELOS DE ESTIMACIÓN DE
BIOMASA Y ÁREA FOLIAR PARA DIEZ ESPECIES
ARBÓREAS URBANAS DE LA CIUDAD DE SANTIAGO**

Memoria para optar al Título
Profesional de Ingeniero Forestal

CYNNAMON DOBBS BROWN

Profesor Guía: Ing. Forestal, Sr. Jaime Hernández Palma

SANTIAGO - CHILE.
2005

RESUMEN

El aumento de la población en las ciudades ha llevado a un incremento de la contaminación, por consiguiente, se hace necesario buscar alternativas costo-efectivas de disminución de esta. Estudios de vegetación urbana permitirían determinar el rol de las plantas en la disminución de los niveles de CO₂ atmosférico y de partículas contaminantes.

Uno de los parámetros que permite conocer la cantidad de carbono almacenado dentro de un árbol es la biomasa, mientras que el área foliar permite conocer los procesos de intercambio gaseoso y captura de partículas contaminantes realizados por los árboles dentro de la ciudad.

El muestreo de ramas al azar (RBS), es un método no destructivo y poco dañino para el árbol, que se presenta como una herramienta eficiente y precisa para la toma de muestras de árboles individuales en la ciudad. En este estudio, se aplicó el RBS para la obtención de muestras de biomasa de las 10 especies más frecuentes en la ciudad de Santiago, para luego, probar los datos contra cinco fórmulas de regresión. Se utilizaron criterios estadísticos para la selección del modelo más adecuado.

La obtención de muestras de área foliar consistió en la extracción de 50 hojas de distintas partes de la copa del árbol. Los datos recolectados se probaron contra cinco fórmulas de regresión, escogiendo la que presentaba las mejores estadísticas, es decir, menores residuos y mayor correlación lineal entre las variables involucradas.

Los modelos seleccionados, para ambas características del árbol, tienen un buen poder de predicción. Estos entregan datos cercanos a los observados y a los esperados para la especie. La mayoría de las ecuaciones, presentan como variable de predicción al diámetro a la altura del pecho o a la altura total del árbol. Al ser estos parámetros de fácil medición permiten su aplicación sin la necesidad de una mayor capacitación.

Es así como, la construcción de modelos de biomasa y área foliar se vislumbra como una alternativa para el desarrollo de estrategias de manejo dirigidas hacia la descontaminación.

SUMMARY

Population growth has driven cities to an increase in contamination; therefore it's necessary to look for cost-effective alternatives for its decrease. Urban vegetation studies will allowed to determine the role of plants in the reductions of atmospheric CO₂ levels and pollutant particles.

One of the parameters that allow us to know the amount of accumulate carbon inside a tree is biomass; meanwhile leaf area could give knowledge about the process of gas exchange and the capture of pollutant particles done by trees in the cities.

The Randomized Branch Sampling (RBS) is a non destructive and almost harmless to the tree method; which presents itself as an accurate and efficient tool for taking samples from individual trees in the cities. In this study, RBS was applied to obtain the biomass of the 10 species that are more frequently found in Santiago city, in order then, to try out the data against five regression formulas. Statistics criterions were used for the selection of the more suitable model.

The obtaining of foliar area samples consisted in the removal of 50 leaves from different parts of the tree. Then the collected data was tested against 5 regression formulas, choosing the one with better statistics, meaning low residuals and better lineal correlations between the involve variables .

The developed models, for both tree characteristics, have a good predictive power. They return data close to the observed values and the expected values for the species. The majority of the equations use as a predictive variable the diameter at breast height or the total tree height. These parameters are easy to measure, so its application doesn't need a major capacity or knowledge.

This is how the construction of biomass and foliar area models glimpses as an alternative for the development of management strategies directed towards decontamination.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quisiera dar las gracias al Sr. Jaime Hernández, quien me entregó apoyo y empuje para todo lo que significó el desarrollo de este documento. Sus conocimientos y experiencia complementaron el resultado de esta Memoria, de manera que se direccionara hacia un producto novedoso y útil dentro del manejo del arbolado urbano; pudiendo significar un aporte real para el mejoramiento de la calidad de vida de las personas en las ciudades.

Al Sr. Patricio Corvalán por su constante entusiasmo y apoyo en el desarrollo de esta memoria de título.

A su vez, agradecer a las Direcciones de Aseo y Ornato de las Municipalidades de La Reina, Providencia y Lo Barnechea por permitir la toma de muestras dentro de su patrimonio arbóreo y la entrega de su completa cooperación en el trabajo de terreno.

Último, pero no menos importante, dar las gracias a Carolina Córdova, Daniel Montaner, Nicolás Contreras y Sebastián Niemeyer por su ayuda en la toma de muestras para el desarrollo de esta Memoria.

A todas las persona que estuvieron
cuando las necesite, especialmente a
mi Familia y a mis grandes amigos.

1 INTRODUCCIÓN

El mundo ha ido cambiando; los desarrollos tecnológicos producidos en los últimos años han llevado a la prolongación de la esperanza de vida de las personas. La consecuencia de esto ha sido la migración de las personas hacia las ciudades y por consiguiente su expansión, en desmedro del medio natural que las rodea, lo que ha causado un aumento en la contaminación, aumento en los costos de calefacción y efectos más duros de las precipitaciones.

Las ciudades de Sao Paulo y Santiago se encuentran dentro de las ciudades más contaminadas de América Latina, por lo que se hace necesario realizar estudios de vegetación urbana, ya que es una forma complementaria por la cual se podría disminuir la concentración de contaminantes en la atmósfera a un costo reducido, además de influir en las personas mejorando su calidad de vida.

Los efectos de la vegetación son variados, los roles obvios son la sombra, la fotosíntesis, la absorción de gases contaminantes, la reducción de la velocidad del viento y el aumento en el valor de una propiedad. Los menos obvios incluyen la evapotranspiración, la intercepción y el almacenaje de precipitaciones, absorción de ruidos de alta frecuencia, entre otros (California Air Resources Board, 2003).

El conocimiento de la biomasa y área foliar es una base necesaria como medio para cuantificar la contribución del arbolado urbano a la descontaminación, entre otras variables. Hasta el momento, los estudios de biomasa en la ciudad de Santiago se han realizado usando ecuaciones estimadas en otros países, por lo que su ajuste no entrega resultados validados de lo que acontece. La utilización de este tipo de ecuaciones, se justifica principalmente debido al origen exótico de la mayoría de las especies en la ciudad. Por estas razones, se hace necesario desarrollar modelos de estimación de biomasa y área foliar en base a datos muestreados dentro de nuestra ciudad.

En el presente estudio se construirán modelos de biomasa y área foliar para las diez especies arbóreas más comunes presentes en la ciudad de Santiago.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Antecedentes generales de la vegetación urbana

La vegetación urbana se define como una agregación de vegetación y espacios verdes dentro de las ciudades y sus alrededores próximos, que proveen beneficios vitales para el mejoramiento de la calidad de vida de las personas (USDA Forest Service, 2003). También, queda definido como las plantas o árboles que se encuentran en parques, jardines, espacios públicos, calles, tanto en áreas comerciales como residenciales (California Air Resources Board, 2003).

La vegetación se refiere al conjunto de árboles, arbustos, suculentas y herbáceas. A su vez, estas pueden encontrarse en distintos espacios físicos:

- Propiedades privadas: referidas principalmente a jardines de carácter privado; estos pueden ser de casas, clubes privados, instituciones educativas, entre otras. La distribución del tipo de vegetación es proporcionalmente similar entre los componentes herbáceas y arbustivas, menor participación presenta el componente arbóreo.
- Calles: corresponde a espacios públicos, ligados al cuidado de municipalidades o instituciones públicas. El tipo de vegetación predominante son los árboles, presentándose en una menor proporción arbustos y herbáceas.
- Áreas Verdes Públicas y Privadas: corresponde a plazas, parques, bandejones centrales, bosques y otros tipos de estructura similar. La proporción de participación es similar para todos los componentes.

La distribución y cantidad de vegetación dentro de la ciudad depende del espacio disponible y como las personas eligen ocupar este vacío, ya sea con herbáceas, arbustos o árboles (Rowntree, 1998). También depende de la planificación realizada por parte de las municipalidades, referente a la cantidad de espacios verdes a establecer y de que calidad van a ser estas (jardines, plazas, parques, entre otras).

La clave para comprender el ecosistema urbano es enfocarse en la vegetación misma, pero sin dejar de lado aspectos relevantes como suelos e infraestructura circundante. El conocer este ecosistema permite realizar un correcto manejo del agua, energía, contaminantes y flujos de nutrientes en beneficio de la comunidad (Rowntree, 1998).

Cuánto más vegetación hay, mayor es su influencia relativa sobre el medio ambiente. Sin embargo, no sólo es necesario conocer su cubierta, sino que también existen otros aspectos relevantes como la composición de las especies, variables de tamaño, referidas a distribución diamétrica y altura, la biomasa y la superficie foliar. El conocimiento de estos datos estructurales puede ser utilizado para la formulación de modelos funcionales como por ejemplo, de emisiones de hidrocarburos (Nowak et al., 1994).

La vegetación de las ciudades mejora las condiciones climáticas; una de sus contribuciones es que gracias a la sombra que proyectan, reducen la cantidad de energía solar absorbida, almacenada e irradiada por las superficies de los edificios (Nowak, 1996), además la transpiración de agua, el bloqueo de los vientos y la modificación que realizan de los almacenamientos e intercambios entre las superficies urbanas logran afectar el clima local y en consecuencia, la sensación térmica de los seres humanos, además de mejorar la calidad del aire (Nowak et al, 1994).

La vegetación también se considera como una estrategia de conservación de energía calórica y reducción de CO₂, siendo más rentable, que otras posibilidades, para el ahorro energético. De hecho, en términos de reducción del CO₂ atmosférico, los árboles en áreas urbanas ofrecen el doble beneficio: el almacenamiento directo de carbono y la disminución de la producción de CO₂ por parte de las plantas de energía que utilizan combustibles fósiles (Nowak et al, 1998).

Otro de los beneficios que vale la pena mencionar, se refiere a que mejoran la calidad del aire, al ofrecer una superficie donde puedan quedar atrapadas las partículas contaminantes. También funcionan como sumidero de CO₂ atmosférico, por ende su

incremento, en términos de cantidad, permite reducir la concentración de gases de efecto invernadero (GHG's) (Nowak, 1996).

2.2 Situación de la vegetación urbana en Santiago

Del catastro de los espacios verdes urbanos realizado en 1992 (Nilo, 2001), se encontraron 2.886 hectáreas de espacios públicos y 2.625 hectáreas corresponden a espacios verdes privados. El total de estos espacios corresponden al 2,5% del área urbana consolidada. Estas cifras generan 5,7 m² de áreas verdes por habitante, aunque cerca de la mitad de las áreas consideradas corresponden a cerros o espacios casi sin vegetación.

Del inventario realizado como parte del Informe Final del Proyecto FONDEF D001 1078 (2002), correspondiente a 36 comunas de la zona de Santiago, se obtuvo un total de 6.245.000 de individuos, distribuidos entre árboles exóticos, árboles nativos y arbustos. Esta vegetación cubre el 16,5% de la superficie del Gran Santiago y está compuesta por 160 especies diferentes, aunque sólo el 12% corresponde a especies nativas. Las especies exóticas han sido importadas principalmente de Estados Unidos y Australia.

La distribución de la vegetación es desigual dentro de las comunas de Santiago. A modo de ejemplo, algunas comunas del sector Oriente, como Vitacura, cuentan con un porcentaje de cobertura arbórea de 44%, mientras que en comunas del sector Poniente, Sur o Norte como San Ramón, esta cifra llega a sólo el 3,8% (de la Maza et al., 2003).

En tanto, la totalidad de los árboles de la ciudad secuestraron aproximadamente 37.713 toneladas de carbono entre el año 1997 y 1998, donde la mayoría de los árboles que se encuentran en clases diamétricas menores a 60 cm tienen la capacidad de secuestrar alrededor del 70% de dicha cantidad (Escobedo et al., 2002). Además, también recogen 2.266 toneladas de material particulado, 115 toneladas de monóxido de carbono, 856 toneladas de ozono urbano, 321 toneladas de dióxido de nitrógeno y 211 de dióxido de azufre, entre otros contaminantes (de la Maza et al., 2003).

2.3 Antecedentes generales de biomasa

Biomasa es la cantidad total de materia viva presente en un sistema biológico, generalmente se expresa en unidades de peso seco por unidad de superficie (Newbould, 1967). También se define como el conjunto de la materia orgánica, de origen animal o vegetal, incluyendo los materiales procedentes de su transformación natural o artificial (DERSA, 2003). Otro tipo de definición se refiere a la materia orgánica seca total o energía contenida en un organismo viviente que está presente en un momento específico y en una unidad definida (comunidad, ecosistema, etc.) de la superficie de la tierra (O'Hara, 1990).

La biomasa sobre el suelo corresponde a todo el material vegetal sobre el suelo del bosque, lo que incluye árboles vivos, muertos, ramas, hojas y arbustos (Yale, 1999).

Esta puede ser utilizada para cuantificar la cantidad de materia biológica en un momento y ambiente determinado, pero también puede ser usada para determinar la distribución de la materia orgánica dentro de sus distintos componentes (Pardé, 1980). Su estimación puede proveer información sobre los nutrientes y carbono acumulado en la vegetación como un todo o la cantidad de fracciones específicas presentes en cada componente (Hairiah et al., 2001).

En los árboles, la biomasa varía según se trate de ramas, fuste, hojas y raíces dependiendo de distintos factores como la edad, el sitio, especie o tratamiento silvicultural. Sin embargo, existen tendencias que permiten configurar una idea de la distribución de la biomasa dentro de un sistema (Bown, 1992).

De acuerdo a Pardé (1980), la biomasa foliar presenta una mayor variación, no comportándose como el resto de los componentes, ya que llegado un momento se estabiliza y pocos factores la influyen.

La importancia de estudios de biomasa foliar en ambientes urbanos va dirigido a evaluar los procesos de intercambio gaseoso y contaminación, lo que permitiría desarrollar sistemas de manejo del arbolado urbano dirigido hacia planes de descontaminación de forma costo efectiva (de la Maza et al., 2003). Se relaciona con la contaminación atmosférica en términos de la remoción de contaminantes del aire, emisiones de compuestos volátiles, almacenamiento y secuestro del carbono y afecta el uso de energía en construcciones. Por lo tanto, un manejo inadecuado de la biomasa se materializa en un detrimento de la calidad de vida de las personas, afectando su productividad económica (Escobedo et al. 2002).

Durante los últimos años se ha ido produciendo una acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera que ha llevado al renombrado efecto de cambio climático. Uno de los gases que mayor incidencia tiene dentro de este fenómeno es el dióxido de carbono. El origen principal de su expulsión hacia la atmósfera es la quema de combustibles fósiles y la pérdida de biomasa, llegando su contribución a alrededor de un 50%, siendo ésta una de las razones por las cuales es de importancia mantener la vegetación en el mundo (Weber, 2003c). Esto último no sólo va dirigido a la mantención de los bosques, sino también, para la mitigación de los efectos de dióxido de carbono, se debe considerar promover la formación de bosques urbanos, lo que además otorgaría un valor agregado a la ciudad en términos paisajísticos y ecológicos (Weber, 2003b). Cabe destacar, que los estudios de biomasa, permitirían estimar el secuestro de carbono que realizan los árboles, lo que sería útil para desarrollar proyectos de intercambio de bonos de carbono o intercambio de gases de efecto invernadero (Weber, 2003a).

Mediante la estimación de la biomasa sobre el suelo se puede estimar el almacenamiento de carbono y a la vez las emisiones de isoprenos, monoterpenos y otros compuestos orgánicos volátiles, ya que existen factores de emisión que se pueden asociar a la biomasa foliar (Escobedo et al. 2002).

Asociado a la biomasa foliar se encuentra el área foliar que corresponde a la integración del área de todas las hojas presentes en un individuo o sistema. La correspondencia de ésta en relación a la unidad de superficie que lo sustenta, se conoce como índice de área foliar (IAF) (de la Maza et al., 2003). La extensión en la cual los

árboles interceptan los contaminantes, precipitaciones y enfrían el aire mediante la evapotranspiración depende de la magnitud de la superficie foliar, de ahí su importancia (McPherson, 1998b).

2.4 Métodos de estimación de biomasa de árboles individuales

Para la estimación de la biomasa se puede utilizar tanto muestreos destructivos como no destructivos, dependiendo de las posibilidades del estudio. Como dice su nombre el método destructivo consiste en la extracción física de los árboles o parte de ellos, proceso que consume gran cantidad de tiempo y recursos (Bown, 1992). En cambio, el método no destructivo, es rápido pues no implica el volteo del árbol, por lo que un mayor número de árboles puede ser muestreado, reduciendo así el error muestral en comparación al muestreo destructivo (Hairiah et al., 2001).

2.4.1 Método destructivo

Para este método, se pueden tener las opciones de voltear un árbol o varios, según el objetivo perseguido. Luego, para la obtención de la biomasa total se puede utilizar el Método del Árbol Medio o el ajuste de una función, mediante el uso de regresiones.

El Método del Árbol Medio consiste en buscar el árbol que contenga el diámetro promedio, voltearlo y estimar su peso seco. Sobre esta base la biomasa total, en una unidad de superficie, se calcula por el producto entre el número de árboles y la biomasa del árbol medio. En general, se utiliza cuando los ejemplares presentan un alto valor económico, ecológico o social (Madgwick, 1973).

El ajuste de una función matemática consiste en el volteo de árboles en distintas clases de DAP para extraer submuestras y pesar. Luego, éstas son secadas y pesadas en laboratorio y se proyecta sobre los árboles volteados. Sobre estos datos se generan relaciones empíricas de biomasa, las que se aplican a cada uno de los árboles del rodal, obteniendo así la biomasa total en función de la suma de la biomasa de los árboles individuales (Teller, 1988).

Para el arbolado urbano, dado que presentan heterogeneidad en su estructura, el Método del Árbol Medio no es un buen estimador, por lo que es preferible la utilización de un ajuste de funciones (de la Maza et al., 2003).

2.4.2 Método no destructivo

Nowak (1996) utilizó variables de fácil medición como el DAP, altura total, altura de copa y ancho de la copa para la estimación de la biomasa. Los datos fueron obtenidos de 54 árboles urbanos, con copas en excelentes condiciones, ubicados en áreas verdes de Chicago, Illinois. Además de las mediciones anteriormente mencionadas, se obtuvo el volumen de la copa basado en mediciones geométricas y se tomaron 10 muestras de follaje de 0.4 m^3 . Para la formación de ecuaciones de regresión, se utilizó un factor de sombreado promedio por especie, que representa la luz interceptada por el individuo.

De las ecuaciones probadas con las distintas variables, los coeficientes de determinación y error cuadrático medio indican que las estimaciones basadas en el ancho de la copa proporcionan una mejor aproximación que los basados en el DAP (Nowak, 1996).

Otro método utilizado son los modelos fractales de ramas, que se aplica derivando ordenes subsecuentes de ramas para luego ajustar ecuaciones alométricas a los datos tomados. Los modelos predicen la biomasa total del árbol, pero también propiedades como área foliar y peso de las ramas. Las reglas de este modelo se establecen en cuanto al diámetro, largo u orientación de las ramas siguientes. Se conforman relaciones entre cinco parámetros medidos y los coeficientes de las relaciones alométricas que incluyen el número de ramas, diámetro de éstas, perímetro, entre otras (Hairiah et al., 2001).

Existen además, procedimientos que consideran al árbol individual como una población y utilizando la estructura de ramas de los árboles forman modelos de muestreo. Éstos incluyen técnicas de importancia de muestreo (IS), muestreo de ramas al azar (RBS), control de la variedad del muestreo, entre otras y a éstos se les aplican a continuación las ecuaciones de biomasa respectiva (Gregoire, 2001).

2.4.2.1 Muestreo de ramas al azar (RBS)

Siguiendo la línea derivada de la arquitectura arbórea se encuentra el método llamado muestreo de ramas al azar o RBS, que permite la estimación de parámetros de árboles individuales. Éste fue introducido por Jessen en el año 1955 para la estimación de frutos en un árbol de naranjo. El método utiliza la ramificación natural del árbol para tomar muestras en cada paso del parámetro a estimar (Saborowski, 2002).

Este método de muestreo entrega un eficiente promedio para valorar varias características de los árboles. El estimador usualmente asociado es la utilización del peso de la probabilidad inversa, de forma de asegurar el insesgamiento de la estimación (Gregoire et al., 1995).

Es un método especial de aplicación de probabilidades en distintas etapas, donde se define la estructura del árbol en base a nodos de ramas y sección de las ramas (Gove et al., 2002).

El RBS es usado para seleccionar una senda que consiste en conexiones de los segmentos de ramas, donde existirán tantas como ramas terminales existan. Los segmentos de ramas de una senda constituyen una probabilidad de muestreo del cual se pueden estimar atributos del árbol completo (Gove et al., 2002).

Una rama queda definida como el sistema fustal completo que se desarrolla a partir de un brote lateral o terminal. La sección, es la parte de la rama que se encuentra entre dos nodos consecutivos sin distinción entre el fuste y las ramas laterales. Una senda esta dada por la secuencia de secciones interconectadas. Por ejemplo, una senda puede extenderse desde el inicio del fuste (rama de primer orden) a un brote terminal o se puede extender desde el inicio del fuste principal a una rama de orden mayor. En este último caso, todo el sistema de la rama de orden mayor es tratado como la sección terminal de la senda (Gregoire et al, 1995).

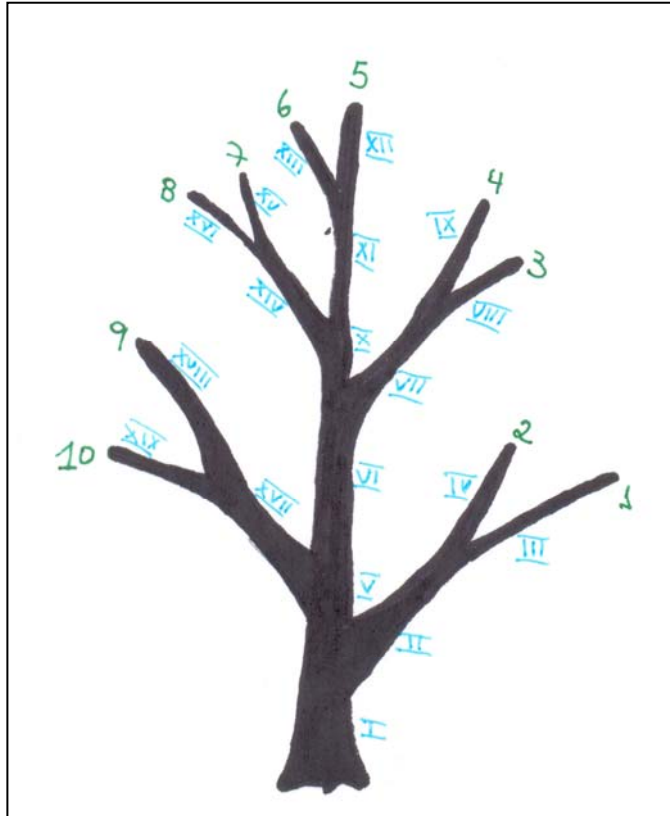


Figura N°1: En la siguiente figura se observan 10 sendas posibles, que corresponden a las ramas terminales del árbol. Algunas de las secciones disponibles se encuentran representadas por un número, cabe notar que las secciones pueden coincidir con los órdenes en la arquitectura del árbol. Las secciones se encuentran representadas por números romanos (Gregoire et al., 1995).

El procedimiento consiste en elegir el primer nodo, que sería la base del árbol, donde se forma el primer segmento al llegar al segundo nodo, continúa sobre el segmento elegido y repite la elección. La elección secuencial finaliza cuando se escoja el segmento que deriva en una rama terminal. El conjunto de segmentos forman la senda (Saborowski, 2002).

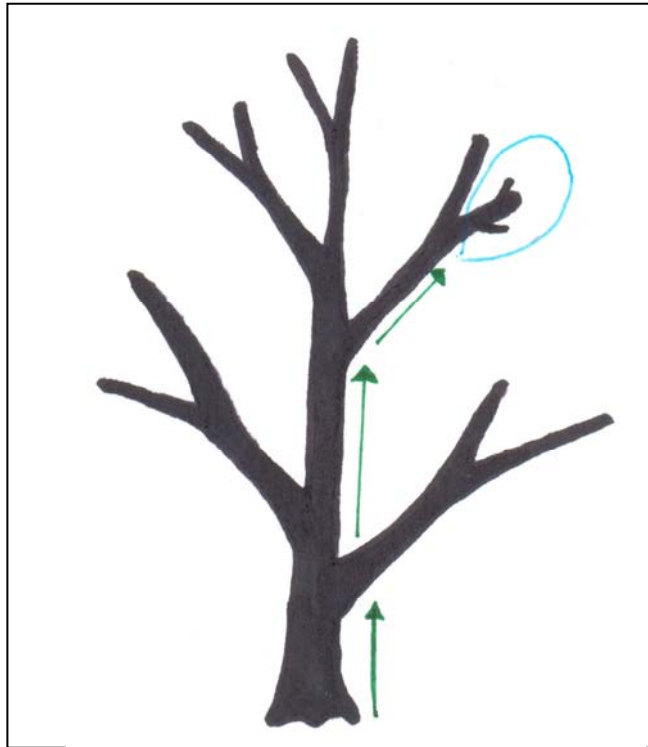


Figura N°2: Camino tipo, donde la sección terminal corresponde a un sistema de ramas, no a una rama por sí sola (Gregoire et al., 1995).

La selección de la senda muestral se realiza en base a una aplicación repetitiva de muestreo de probabilidad. En el nodo se selecciona una variable, asociada al atributo a estimar, que se relaciona con una probabilidad de elección y mediante la generación de un número aleatorio permite escoger el camino a seguir. Dentro de cada árbol se necesitan al menos dos sendas para poder calcular el error estándar de estimación (Gove et al., 2002).

Cuando uno de los objetivos es estimar la biomasa foliar, se puede utilizar el modelo de Shinozaki que sugiere que el follaje atachado a cada rama está relacionado al diámetro al cuadrado (D^2) (Valentine et al., 1984).

Si la primera sección es elegida a propósito o es el fuste principal, su probabilidad de selección, q_1 , es igual a 1. La siguiente medición se realiza al arribar al segundo nodo, donde una de las ramas que emanan de este nodo es elegida al azar asignándole una

probabilidad proporcional al tamaño de alguna variable, ésta se denota como q_2 . Este procedimiento se repite hasta que se seleccione una rama muy pequeña o una terminal con probabilidad q_r (Gregoire et al, 1995).

Las probabilidades de selección asignadas a las ramas deben sumar 1. Técnicamente este tipo de probabilidades se llaman condicionales debido a que la selección de una rama en un nodo depende del camino que se está siguiendo. La probabilidad no condicional de selección del r^{th} ($r = 1, 2, \dots, R$) sección de la senda es,

$$Q_r = \prod_{k=1}^r q_k$$

Fuente: Gregoire et al., 1995

donde Q representa la probabilidad acumulada para la sección de rama a extraer y q es la probabilidad individual de las secciones por las cuales ha pasado la senda.

El peso de las r secciones de la senda se denota como b_n , entonces,

$$\frac{B_n}{q_n}$$

es un estimador insesgado del peso de todas las ramas atachadas a la sección. Para este estimador B representa la biomasa de la sección y q es la probabilidad asociada a dicha sección.

Finalmente, el procedimiento se puede reducir a la fórmula de estimación de la biomasa del árbol como sigue,

$$\hat{b} = \sum \frac{b_r}{Q_r}$$

donde r es cada una de las secciones consideradas dentro de la senda. La variable b puede considerarse como cualquier característica del árbol y Q como su probabilidad asociada (Valentine et al., 1984).

El estimador insesgado de \hat{b} es,

$$\hat{b} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \hat{b}_i$$

donde m es la cantidad de sendas realizadas dentro del árbol.

Para estimar la varianza, es necesario haber elegido $m > 1$ senda y se calcula como sigue,

$$Var(\hat{B}) = \frac{1}{m(m-1)} \sum (\hat{B}_i - \hat{B})^2$$

La selección de la senda de muestreo se logra mediante la aplicación repetitiva de muestreo probabilístico. Para ilustrar el procedimiento se utilizará la **Figura N°1**. Se comienza en el nodo basal (sección I), en este punto al no haber otra alternativa, la sección es seleccionada con una probabilidad igual a 1. En el nodo II existen dos posibilidades de continuar la senda, la sección II o V, por lo que se establece una probabilidad condicional de acuerdo a alguna variable de tamaño asociada; es decir si en la sección II la rama tiene una probabilidad q_2 entonces en la sección V la rama tendrá una probabilidad $1 - q_2$. A modo de ejemplo se asumirá $q_2 = 0.45$ y $q_5 = 0.55$ donde la selección se realizará en base a la generación de un número aleatorio (u). Si u pertenece al intervalo $[0; 0.45]$ la rama de la sección II es escogida (Gove et al., 2002).

Al arribar al nodo III, el procedimiento debe ser repetido seleccionando ya sea, la sección III o IV. Si se asume que se escogió la sección III que es terminal, entonces la senda queda compuesta por las secciones 1→2→3, habiendo pasado por lo nodos I, II, III (Gove et al., 2002).

El siguiente paso es el cálculo de la biomasa foliar completa del árbol. A modo de ejemplo se obtuvieron los siguientes datos:

Cuadro N°1: Datos obtenidos de muestras de Plátano Oriental.

Sección	Biomasa foliar (Kg.)	Diámetro Sección (cm)	Probabilidad
1	0.162	44	1
2	0.361	25	0.45
4	0.597	7	0.41

El resultado de la ecuación es el siguiente,

$$X = 0,162 + \frac{0,361}{1 * 0,45} + \frac{0,597}{1 * 0,45 * 0,41} = 4,199Kg.$$

Al realizar la estimación según la sección, se pueden incluir la biomasa intermedia, no siendo sólo asignada a la sección terminal (Jessen, 1955).

Las probabilidades de selección deben ser variables cuantitativas altamente correlacionadas con la variable de interés. Por ejemplo, si se quiere estimar la biomasa de la madera la variable de peso debe ser el diámetro, mientras que si desea estimar la biomasa foliar lo más adecuado es utilizar el diámetro al cuadrado o el diámetro al cuadrado por el largo de la sección (Gregoire et al. 1995).

Para que la estimación no se encuentre sesgada se debe considerar las ramas epicórmicas o brotes como parte de una sección, no como ramas por sí solas. Además, para el cálculo de la varianza y el error estándar deben considerarse al menos dos sendas dentro de un mismo árbol (Gregoire et al, 1995; Parresol, 1999).

El método RBS ofrece múltiples ventajas. Dado que la muestra se acumula de manera secuencial a lo largo de la senda, no hay necesidad de realizar una labor intensiva de pesar o medir todas las ramas que sostienen hojas y/o apilar ramas para luego ser reseleccionadas por un muestreo al azar simple. Para la estimación de la masa foliar, la mayor ventaja práctica se refiere a que sólo se necesita coleccionar el follaje de las ramas escogidas (Gregoire et al., 1995).

2.5 Relaciones alométricas

Las relaciones de escala por las cuales el rango entre los distintos aspectos del tamaño del árbol cambian según la dimensión del individuo dentro de una misma especie se conocen como relaciones alométricas (Hairiah et al., 2001). También se definen como la medición y el estudio del crecimiento o parte de un individuo en relación a un organismo completo (Parresol, 1999).

Las relaciones empíricas de biomasa, como ya ha sido mencionado, se basan en relaciones alométricas. Éstas por lo general, constan de una forma polinomial y sus parámetros pueden ser derivados directamente de datos empíricos mediante un análisis de regresión (Hairiah et al., 2001).

La ecuación es de la forma:

$$Y = aX^b$$

Las ecuaciones por lo general se utilizan en las siguientes tres formas:

Lineal (con error aditivo) $Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_j X_j + \varepsilon$ (1)

No lineal (con error aditivo) $Y = \beta_0 X_1^{\beta_1} X_2^{\beta_2} \dots X_j^{\beta_j} + \varepsilon$ (2)

No lineal (multiplicativa) $Y = \beta_0 X_1^{\beta_1} X_2^{\beta_2} \dots X_j^{\beta_j} \varepsilon$ (3)

Donde Y = biomasa total o del componente, X_j = variable de dimensión del árbol, β_j = parámetro del modelo y ε = término de error. Algunas variables de dimensión

comúnmente usadas son el DAP, D^2 , altura total, D^2H , edad, largo de copa viva, diámetro en la base de la copa viva (Parresol, 1999).

El modelo (1) produce regresiones múltiples lineales que pueden ser ajustadas mediante el procedimiento de estimación de los mínimos cuadrados. El modelo (2) produce ecuaciones de regresión no lineales que requieren el uso de procesos iterativos para la estimación de sus parámetros; para ambos modelos es necesario obtener la mínima varianza. Mientras que, para el tercer modelo, las ecuaciones usualmente son transformadas a su forma lineal a través de logaritmo natural y los parámetros así pueden ser estimados mediante el procedimiento de los mínimos cuadrados (Parresol, 1999).

2.6 Antecedentes de área foliar

Las hojas son un parámetro clave para el estudio de variados procesos fisiológicos asociados con los árboles urbanos. El índice de área foliar se encuentra altamente relacionado con la fotosíntesis, transpiración, evapotranspiración y productividad. La modelación de las tasas de crecimiento, emisiones volátiles biogénicas, cambio climático e intercambio de energía, asociado a árboles que crecen en sitios abiertos en la ciudad, requiere de estimaciones precisas de este índice (McPherson., 1998a). La forma en que los árboles interceptan polutantes y lluvias, sombreado de los edificios y enfrían el aire vía evapotranspiración depende de la magnitud del área foliar (McPherson, 1998b).

Métodos indirectos de estimación del índice incluye la utilización de relaciones alométricas. Nowak (1996) desarrolló ecuaciones alométricas para la predicción del área foliar para árboles deciduos, que crecen en espacios abiertos en ciudades, basado en el diámetro del fuste y parámetros de copa. Otros métodos indirectos incluyen fotografías aéreas y análisis de la fracción de claros, que han sido principalmente aplicados para coberturas forestales y agrícolas. El más comúnmente utilizado para especies deciduas que crecen en espacios abiertos, es el procesamiento de imágenes de video (McPherson, 1998a).

La forma más usual para la obtención del índice de área foliar se refiere a la relación de la masa foliar del árbol con el valor del área para determinada especie (Karlik y McKay, 2002). Esto se relaciona directamente con su definición donde el área foliar representa la proyección de la superficie superior de las hojas en relación a una unidad de superficie de terreno (Ibarra, 1999).

Para la estimación de la masa foliar se sugiere la utilización del diámetro al cuadrado de la sección de la cual se extrajo la muestra¹

¹ Comunicación personal Dr. Harry Valentine. *M.F.* School of Forestry and Environmental Studies, Yale University, *Ph.D.* Graduate School, Yale University, . USDA Forest Service, 11 de Diciembre 2003

3 MATERIAL Y MÉTODO

3.1 Descripción del área de estudio

La presente investigación se realizó sobre la base de la vegetación urbana de las comunas de La Reina, Providencia y Lo Barnechea. La elección de éstas se debió a la cooperación presentada por la Dirección de Aseo y Ornato de cada una de las municipalidades.

3.2 Material

3.2.1 Selección de los árboles a muestrear

La población se encontró compuesta por las diez especies más frecuentes en la ciudad de Santiago, según el inventario de vegetación urbana desarrollado en el Proyecto FONDEFF D001 1078. Las especies consideradas fueron:

Cuadro N°2: Frecuencia porcentual de presencia de especies en el casco urbano de la Ciudad de Santiago.

Especie	Frecuencia (%)
<i>Robinia pseudoacacia</i> (Falso Acacio)	11,4
<i>Prunus ceracifera</i> (Ciruelo)	8,4
<i>Acacia melanoxylon, dealbata</i> (Aromo)	3,7
<i>Acer negundo</i> (Arce)	3,2
<i>Liquidambar styraciflua</i> (Liquidámbar)	2,8
<i>Platanus x acerifolia</i> (Plátano Oriental)	2,1
<i>Schinus molle</i> (Pimiento)	1,2
<i>Ailanthus altissima</i> (Ailanto)	1,1
<i>Quillaja saponaria</i> (Quillay)	1,0
<i>Maytenus boaria</i> (Maitén)	0,2

Fuente: Informe Final Proyecto FONDEFF D001 1078.

En el inventario también se encontraba el Espino (*Acacia caven*), pero dado que existe bastante conocimiento al respecto no se incluyó en el estudio. La muestra agrupó 7 especies exóticas y 3 nativas. Imágenes de las especies se anexan (Anexo N°2).

Ésta se obtuvo de individuos que representan el potencial de crecimiento de la especie, por ende cumplan con las siguientes características:

- Baja o nula competencia.
- Copas sin poda aparente (copa completa).
- Ausencia de estrés hídrico.
- Ausencia de daño mecánico aparente.
- De buen vigor.

Con dichos criterios se seleccionó una muestra de 10 árboles por especie, distribuidos en todo el rango de clases diamétricas. El mismo tamaño de muestra ha sido utilizado en estudios similares, como el llevado a cabo por Nowak (1996) para la estimación de biomasa y área foliar de árboles urbanos de la ciudad de Chicago; además Pardé (1980) recomienda un tamaño de muestra de entre cinco a diez árboles para la estimación de biomasa de una población.

3.3 Método

El método se dividió en dos partes, la primera iba dirigida a la estimación de parámetros de árboles individuales, donde se utilizó el muestreo de ramas al azar (RBS). La segunda parte consistió en la construcción de modelos de estimación de biomasa y área foliar.

3.3.1 Estimación de parámetros para árboles individuales

3.3.1.1 Mediciones

A cada árbol se le midieron las siguientes variables:

- Diámetro a la altura del pecho (DAP) en centímetros.
- Altura total en metros.
- Altura de inicio de copa en metros.
- Diámetro de copa en metros, norte-sur, este-oeste.
- Diámetro mayor de las ramas de la sección en centímetros.

- Diámetro menor de las ramas de la sección en centímetros.
- Longitud de las ramas de la sección en metros.

Las mediciones de diámetro y longitudes en altura se realizaron utilizando un Relascopio. La altura total y de inicio de la copa se midió con una Pistola Haga, mientras que el DAP se obtuvo con una huincha.

Además se registraron las siguientes variables:

- Especie.
- Fecha.
- Dirección.
- Tipo de lugar: veredón, bandejón central, área verde u otro.
- Ancho o espacio disponible del punto anterior.
- Distancia a la calle.
- Competidor: especie, DAP, altura total, condición, estado de desarrollo. Azimut y distancia (en una distancia máxima de 10 metros).

3.3.1.2 Extracción de las muestras para la estimación de biomasa

El estudio se realizó a través de un muestreo no destructivo, debido a que se trata de árboles de ciudad, los cuales no podían ser volteados.

La obtención de las muestras se hizo mediante la construcción de dos caminos probabilísticos, para poder analizar el error estándar de la muestra. La variable de ponderación utilizada para la obtención de las probabilidades fue el diámetro de la rama al cuadrado. Dentro de cada uno de los caminos se extrajo todo el material, el cual después se separó según hojas y ramas. A su vez, las ramas fueron separadas según tamaño, ramas pequeñas con diámetro menor a 1 cm, ramas medianas que varían entre 1 cm y 4 cm, mientras que las ramas grandes calificaron con diámetros mayores a 4 cm. Además, se incluyó dentro de la muestra, en caso de encontrarse, las ramas muertas pertenecientes al camino probabilístico.

Las muestras obtenidas se guardaron en bolsas de papel y después se secaron y pesaron.

Para la estimación de la biomasa del fuste, dada la dificultad para conseguir rodajas de árboles urbanos, se utilizó la densidad obtenida de a lo menos dos citas bibliográficas de cada una de las especies, expandiéndolo después a todo el fuste mediante el volumen de este.

El volumen fue obtenido mediante la fórmula de Smalian, que considera que el volumen puede estimarse por el promedio del diámetro superior e inferior de una troza multiplicado por el largo de esta.

$$V = \frac{g_0 + g_1}{2} * L$$

donde g es el área de la sección inferior y superior en metros del trozo a calcular y L es el largo del trozo en metros.

La aplicación en terreno de este método para estimar volumen es sencilla, ya que requiere de sólo tres mediciones para realizar la estimación. Sin embargo, dado que este método considera al árbol como un individuo cilíndrico produce sesgos para las especies que no presentan esta forma, los errores que se producen no superan al 8% si la longitud de cubicación no supera los 5 metros (Brack et al; 1998).

3.3.1.3 Obtención de pesos secos

Todas las muestras de rodajas, ramas y hojas fueron sometidas a un proceso de secado en un horno de aire forzado a una temperatura de 75°C, por aproximadamente 62 horas o hasta la obtención de pesos constantes.

Para cada uno de los árboles se estimó la biomasa por componente y total mediante el procedimiento probabilístico (RBS) ya antes mencionado; usando factores de expansión.

El peso seco total se obtuvo por la suma de los pesos de los componentes de fuste y copa.

3.3.1.4 Estimación del área foliar

Para la estimación del área foliar, se utilizó una submuestra de 50 hojas obtenidas de el árbol dividido en tres secciones². El tamaño muestral consideró cinco árboles por especie. Las muestras se colectaron durante fines de Febrero y principios de Marzo.

El área foliar fue obtenida a partir de las mediciones de biomasa de cada una de las hojas, las cuales se transformaron a través de un coeficiente, que relaciona el peso con la superficie foliar. La superficie foliar se calculó utilizando un escáner, con una resolución de 300 dpi y escala binaria (blanco/negro), calculando la proporción de niveles que pertenecen a las hojas dentro del área total de la imagen. Las muestras fueron obtenidas para cada especie y de árboles en distintas clases diamétricas y altura en el árbol (Bown, 1992).

² Comunicación personal Dr. Harry Valentine. *M.F.* School of Forestry and Environmental Studies, Yale University, *Ph.D.* Graduate School, Yale University, . USDA Forest Service, 11 de Diciembre 2003

3.3.2 Construcción de modelos de estimación de biomasa y área foliar

3.3.2.1 Ajuste de ecuaciones de biomasa

Para cada una de las especies se ajustaron las siguientes ecuaciones de biomasa mediante el método de los mínimos cuadrados:

- Modelo 1: $B_t = a * DAP^b$
- Modelo 2: $B_t = e^a + DAP * e^b$
- Modelo 3: $B_t = a + b * DAP^2 * H_t$
- Modelo 4: $B_t = a + b * \frac{(\pi * DAP^2)}{4}$
- Modelo 5: $B_t = a * H_t^b$

La selección del modelo se realizó en base a criterios estadísticos. Uno de éstos fue el análisis de los errores de la variable dependiente e independiente, considerando el coeficiente de correlación, la bondad de ajuste y el error cuadrático medio. Mientras que el análisis de los residuos, consideró la suma de residuos, su media y desviación, más la suma de los residuos normalizados.

3.3.2.2 Ajuste de ecuaciones de área foliar

Se obtuvieron las áreas y pesos foliares para las muestras de las 10 especies. Con ellas se calculó un coeficiente que transforma el peso foliar en metros cuadrados que representan la superficie.

4 PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Modelos de Biomasa por componente

A continuación, se exponen los modelos de biomasa desarrollados, agrupados por componente y por especie, los cuales se adjuntan con sus estadísticas respectivas.

4.1.1 Biomasa Total

Se presentan los distintos modelos ajustados para la biomasa total de las diez especies de árboles consideradas dentro del estudio. La validación de los modelos es anexada, mediante su comparación con los datos reales y con referencias bibliográficas.

Cuadro N°3: Ecuaciones de Biomasa Total para las 10 especies.

Especie	Modelo	R	R ²	EMC	$\sum e_i$	$\sum e_i^2$	σ_{e_i}	\bar{X}_{e_i}
Ailanto	$B_t = 31,1769 + 0,0209 * DAP^2 * H_t$	0,89	0,79	10372	-2E-6	82982	96,2	-2E-7
Arce	$B_t = 18,7431 + 0,0108 * DAP^2 * H_t$	0,98	0,96	157,64	0	1261,1	11,8	0
Aromo	$B_t = 0,7994 * DAP^{1,5878}$	0,72	0,52	6439,7	-23,5	51518	75,6	-2,3
Ciruelo	$B_t = 34,4638 + 0,0125 * DAP^2 * H_t$	0,97	0,95	395,1	-1E-6	3160,8	18,7	-1E-7
Falso Acacio	$B_t = 70,7126 + 0,0134 * DAP^2 * H_t$	0,96	0,93	3763,9	3E-6	30111	57,8	3E-7
Liquidámbar	$B_t = 0,4661 * DAP^{1,5322}$	0,94	0,88	62,13	-4,05	497,06	7,4	-0,40
Maitén	$B_t = 1,2572 * DAP^{1,2439}$	0,88	0,78	48,22	-0,60	385,7	6,5	-0,06
Plátano Oriental	$B_t = -5,0344 + 0,2710 * \frac{(\pi * DAP^2)}{4}$	0,98	0,97	6729,9	8E-6	53839	77,3	8E-7
Pimiento	$B_t = 20,1943 + 0,0133 * DAP^2 * H_t$	0,81	0,65	1029,4	-7E-7	8235,4	30,4	-7E-8
Quillay	$B_t = 0,01804 * DAP^{2,7578}$	0,93	0,86	195,51	16,61	1564,09	13,06	1,66

B_t : Biomasa Fustal; DAP: Diámetro a la altura del pecho (1,3 m.); H_t : Altura Total, R: Coeficiente de correlación, R²: Bondad de ajuste, EMC: Error medio cuadrático, $\sum e_i$: Sumatoria de los errores, $\sum e_i^2$: Sumatoria de los errores al cuadrado, σ_{e_i} : Desviación estándar de los errores, \bar{X}_{e_i} : Promedio de los errores.

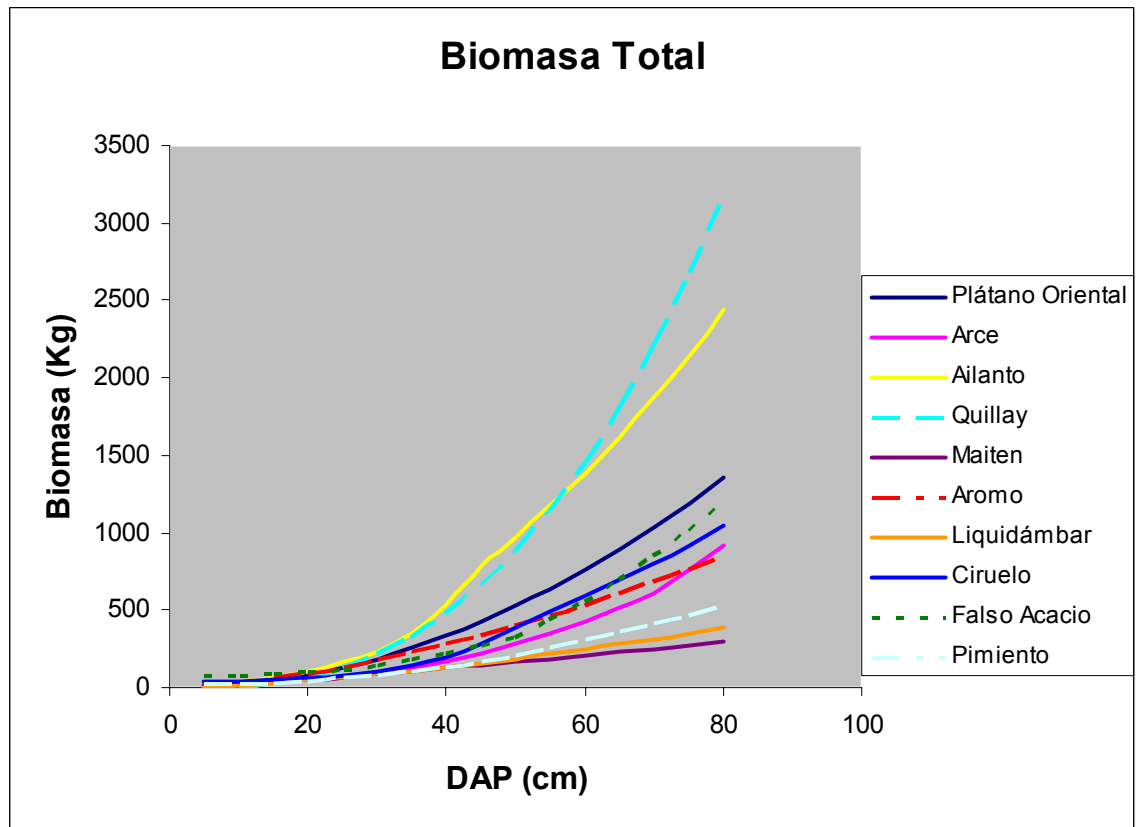


Figura N°3: Gráfico de modelos de biomasa total.

Los modelos presentan un alto poder de predicción, donde las estimaciones no varían significativamente ($p < 0,001$) de los datos reales. A su vez, los valores predichos se concentran dentro del rango de biomasa esperado para la especie (Apéndice). La variable predictiva predominante dentro de los modelos es el DAP, siendo en algunos casos acompañado por la altura total. Esta estructura matemática tiene la ventaja de la simpleza dada por la fácil medición del o los parámetros estimadores.

Estadísticamente, los residuos presentan una distribución que tiende a la normal, lo que implica que su esperanza es cercana a cero, por ende los errores de estimación serán menores.

Cabe destacar que los modelos producen sobrestimaciones para los DAP menores a diez centímetros en las especies de Arce, Falso Acacio y Ailanto, lo que se puede deber a la forma de crecimiento de estos individuos, la cual en sus primeros años comienza con

un aumento en la altura para después continuar con un crecimiento en diámetro, reduciendo así el valor de la biomasa real.

4.1.2 Biomasa Fustal

Se presentan los modelos por especie, para el componente fustal; los que van acompañados de sus estadísticas respectivas.

Cuadro N°4: Ecuaciones de Biomasa Fustal para las 10 especies.

Especie	Modelo	R	R ²	EMC	$\sum e_i$	$\sum e_i^2$	σ_{e_i}	\bar{X}_{e_i}
Ailanto	$B_f = 13,2677 + 0,0188 * DAP^2 * H_t$	0,86	0,79	10806	10E-6	86451	98,01	1E-7
Arce	$B_f = 7,7720 + 0,01004 * DAP^2 * H_t$	0,99	0,98	157,64	0	495,19	11,83	0
Aromo	$B_f = 0,7029 * DAP^{1,4529}$	0,66	0,43	2360,7	-9,67	18886	45,79	-0,96
Ciruelo	$B_f = 0,8164 * DAP^{1,2812}$	0,93	0,87	111,08	-7,11	888,7	9,9	-0,71
Falso Acacio	$B_f = 0,0092 * DAP^{2,2607}$	0,98	0,97	533,33	36,85	4268,2	21,42	3,68
Liquidámbar	$B_f = 1,0153 + 0,1083 * \frac{(\pi * DAP^2)}{4}$	0,99	0,98	5,17	-6E-8	41,39	2,14	-6E-9
Maitén	$B_f = 0,4003 * DAP^{1,5788}$	0,97	0,94	10,44	-1,74	83,56	3,04	-0,17
Plátano Oriental	$B_f = -38,4173 + 0,2521 * \frac{(\pi * DAP^2)}{4}$	0,99	0,98	3600	3E-6	28801	56,56	3E-7
Pimiento	$B_f = 13,3411 + 0,0087 * DAP^2 * H_t$	0,75	0,56	647,02	-9E-7	5212,4	24,06	-9E-8
Quillay	$B_f = 0,5235 + 0,0159 * DAP^2 * H_t$	0,96	0,93	23,86	1E-7	190,89	4,6	1E-8

B_f: Biomasa Fustal; DAP: Diámetro a la altura del pecho (1,3 m.); H_t: Altura Total

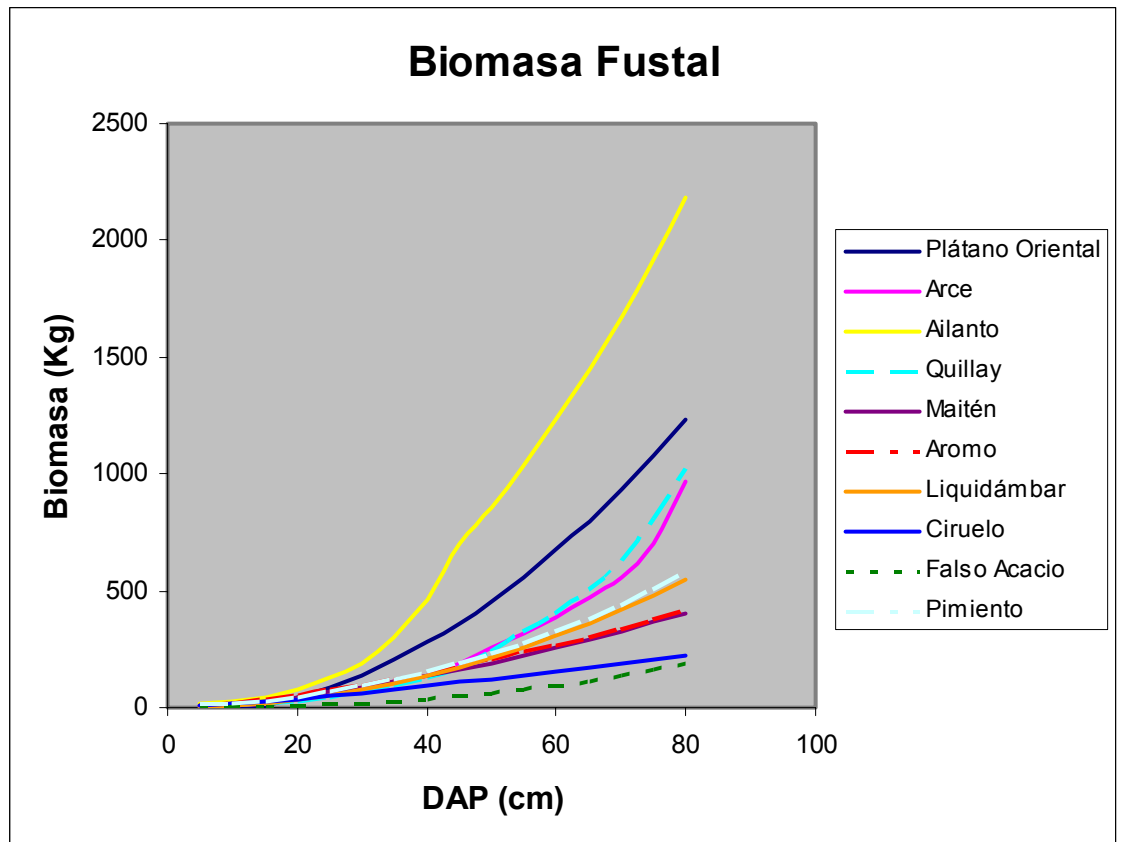


Figura N°4: Gráfico de modelos de biomasa fustal.

Los modelos de estimación de biomasa fustal presentan un buen poder de predicción, donde el valor promedio y la suma de los residuos tienden a cero, mientras que su distribución hacia la normalidad. Al referirse a los modelos en sí, se puede observar que la predominancia del DAP como variable predictiva se mantiene.

Los valores residuales del Falso Acacio son mayores, por ende la calidad de predicción del modelo disminuye para la especie. Esto se puede deber a que uno de los árboles se desvía del promedio de la muestra, pudiendo ser mejorado con un aumento del tamaño muestral.

4.1.3 Biomasa Ramas

A continuación, se exponen las ecuaciones ajustadas para el componente ramas, que agrupan las de tamaño grande, mediano y pequeño.

Cuadro N°5: Ecuaciones de Biomasa Ramas para las 10 especies.

Especie	Modelo	R	R ²	EMC	$\sum e_i$	$\sum e_i^2$	σ_{e_i}	\bar{X}_{e_i}
Ailanto	$B_{rg} = 1,6274E^{-05} * DAP^{4,0576}$	0,80	0,65	369,4	22,46	2955,6	16,34	2,24
	$B_{rm} = 1,2814E^{-07} * DAP^{5,2073}$	0,93	0,87	41,46	2,31	331,75	6,01	0,23
	$B_{rp} = 0,0363 * DAP^{1,4081}$	0,63	0,40	8,25	-0,73	66,06	2,79	-0,07
Arce	$B_{rg} = 0,0361 * DAP^{2,0144}$	0,58	0,34	742,68	-3,55	5941,44	25,69	-0,3
	$B_{rm} = 0,0383 * DAP^{1,6885}$	0,43	0,18	176,41	-3,23	1411	12,51	-0,3
	$B_{rp} = 1,2298 + 0,0014 * \frac{(\pi * DAP^2)}{4}$	0,37	0,14	3,26	-1E-7	26,14	1,70	-1E-8
Aromo	$B_{rg} = -1,7769 + 0,0504 * \frac{(\pi * DAP^2)}{4}$	0,58	0,34	741,80	-1E-6	5934,45	25,67	-1E-7
	$B_{rm} = 0,0383 * DAP^{1,6885}$	0,43	0,18	176,41	-3,23	1411	12,51	-0,3
	$B_{rp} = 0,2053 * DAP^{1,0453}$	0,37	0,14	39,71	-0,97	317,6	5,94	-0,09
Ciruelo	$B_{rg} = 0,1221 * H_t^{2,6835}$	0,98	0,96	65,81	6,95	526,48	7,61	0,69
	$B_{rm} = 2,4049 + 0,0013 * DAP^2 * H_t$	0,93	0,88	14,96	3E-7	119,73	3,64	37E-8
	$B_{rp} = 0,0589 * H_t^{2,5837}$	0,96	0,92	18,90	2,57	151,2	4,09	0,25
Falso Acacio	$B_{rg} = 1,3110 * DAP^{1,6897}$	0,74	0,54	938,78	24,21	7510,2	28,77	2,43
	$B_{rm} = 2884717 * H_t^{-8,449}$	0,56	0,31	51,57	9,01	412,62	6,7	0,9
	$B_{rp} = 0,0343 * H_t^{2,8164}$	0,93	0,87	938,78	24,21	7510	28,7	2,42
Liquidámbar	$B_{rg} = 3,21E - 05 * H_t^{5,4515}$	0,65	0,42	23,49	3,66	187,98	4,55	0,36
	$B_{rm} = 0,0001 * H_t^{4,2916}$	0,66	0,44	1,09	1,09	8,79	0,98	0,1
	$B_{rp} = 0,0023 * H_t^{2,7520}$	0,65	0,42	0,34	0,35	2,74	0,55	0,03

Especie	Modelo	R	R ²	EMC	$\sum e_i$	$\sum e_i^2$	σ_{e_i}	\bar{X}_{e_i}
Maitén	$B_{rg} = 0,0364 * H_t^{2,7279}$	0,28	0,08	6,3	-0,06	50,4	2,36	-0,006
	$B_{rm} = 0,0202 * H_t^{2,8123}$	0,31	0,09	1,96	0,03	15,74	1,32	0,003
	$B_{rp} = 3,9369 * DAP^{-0,6095}$	0,19	0,03	0,75	-0,007	6,06	0,82	-0,0007
Plátano Oriental	$B_{rg} = 0,5875 * DAP^{1,0699}$	0,62	0,39	572,74	-5,3	4581,9	22,55	-0,53
	$B_{rm} = 0,2479 * DAP^{1,06}$	0,78	0,61	39,54	-2,48	316,34	5,92	-0,24
	$B_{rp} = 0,3892 * DAP^{0,8275}$	0,5	0,25	46,05	-1,03	368,4	6,39	-0,1
Pimiento	$B_{rg} = 0,03005 * DAP^{1,7991}$	0,89	0,80	18,36	-0,62	146,92	4,03	-0,06
	$B_{rm} = 0,0935 * DAP^{1,2221}$	0,78	0,61	4,83	-0,42	38,67	2,07	-0,04
	$B_{rp} = 0,2794 * DAP^{0,9339}$	0,66	0,44	8,31	-0,74	66,49	2,72	-0,07
Quillay	$B_{rg} = 5,862E - 05 * DAP^{4,1071}$	0,86	0,74	19,48	7,09	155,89	4,09	0,709
	$B_{rm} = 2,051E - 05 * DAP^{4,2365}$	0,82	0,67	7,55	3,91	60,41	2,55	0,39
	$B_{rp} = 0,001 * DAP^{2,7410}$	0,80	0,65	2,06	1,56	16,51	1,34	0,15

B_i: Biomasa Ramas Grandes, medianas o pequeñas; DAP: Diámetro a la altura del pecho (1,3 m.);
H_t: Altura Total

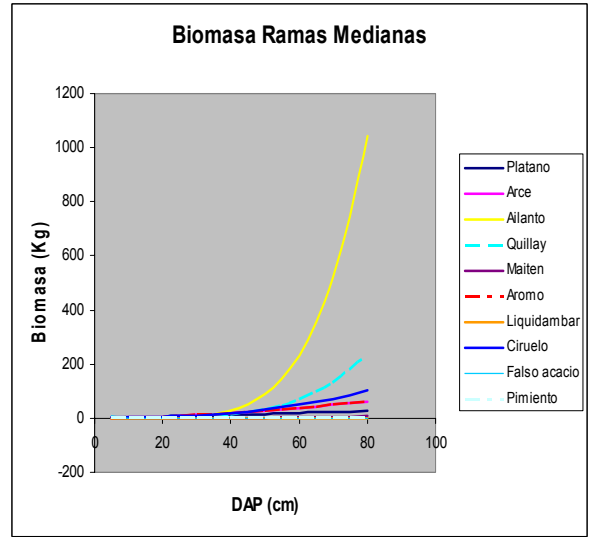
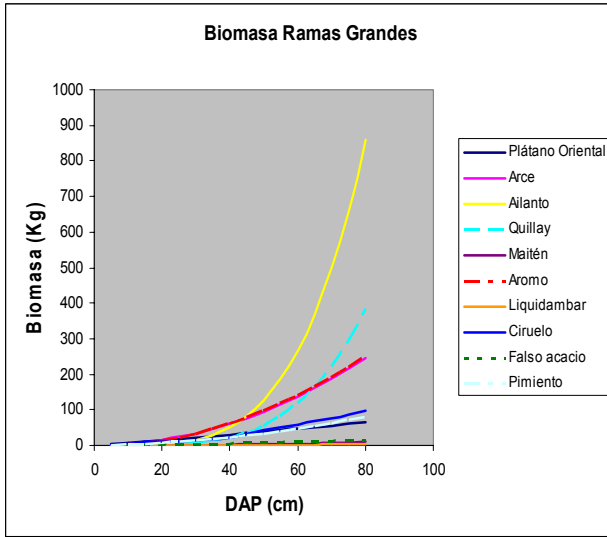


Figura N°5: Gráfico de modelos de biomasa de ramas grandes.

Figura N°6: Gráfico de modelos de biomasa de ramas medianas.

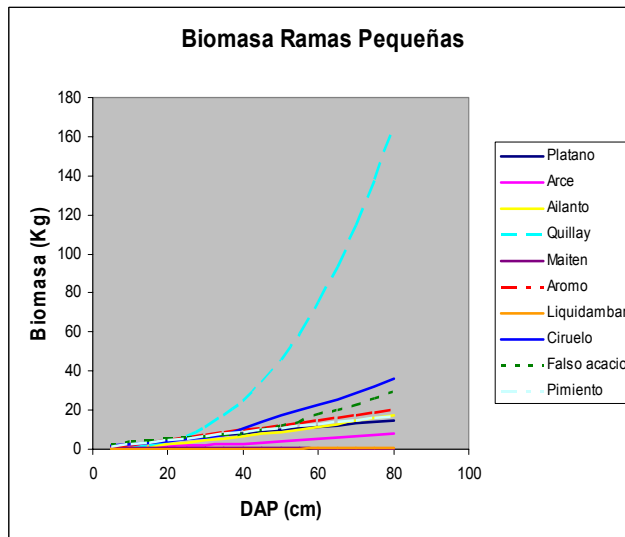


Figura N°7: Gráfico de modelos de biomasa de ramas pequeñas.

Los modelos generan estimaciones confiables de la biomasa de ramas grandes, por ende presentan un buen poder de predicción, donde los datos predichos se encuentran cercanos al valor observado ($p < 0,001$). Los residuos, igual que para los componentes anteriores, presentan una distribución que tiende a la normal, mientras que la media de éstos tiende a cero, independiente de presentar un leve aumento de la cifra con respecto a los ajustes anteriores; por ende se trata de modelos insesgados.

De las ecuaciones, cabe notar que la participación de la altura como variable predictiva aumenta, explicando de mejor forma la biomasa de las ramas grandes para especies como Ciruelo, Liquidámbar y Maitén; sin embargo se mantiene el DAP como variable principal en el resto de las especies.

El caso especial se produce al observar el comportamiento del Maitén, para el cual el nivel de predicción confiable ($\alpha = 0,05$) disminuye considerablemente. Las causas de este suceso pueden asociarse a la arquitectura de la especie, donde la posibilidad de encontrar muestras de ramas grandes, según el criterio utilizado, es menor, dado por la homogeneidad de la copa en términos de ramas. Por ende, sería de consideración, para mejorar el ajuste, el aumento de las sendas muestrales al doble o triple o bien simplemente considerar otro tipo de muestreo para la especie.

Los modelos de biomasa de ramas medianas mantienen una estructura similar a los casos anteriores, conservando parámetros de fácil medición como variable predictiva. Los residuos continúan mostrando una tendencia normal y bordeando su valor promedio en torno a cero.

A medida que la arquitectura de las especies presenta una copa más homogénea, en términos de sus ramas, la predicción confiable de los datos disminuye, como ocurre con el Arce, Aromo, Maitén y Falso Acacio. Es así, como al igual que las ramas grandes sería recomendable aumentar el número de las sendas muestrales dentro del árbol. Sin embargo, dada la baja participación de este componente en el total de la biomasa su significancia sería menor.

Para los modelos de ramas pequeñas los residuos continúan mostrando una distribución normal y con una tendencia a cero, en términos promedio, por ende los modelos no generan sesgos significativos ($p < 0,001$).

Estos siguen la misma tendencia anterior, es decir, la mayoría incluye el DAP como variable predictiva de la biomasa, mientras que un menor porcentaje requiere de la altura total para hacer la estimación respectiva.

Al igual que para el componente anterior, los modelos con menor poder de predicción se mantienen para las mismas especies, Arce, Aromo y Maitén. Sin embargo, mejora considerablemente para el Falso Acacio; donde la definición de las ramas pequeñas es mayor.

4.1.4 Biomasa Foliar

Finalmente, se exponen los modelos obtenidos para el caso de la biomasa foliar.

Cuadro N°6: Ecuaciones de Biomasa Foliar para las 10 especies.

Especie	Modelo	R	R ²	EMC	$\sum e_i$	$\sum e_i^2$	σ_{e_i}	\bar{X}_{e_i}
Ailanto	$B_{fol} = 0,0007 * DAP^{2,6478}$	0,78	0,61	15,89	2,21	127,15	3,75	0,22
Arce	$B_{fol} = 0,0023 * H_t^{3,6976}$	0,87	0,77	3,55	3,43	28,44	1,74	0,3
Aromo	$B_{fol} = 0,0867 * H_t^{1,6666}$	0,39	0,15	970,44	-6,75	7763,5	29,3	-0,67
Ciruelo	$B_{fol} = 2,1040 + 0,0009 * DAP^2 * H_t$	0,94	0,90	14,96	3E-7	50,26	3,64	3E-8
Falso Acacio	$B_{fol} = 0,0582 * H_t^{2,6808}$	0,92	0,84	51,57	9,01	890,86	6,7	0,9
Liquidámbar	$B_{fol} = 0,0164 * H_t^{2,1705}$	0,68	0,47	0,83	0,34	6,65	0,85	0,03
Maitén	$B_{fol} = 0,0195 * H_t^{3,1089}$	0,34	0,11	4,81	0,0133	38,54	2,06	0,001
Plátano Oriental	$B_{fol} = 0,3218 * DAP^{0,9563}$	0,56	0,31	383,23	-1,96	665,86	8,59	-0,19
Pimiento	$B_{fol} = 0,1577 + 0,004 * DAP^2 * H_t$	0,89	0,80	0,94	1E-7	7,54	0,92	1E-8
Quillay	$B_{fol} = 0,0028 * DAP^{2,6821}$	0,77	0,60	10,63	5,44	85,10	3,02	0,54

B_f: Biomasa Foliar; DAP: Diámetro a la altura del pecho (1,3 m.); H_t: Altura Total

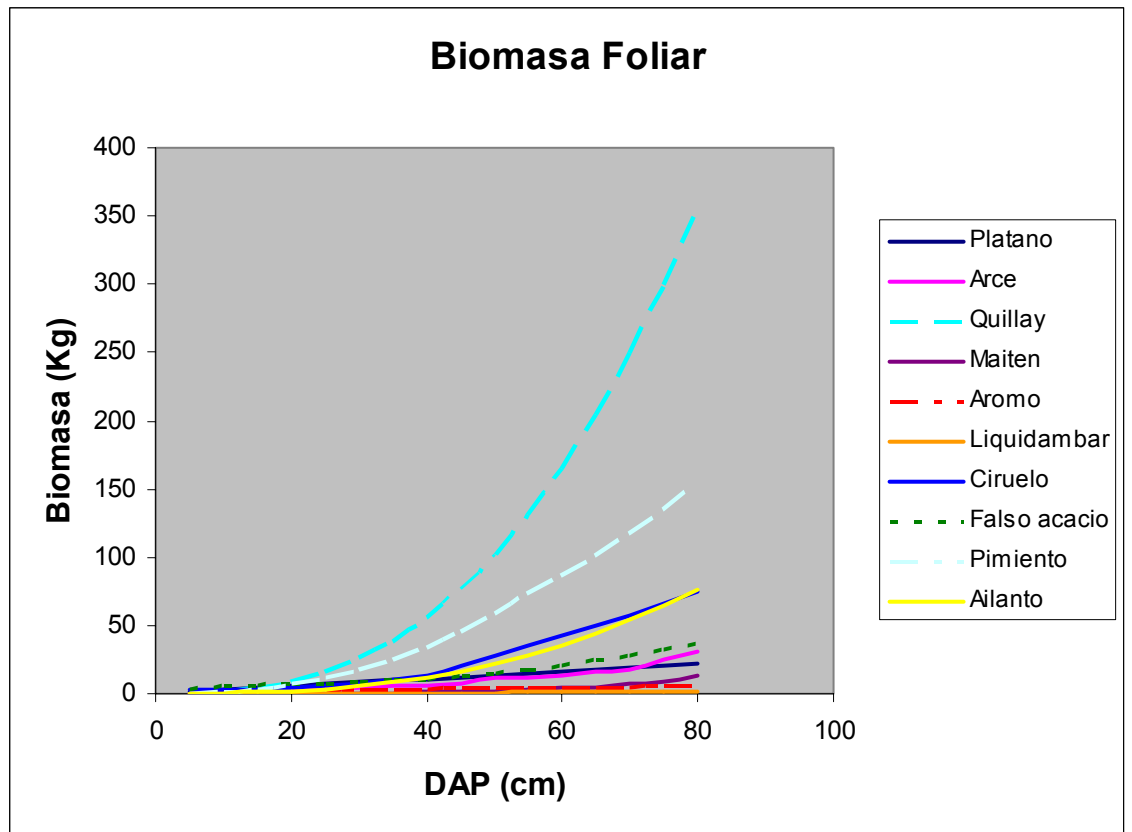


Figura N°8: Gráfico de modelos de biomasa foliar.

Al observar los modelos se puede deducir que la relación biomasa foliar/altura total es alta, generando así datos más cercanos a la realidad que al utilizar la variable DAP para explicar el peso foliar. En cuanto a los residuos, estos mantiene una distribución normal, en promedio los valores se mantienen menores al kilogramo, aunque mayores que para los componentes anteriores.

En general, existe una alta correlación entre las variables, a excepción del Aromo y Maitén, lo que podría estar siendo causado por, en primer lugar el tamaño de las hojas y en segundo lugar, la distribución de éstas en el árbol.

4.2 Modelo de Biomasa Genérica

De forma general, se procedió a realizar el ajuste de las ecuaciones de biomasa de los distintos componentes para el conjunto de las especies consideradas.

Cuadro N°7: Ecuaciones de Biomasa genérica para todas las especies consideradas.

Biomasa	Modelo	R	R ²	EMC	$\sum e_i$	$\sum e_i^2$	σ_{e_i}	\bar{X}_{e_i}
Total	$B_t = -1,3638 + 0,2343 * \frac{(\pi * DAP^2)}{4}$	0,92	0,85	6484,4	-2E-5	635477	80,1	-2E-7
Fustal	$B_f = 34,8949 + 0,0077 * DAP^2 * H_t$	0,91	0,84	5199,2	-1E-5	509527	71,7	-1E-7
Ramas Grandes	$B_{rg} = 0,2506 * DAP^{1,3315}$	0,62	0,38	446,13	-278	43721,2	21,2	-2,78
Ramas Medianas	$B_{rm} = 0,1367 * DAP^{1,2061}$	0,55	0,31	62,52	-267	6127,7	7,8	-0,67
Ramas Pequeñas	$B_{rp} = 0,0663 * DAP^{1,3554}$	0,51	0,26	65,95	-77,4	6462,6	8,1	-0,77
Foliar	$B_{fol} = 0,0164 * H_t^{2,1705}$	0,68	0,47	0,83	0,34	6,6	0,8	0,03

B_t: Biomasa Total o según componente; DAP: Diámetro a la altura del pecho (1,3 m.); H_t: Altura Total.

Las ecuaciones de biomasa ajustadas para todas las especies, en general, generan buenos resultados, donde la bondad de ajuste se encuentra sobre el 26% y el coeficiente de correlación sobre 0,5. Los residuos presentan una distribución normal, con una tendencia promedio al cero. Los valores mayores se concentran para las ramas grandes, seguramente debido a la diferencia de los datos para este componente dentro de las distintas especies.

Los modelos, en su mayoría, están basados en el DAP como variable predictiva. Sin embargo, para la biomasa foliar la variable que más explica el comportamiento del peso de las hojas es la altura total del árbol.

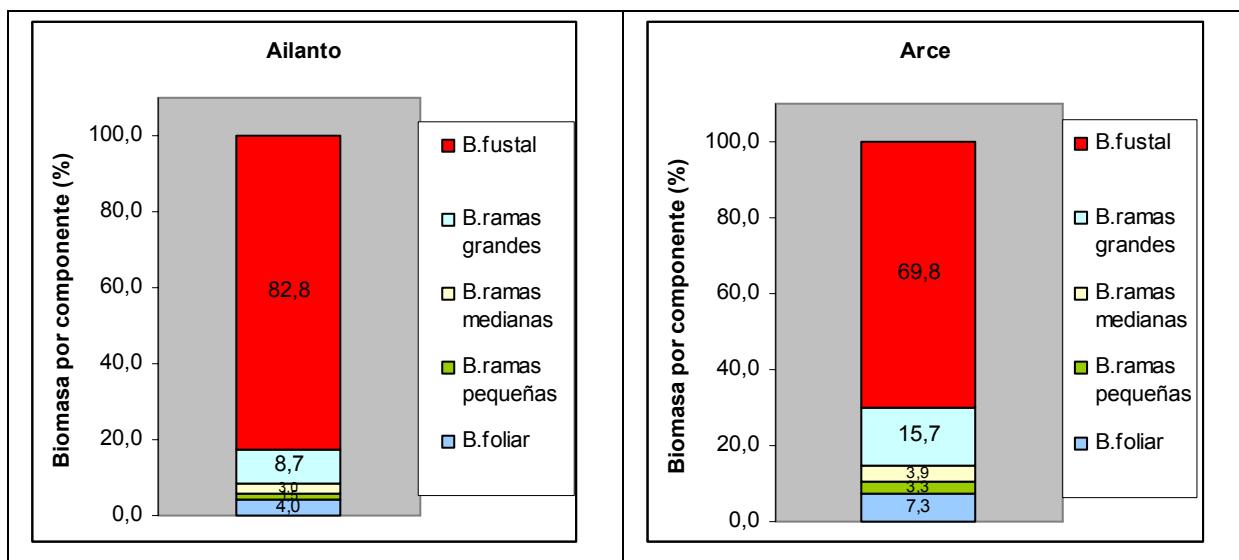
Las diferencias que se producen con los modelos individuales construidos para cada especie, derivados del análisis de sus respectivos residuos, es más significativo, siendo por lo general menores dentro las ecuaciones que consideran las especies por separado, a excepción de las ramas medianas del Plátano Oriental y de las ramas grandes del Ailanto y Quillay. Por ende se producen valores más precisos que al utilizar el modelo general (ver apéndice).

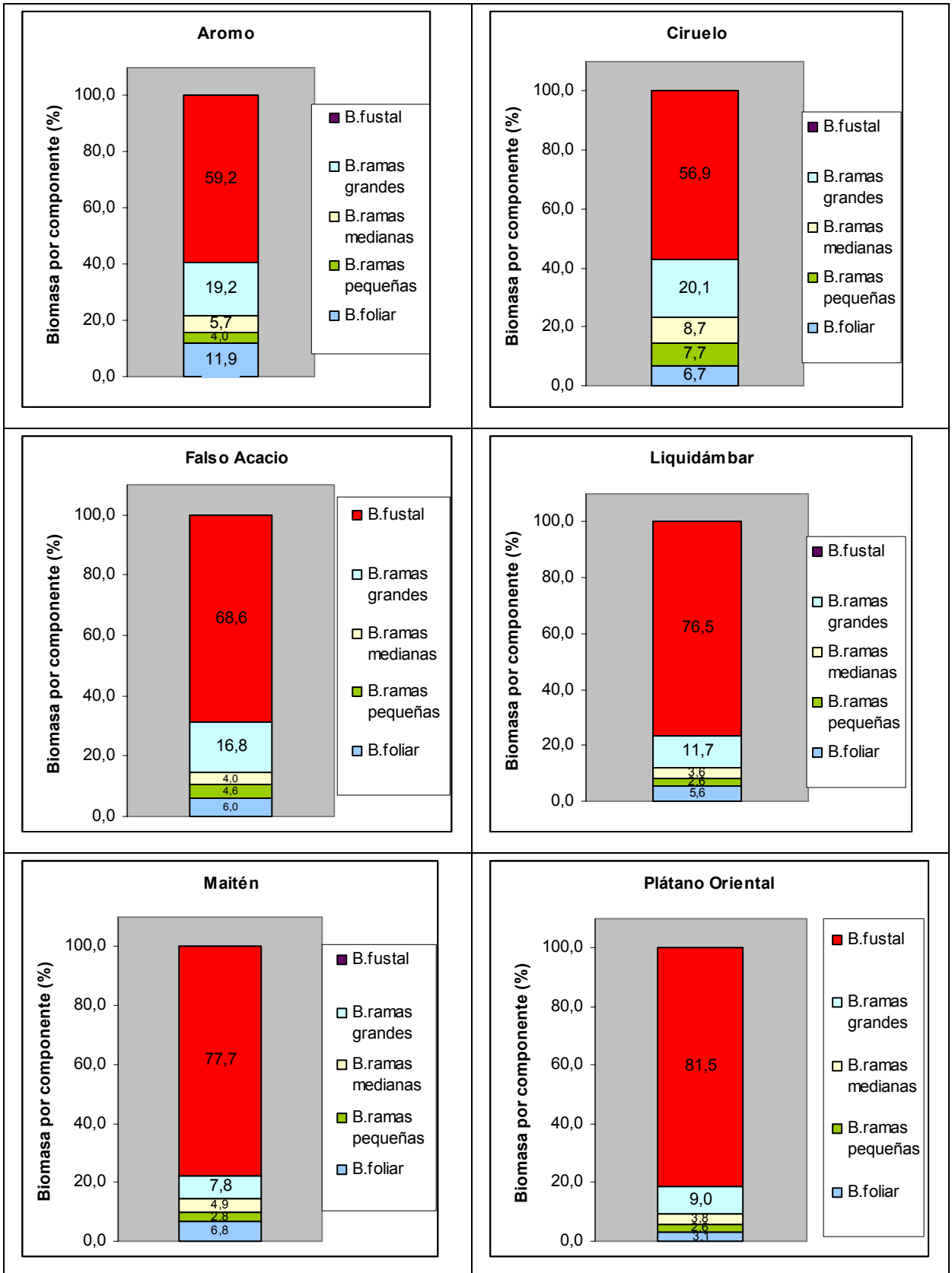
4.3 Distribución de los componentes de biomasa por especie

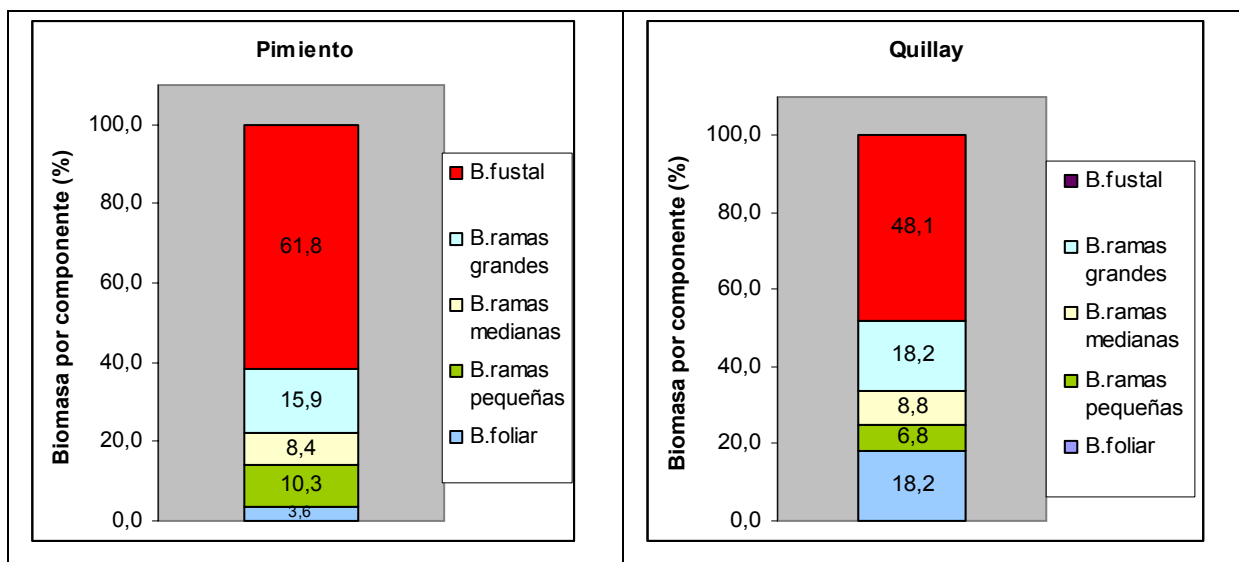
La proporción de los distintos componentes de la biomasa arbórea en general sigue la misma tendencia. Las distribuciones promedios están dadas por una participación aproximada del 7% para biomasa foliar, 5% para ramas pequeñas, 5% para ramas medianas, 14% para ramas grandes y finalmente un 68% para la biomasa fustal.

A continuación, se observa la gráfica correspondiente al porcentaje de participación de los distintos componentes en la biomasa total para las 10 especies arbóreas.

Cuadro N°8: Distribución gráfica de componentes de biomasa por especie.







El componente principal del Ailanto es la biomasa fustal, con un aporte mayor al 80%, luego en una bastante menor proporción se observa la biomasa de ramas grandes y biomasa foliar.

Para el Arce, la participación de la biomasa fustal continúa siendo más de la mitad del total, sin embargo existe un aumento en la participación de la biomasa de las ramas grandes en comparación con la especie anterior.

El Aromo es una de las especies que presenta menor participación de la biomasa fustal dentro del total, sin embargo se mantiene sobre el 50%. A su vez ésta, por así decirlo pérdida de biomasa fustal, es traspasada mayormente a la biomasa de ramas grandes y foliar.

El Ciruelo presenta un comportamiento muy similar al Aromo, con la misma proporción de los distintos componentes dentro de la biomasa total, con la diferencia que la biomasa de las ramas pequeñas y medianas aumenta considerablemente su participación, aproximándose más a la biomasa foliar.

El Falso Acacio también mantiene la tendencia general, sin embargo, se produce un aumento en la participación de las ramas grandes y una disminución de la biomasa foliar.

Dentro del Liquidámbur la biomasa fustal se presenta como el principal componente, seguido por las ramas grandes, mientras que el resto de las ramas presenta una mínima participación dentro de la biomasa del árbol.

La tendencia del Maitén es similar a la de la especie anterior, pero con una disminución de la participación de las ramas grandes del total del árbol.

La biomasa del Plátano Oriental está distribuida de manera similar a lo que en general sucede, la diferencia es que el aporte de biomasa foliar se encuentra por debajo de dos de los tres tipos de ramas.

Al observar el Pimiento, cabe destacar que el aporte de la biomasa foliar es mínimo, respecto al resto de los componentes; además la proporción entre los tres tipos de ramas se encuentra casi igualado.

El Quillay es la que presenta el comportamiento más distinto, ya que disminuye por bajo el 50% el aporte de biomasa fustal dentro del total. Se produce un aumento considerable en la participación de las ramas grandes y la biomasa foliar. En el caso de las ramas pequeñas y medianas su aporte aumenta, pero ambas registran una proporción similar.

4.4 Modelos de Área Foliar

Para la construcción de los modelos de área foliar se probaron los mismos modelos seleccionados para la biomasa. Se compararon los datos bibliográficos contra los valores predichos por cinco modelos de biomasa escogidos, seleccionado el que genera el menor error.

Los modelos seleccionados son los siguientes:

Cuadro N°9: Modelos de Área Foliar para las 10 especies.

Especie	Modelo	
Ailanto	2	$AF = 17,8 * e^{-27,0249} + 17,8 * DAP * e^{-1,4109}$
Arce	2	$AF = 13,16 * e^{-27,1760} + 13,16 * DAP * e^{-1,6832}$
Aromo	4	$AF = 2,9448 + 0,1853 * \frac{\pi}{4} * DAP^2$
Ciruelo	3	$AF = 24,63 + 0,0105 * DAP^2 * H_t$
Falso Acacio	3	$AF = 1,335 + 0,0103 * DAP^2 * H_t$
Liquidámbar	3	$AF = 18,305 + 0,0241 * DAP^2 * H_t$
Maitén	2	$AF = 6,26 * e^{-0,6769} + 6,26 * DAP * e^{-1,9775}$
Pimiento		Ningún modelo se ajustó bien a los datos referenciales
Plátano Oriental	4	$AF = 132,87 + 0,063 * \frac{\pi}{4} * DAP^2$
Quillay	1	$AF = 0,0337 * DAP^{2,6821}$

AF: Área Foliar; DAP: Diámetro a la altura del pecho; H_t: Altura Total.

En general, los modelos ajustados usan el DAP como la principal variable predictiva y en algunos casos es acompañado por la altura total; esto se debe a que el área foliar se encuentra positivamente relacionado con el crecimiento, al igual que el diámetro.

Las estimaciones generadas fueron validadas usando referencias bibliográficas extraídas de datos utilizados dentro del marco del Proyecto Fondef D00I 1078 “Desarrollo de un sistema de la vegetación urbana con fines de descontaminación atmosférica y de apoyo a la toma de decisiones a nivel municipal”, desarrollado por la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Chile (Apéndice).

Al observar el Cuadro N°11 se puede ver que las estadísticas de bondad de ajuste y coeficiente de correlación presentan un nivel de correlación lineal menor que para las ecuaciones de biomasa. Sin embargo, los residuos permanecen en promedio cercanos al cero y su distribución mantiene una tendencia normal. Nótese que todos los resultados obtenidos de las ecuaciones producen valores cercanos a los datos referenciales a excepción del Pimiento, en donde los valores predichos varían considerablemente del dato bibliográfico para la especie. Esto podría deberse a que la información bibliográfica no es específica de la especie, sino que del género o debido a que el muestreo requiere la recolección de un tamaño mayor de hojas.

Cuadro N°10: Estadísticas de Modelos de Área Foliar para las 10 especies

Especie	R	R ²	EMC	$\sum e_i$	$\sum e_i^2$	σ_{e_i}	\bar{X}_{e_i}
Ailanto	0,65	0,43	23,51	-5,69	188,11	4,53	-0,56
Arce	0,68	0,47	8,17	-2,18	65,4	2,68	-0,21
Aromo	0,38	0,14	975,59	2E-6	7804,7	29,4	2E-7
Ciruelo	0,94	0,90	6,28	-9E-9	50,26	2,36	-9E-10
Falso Acacio	0,86	0,74	188,6	6E-7	1509,3	12,9	6E-8
Liquidámbar	0,29	0,08	1,44	1E-7	11,53	1,13	1E-8
Maitén	0,25	0,06	5,10	1E-7	40,86	2,13	1E-8
Plátano Oriental	0,50	0,25	90,29	-6E-7	722,33	8,95	-6E-8
Pimiento	No se ajustan los modelos						
Quillay	0,77	0,60	10,63	5,44	85,10	3,02	0,54

5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los modelos obtenidos tanto para biomasa como para el área foliar, tienen un buen poder de predicción, generando valores cercanos a los observados, así como también valores dentro del rango esperado para la especie. Por lo tanto, el comportamiento de estas especies se presentaría de forma similar a lo observado en otras ciudades del mundo donde se han realizado estudios del mismo tipo (ver apéndice).

Gran parte de las ecuaciones usan como variable independiente a una característica de medición simple y rápida, como DAP y altura total, por lo que no se requeriría de personal altamente calificado para ponerlas en práctica. Dado que la alometría se relaciona con el estudio de las partes de una planta vs la totalidad de esta, se generan relaciones entre distintas variables del árbol como DAP, altura total, biomasa total, biomasa foliar, entre otras. Por lo que se puede calcular la biomasa sobre el suelo como una función del DAP o la altura total del árbol, es decir se asume que existe una relación directa entre la biomasa y estos parámetros del árbol (Forbush and Richardson, 1998).

A su vez, la posibilidad de contar con ecuaciones genéricas, no específica para la biomasa total y por componente de una especie, permitiría su aplicación al resto de las especies no incluidas en el estudio obteniendo resultados confiables ($R > 0,5$). Esto sustenta la hipótesis de reglas alométricas no especie-específica para la biomasa, donde las diferencias entre especies no están dadas por el valor de ésta, sino por como se distribuye dicha biomasa en la totalidad del árbol, es decir su arquitectura. Witting (1995) menciona que las alometrías interespecíficas pueden ser más fundamentales que las alometrías intraespecíficas y que estas pueden existir independientes una de la otra.

Los modelos de biomasa producen una leve sobrestimación en los árboles más pequeños de especies donde su crecimiento parte con un aumento en altura mayor que su crecimiento en diámetro, como es el caso del ailanto, arce y falso acacio. A modo de ilustración el ailanto proveniente de semillas el primer año crece en altura 1 a 2 m, mientras que el proveniente de tallos logra alturas de 3 a 4 m (USDA Forest Service,

2004). También, el falso acacio durante su primer año puede alcanzar una altura de tres metros, con un crecimiento en diámetro de 2 cm anuales (NFT Highlights, 1991).

Otro problema en los ajustes se manifiesta en las ramas pequeñas y medianas, cuando la arquitectura de la especie no presenta mayor diferencia entre estos dos componentes, por lo que sería necesario aumentar el número de sendas muestrales, lo cual es especialmente relevante para el Maitén.

En tanto, los modelos ajustados para la biomasa foliar presentan un menor nivel de predicción, al observar las estadísticas de correlación o ajuste, para las especies con hojas pequeñas donde la variabilidad de la relación peso-área foliar es mayor. Sin embargo, los residuos se mantienen en valores cercanos al cero, por lo que al aumentar la muestra, esta variación podría estabilizarse.

Los modelos de área foliar no presentaron mayores inconvenientes, a excepción del Pimiento donde los valores referenciales no se ajustaban a los datos estimados, lo que indicaría que la muestra es insuficiente o que los datos referenciales no son suficientemente específicos.

Una vez que se obtienen los resultados es lógico preguntarse por la aplicación que estos pudiesen tener, lo cual puede aplicarse en ámbitos principalmente forestales o medioambientales.

En términos forestales, existen dos tipos de aplicaciones importantes, la primera tiene que ver con la valorización del recurso y la segunda, con la estimación de los productos a extraer. Éstas pueden ser llevadas a cabo tanto en zonas rurales como urbanas.

Como primer punto los modelos permiten conocer el patrimonio existente de un bosque, rodal, sector o comuna en relación a la biomasa; por lo que se tendría una medición del material vegetal acumulado, que se traduce en un valor de productividad de la unidad. La adecuada determinación de la biomasa permite conocer los montos de

carbono acumulado y otros elementos químicos existentes en cada uno de sus componentes (Schlegel et al., 2002).

A su vez, el utilizar datos de biomasa en relación a productividad se puede traducir en la estimación de bioenergía que puede entregar un bosque, o bien la leña que se puede obtener de los desechos de intervenciones de manejo que se realicen en una unidad determinada. Así es como sucede en la Unión Europea, donde la biomasa de origen forestal lidera las energías renovables y representa más de la mitad de la producción de energía primaria a partir de estas fuentes (Geoscopio, 2004).

Para el caso de sectores urbanos, los desechos generados de talas y podas, al ser transformados en leña, significarían una reducción en los costos de aseo, pudiendo inclusive representar un ingreso adicional para las municipalidades por concepto de venta de este producto. La estimación anual de estos residuos también permitiría conocer la cantidad de material disponible para evaluar, por ejemplo, la instalación de una planta de compostaje a pequeña escala.

En relación a la aplicación de los modelos de biomasa en términos ambientales cabe destacar la valoración ambiental del recurso, es decir, conocer cual es el aporte que realiza un árbol dentro del medio que lo rodea. Esta idea se encuentra dirigida principalmente a evaluar la cantidad de carbono acumulado y capturado por un individuo, útil tanto dentro de los bosques o plantaciones como en el sistema urbano. Sobre su utilización en ciudades Pepper y McPherson. (1998) señala que la biomasa es un parámetro clave necesario para estimar el secuestro de carbono, y que el desarrollo de métodos de estimación no destructivos de biomasa es de vital importancia para cuantificar los beneficios de la captura de CO₂ en los bosques urbanos. Es en ese aspecto donde se justifica la utilización del muestreo de ramas al azar para llevar a cabo este tipo de estudio.

Este tipo de valorización puede tener dos líneas de aplicación, la primera apunta a la medición de un bosque o plantación para su incorporación en proyectos de sumideros de carbono (bonos de carbono) y la segunda, para la evaluación de proyectos de

paisajismo como parte de las medidas de compensación ambiental de obras realizadas en la ciudad.

Además, el conocimiento del recurso “biomasa” con que una comuna cuenta permitiría realizar un manejo dirigido hacia la disminución de gases que contribuyen al efecto invernadero, pudiendo así realizar una mejor elección de las especies a plantar y un manejo más adecuado para estas.

Los modelos de área foliar permiten la evaluación de procesos fisiológicos y ambientales que los árboles llevan a cabo. El conocimiento de los procesos fisiológicos concentra su aplicabilidad en estudios o investigaciones relacionadas con fotosíntesis, transpiración y evapotranspiración, lo que se traduce en productividad. Esto último es de utilidad para evaluar las tasas de crecimiento de las especies (McPherson 1998a), pudiendo considerarse como una herramienta para la selección de especies dentro de la ciudad.

Dentro de los procesos ambientales, una estimación del área foliar permite conocer el intercambio gaseoso que realiza la especie y puede ser de utilidad para la evaluación de la captura de gases de efecto invernadero. También, al valorizar el área foliar es posible evaluar la superficie existente para la captura de partículas contaminantes, por ejemplo PM10, lo cual es relevante para determinar que especies de árboles son más eficientes en el cumplimiento de este objetivo y así poder utilizar este conocimiento como una estrategia de contribución a la descontaminación de la ciudad.

El área foliar tiene implicancias en la conservación de la energía, relacionada con la cobertura arbórea, dado por el sombreado que pueden producir los árboles hacia casa o edificios, reduciendo así los costos de calefacción (Simpson, 1998).

En resumen, los modelos de biomasa y área foliar se presentan como una alternativa para desarrollar estrategias de manejo del arbolado urbano más eficientes en términos forestales y ambientales, contribuyendo así a mejorar la calidad de vida dentro de las ciudades.

6 CONCLUSIÓN

La construcción de ecuaciones de biomasa y área foliar basada en un muestreo no destructivo puede ser de gran utilidad para estudios donde no se pueda extraer la totalidad del árbol.

El método de muestreo de ramas al azar (RBS) se presenta como una herramienta simple y rápida, pudiendo ser aplicada por personas no involucradas directamente en ámbitos profesionales. El RBS es adecuado para ser aplicado en la ciudad dado su bajo grado de intervención en el árbol, presentando gran versatilidad, ya que puede ser utilizado para estimar distintas características del árbol. Sin embargo, para especies que presentan una homogeneidad en el tamaño de las ramas a lo largo de su copa sería adecuado considerar el doble o triple de los caminos muestrales para llevar a cabo la estimación.

El método utilizado para el área foliar entrega valores reales dentro del rango esperado para las especies, siendo también un muestreo simple que puede ser llevado a cabo por operarios sin una mayor capacitación.

De los modelos ajustados se puede concluir que la variable que mejor explica el comportamiento de la biomasa es el diámetro a la altura del pecho, lo que permite facilitar la estimación dado que se trata de un parámetro de fácil medición.

Las ecuaciones presentan un alto poder de predicción donde los resultados obtenidos se encuentran dentro de la biomasa referencial reportada para las especies. La menor precisión se produce con la especie Maitén, probablemente debido a su arquitectura, lo que significaría que se requeriría de un cambio en el muestreo utilizado o un mejoramiento de este. En cuanto a la biomasa por componentes, la menor precisión en los resultados es para las ramas medianas y pequeñas, sin embargo su participación es menor en la totalidad de la biomasa del árbol.

El desarrollo de una ecuación general de biomasa total y por componentes permite una extrapolación simple de las especies no consideradas en el estudio, independiente de que el poder de predicción sea menor que para las ecuaciones individuales por especie. Además, estos modelos mantienen como variable predictiva al DAP o la altura total del árbol por lo que su medición sería simple y rápida.

Los tipos de modelos de área foliar no fueron los mismos que los escogidos para la biomasa foliar, probablemente debido a que las variables presentan comportamientos distintos. Sin embargo, el DAP continua siendo el parámetro que mejor estima esta característica. La excepción se presenta en el Pimiento donde ninguno de los modelos probados se aproxima al dato referencial, por lo que se recomienda para futuros estudios el aumento de la muestra.

Las aplicaciones de los modelos se convierten en una herramienta para la selección de especies. Con esto se puede lograr, de manera más eficiente, la captura de gases contaminantes y del material particulado a un costo reducido.

Los modelos entonces, permitirían reforzar la toma de decisiones en cuanto al manejo del arbolado urbano logrando una mejoría en la calidad ambiental de las ciudades.

7 BIBLIOGRAFÍA

Bown H., 1992. Biomasa en bosques de Lenga en la provincia de Última Esperanza, XII Región. Memoria de Título. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales. 63 p.

Brack and Wood., 1998. Forest Mensuration. School of Resources, Environment and Society. The Australian National University. [en línea] <<http://online.anu.edu.au/forestry/mensuration.htm> >. [consulta 15 de Abril 2005].

California Air Resosurces Borrada, 2003. Urban Vegetation Air Quality Information Program. Department of the California Environmental Protection Agency. [en línea] <<http://www.arb.ca.gov/research/econprog/veginfo/veginfo.htm> >. [consulta 15 de Mayo 2003].

De la Maza C.L, Hernández J., Rodríguez M., Escobedo F., Nowak D.J. 2003. Proyecto FONDEFF D001 1078 Informe Técnico Biomasa. Desarrollo de un sistema de la vegetación urbana con fines de descontaminación atmosférica y de apoyo a la toma de decisiones a nivel municipal. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales, Departamento de Manejo de Recursos Forestales. 20 p.

DERSA 2003. Biomass. Desarrollo de Energías Renovables S.A. Pamplona. España. [en línea] <<http://www.dersa.es/biomadefin.htm> >. [consulta 15 de Diciembre 2003].

Escobedo F., Hernández J., de la Maza C.L., Rodríguez M., Nowak D.J., Crane D.E., 2002. Determinando los efectos del arbolado urbano sobre la calidad del aire, caso Santiago de Chile. USDA Forest Service NE Research Station, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales. En Seminario Internacional: Funciones y Valores del Arbolado Urbano. 19-25 p.

Forbush J., Richardson A., 1998. Sassafras allometry. FES519b-Methods of ecosystem analysis. School of Forestry & Environmental Studies. University of Yale. [en línea] <<http://www.yale.edu/fes519b/totoket/allom/allom.htm>>. consulta [21 de Abril 2005].

Geoscopio, 2004. Biomasa forestal, principal recurso energético de origen renovable en la Unión Europea. [en línea] <http://www.geoscopio.com/est/geos/ene/noticias/noticia_8358.htm>. consulta [21 de Abril 2005].

Gove J.H., Ducey M.J., Valentine H.T., 2002. Multistage point relascope and randomized branch sampling for downed coarse woody debris estimation. Forest Ecology and Management 155(2002):153-162.

Gregoire T.G., 2001. Research Statement. University of Yale. Estados Unidos. [en línea] <<http://www.yale.edu/forestry/bios/gregoireresearch.pdf>>. consulta [17 de Junio 2003].

Gregoire T., Valentine H. and Furnival G., 1995. Sampling Methods to Estimate Foliage and Other Characteristics of Individual Trees. Ecology 76(4): 1181-1194.

Hairiah K., Sitompul S.M., Van Noodwick M. y Palm C., 2001. Methods for sampling carbon stocks above and below ground. International Centre for Research in Agroforestry. Southeast Asian Regional Research Programme. Bogor, Indonesia. [en línea] <<http://www.icraf.cgiar.org/sea>>. [consulta 11 de Junio 2003].

Ibarra M., 1999. Apuntes Docentes Ecofisiología Forestal. Balance de Carbono en los Árboles. Departamento de Silvicultura. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Chile. 40 p.

Jessen R., 1955. Determining the fruit count on a tree by Randomized Branch Sampling. Biometrics 11(1): 99-109.

Karlik J. and McKay A., 2002. Leaf Area Index, Leaf Mass, Density and Allometric Relationships Derived from Harvest of Blue Oaks in a California Oak Savanna. USDA Forest Service Gen.Tech.Rep.PSW-GTR-184. 11 p.

Madgwick H., 1973. Biomass and productivity models of forests canopies. En: Analysis of temperate forests ecosystems. Springer Verlag, Berlín, RFA. p 47-53.

McPherson E., 1998a. Comparison of five methods for estimating leaf area index of open-grown deciduous trees. Journal of Arboriculture 24(2):98- 111.

McPherson E., 1998b. Structure and sustainability of Sacramento's urban forest. Journal of Arboriculture 24(4):173-190.

Newbould P., 1967. Methods for estimating the primary production of forests. IBP. Handbook N°2. Blackwell Scientific Publications, Oxford. 59 p.

NFT Highlights, 1991. Robinia pseudoacacia: temperate legume tree with world wide potential. A quick guide to useful nitrogen fixing trees from around the world. Forest, Farm and Community Tree Network. NFTA 91-03. [en línea] <http://www.winrock.org/forestry/factpub/factsh/R_pseudoacacia.html>. [consulta 20 de Abril 2003].

Nilo C., 2001. Áreas verdes como componente ambiental urbano para la planificación ambiental. Comisión Nacional del Medio Ambiente, CONAMA. En: Seminario El Árbol Urbano. 30 y 31 de Agosto 2001. Santiago, Chile, INCACEA. Pp.s.p.

Nowak D.J., 1996. Estimating leaf area and leaf biomass of open-grown deciduous urban trees. Forest Science 42(4): 504-507.

Nowak D.J., McHale P.J., Ibarra M., Crane D., Stevens J., Luley C.J., 1998. Modelling the effects of urban vegetation on air pollution. Air pollution and its applications XII. Plenum Press.

Nowak D.J, McPherson E.G, Rowntree R.A, 1994. Chicago Urban Forest Ecosystem: results of the Chicago Urban Forest Climate Project. USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. NE-186.120 p.

O'Hara F., 1990. Biomass. Carbon Dioxide Information Analysis Center. Oak Ridge National Laboratory. [en línea] <<http://www.cdiac.ornl.gov/glossary.html>>. [consulta 15 de Diciembre 2003].

Pardé J., 1980. Forest Biomass. Forests products abstracts. Review Article. Commonwealth Forestry Bureau 41(8):343-361.

Parresol B.R., 1999. Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons. Forest Science 45(4): 573-593.

Pepper P.J., McPherson E.G., 1998. Comparison of four foliar woody biomass estimation methods applied to open-grown deciduous trees. Journal of Arboriculture 24(4): 191-200.

Proyecto FONDEFF D001 1078. 2000-2003. Informe Final. Desarrollo de un sistema de la vegetación urbana con fines de descontaminación atmosférica y de apoyo a la toma de decisiones a nivel municipal. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales, Departamento de Manejo de Recursos Forestales.

Rowntree R.A., 1998. Urban Forest Ecology: conceptual point of departure. Concepts in Urban Forest Ecology. Journal of Arboriculture 24(2): 62-71.

Saborowski J., 2002. Análisis y aplicación práctica de diferentes métodos del "Randomized Branch Sampling". Dinamarca. [en línea] <http://www.uni-forst.gwdg.de/forst/fbi_spanisch/forschung/spatial/ag_spatial.htm>. [consulta 10 de Junio 2003].

Schlegel B., Gayoso J., Guerra J., 2002. Procedimientos de muestreo de biomasa forestal. Universidad Austral. [en línea] <<http://www.portalforestal.com/noticias/vernoticias.asp?id=239>>. [consulta 21 de Abril 2005].

Teller A., 1988. Biomass, productivity and wood waste evaluation in a spruce forest (Strainchamps, 1983). Commonwealth Forest Review 67(2):129-147.

USDA Forest Service, 2003. What is urban forestry?. USDA Forest Service. Estados Unidos. [en línea] <<http://www.cufr.ucdavis.edu/whatwedo/urbanforestry.html>>. [consulta 10 de Junio 2003].

USDA Forest Service, 2004. Ailanthus altísima (Mill.) Swingle. USDA Forest Service Northeastern area. Estados Unidos. [en línea] <http://www.na.fs.fed.us/spfo/pubs/silvics_manual/volume_2/ailanthus/altissima.htm>. [consulta 20 de Abril 2005].

Valentine H., Tritton L. and Furnival G., 1984. Subsampling Trees for Biomass, Volume or Mineral Content. Forest Science 30(3): 672-681.

Weber M., 2003a. Forest Management Option for CO₂ Mitigation. En: Seminario Forest Management for Carbon Sequestration. Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal. Pontificia Universidad Católica de Chile. 29 de Septiembre al 10 de Octubre 2003. 12 p.

Weber M., 2003b. Role of forests in global carbon cycle. En: Seminario Forest Management for Carbon Sequestration. Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal. Pontificia Universidad Católica de Chile. 29 de Septiembre al 10 de Octubre 2003. 8 p.

Weber M., 2003c. The Global Carbon Cycle and the Greenhouse Effect. En: Seminario Forest Management for Carbon Sequestration. Facultad de Agronomía e

Ingeniería Forestal. Pontificia Universidad Católica de Chile. 29 de Septiembre al 10 de Octubre 2003. 11 p.

Witting L., 1995. The body mass allometries as evolutionarily determined by the foraging of mobile organism. J. Theor. Biol 177: 129-137.

Yale, 1999. Aboveground biomass estimates at Saltonstall Ridge, East Haven, C.T. [en línea] <<http://www.yale.edu/fes519b/saltonstall/page6.htm>>. [consulta 22 de Marzo 2004].

8 APÉNDICE

Validación Modelos de Biomasa Total

Cuadro N°10: Comparación entre datos de biomasa total promedio y referencias bibliográficas.

	Datos Reales Promedio (Kg)	Datos Referenciales (Kg)	Fuente
Ailanto	261,55	120,33-6792	Siccama & Voght, 1999
Arce	67,17	34,12-2148	Ter-Mikaelin et al, 1997
Aromo	158,41	30,24-1462,6	Birk et al, 1995
Ciruelo	85,7	29,66-2003	Ter-Mikaelin et al, 1997
Falso Acacio	213,8	34,16-2373,23	Ter-Mikaelin et al, 1997
Liquidambar	32,12	25,64-694,8	Norby et al, 2001
Maitén	32,73	-	-
Pimiento	54,9	18,99-318,57	Steininger, 2000
Plátano Oriental	461,13	25,49-1387,84	Jenkins et al, 2003
Quillay	30,59	10,3-929,15	Prado & Aguirre, 1987

Cuadro N°11: Comparación entre datos reales y estimaciones de modelos para la biomasa total Ailanto.

Ailanto Clases DAP	Datos Reales (Kg)	Estimación Biomasa Total por componente (Kg)	Estimación Biomasa Total Genérica (Kg)
10	16,39	44,9709	17,038122
20	249,72	128,9889	72,243888
30	331,8	309,5649	164,253498

Cuadro N°12: Comparación entre datos reales y estimaciones de modelos para la biomasa total Arce.

Arce Clases DAP	Datos Reales	Estimación Biomasa Total por componente (Kg)	Estimación Biomasa Total Genérica (Kg)
10	16,63	23,6031	17,038122
20	64,91	48,9831	72,243888
30	181,07	111,0831	164,253498

Cuadro N°13: Comparación entre datos reales y estimaciones de modelos para la biomasa total Aromo.

Aromo Clases DAP	Datos Reales	Estimación Biomasa Total por componente (Kg)	Estimación Biomasa Total Genérica (Kg)
10	41,75	30,94312302	17,038122
20	113,78	93,01212595	72,243888
30	261,37	177,0668544	164,253498

Cuadro N°14: Comparación entre datos reales y estimaciones de modelos para la biomasa total Ciruelo.

Ciruelo Clases DAP	Datos Reales	Estimación Biomasa Total por componente (Kg)	Estimación Biomasa Total Genérica (Kg)
10	39,92	40,7138	17,038122
20	72,07	64,4638	72,243888
30	220,58	135,7138	164,253498

Cuadro N°15: Comparación entre datos reales y estimaciones de modelos para la biomasa total Falso Acacio.

Falso Acacio Clases DAP	Datos Reales	Estimación Biomasa Total por componente (Kg)	Estimación Biomasa Total Genérica (Kg)
10	14,21	76,7426	17,038122
20	91,02	97,5126	72,243888
30	157,04	133,4246	164,253498

Cuadro N°16: Comparación entre datos reales y estimaciones de modelos para la biomasa total Liquidámbar.

Liquidámbar Clases DAP	Datos Reales	Estimación Biomasa Total por componente (Kg)	Estimación Biomasa Total Genérica (Kg)
10	15,85	15,87373416	17,038122
20	42,64	45,91105391	72,243888
30	71,41	85,45240485	164,253498

Cuadro N°17: Comparación entre datos reales y estimaciones de modelos para la biomasa total Maitén.

Maitén Clases DAP	Datos Reales	Estimación Biomasa Total por componente (Kg)	Estimación Biomasa Total Genérica (Kg)
10	16,41	22,0447091	17,038122
20	40,15	52,2102273	72,243888
30	54,09	86,45607219	164,253498

Cuadro N°18: Comparación entre datos reales y estimaciones de modelos para la biomasa total Pimiento.

Pimiento Clases DAP	Datos Reales	Estimación Biomasa Total por componente (Kg)	Estimación Biomasa Total Genérica (Kg)
10	28,23	25,5143	17,038122
20	35,15	44,1343	72,243888
30	36,78	80,0443	164,253498

Cuadro N°19: Comparación entre datos reales y estimaciones de modelos para la biomasa total Plátano Oriental.

Plátano Oriental Clases DAP	Datos Reales	Estimación Biomasa Total por componente (Kg)	Estimación Biomasa Total Genérica (Kg)
30	154,71	186,807404	164,253498
40	293,31	336,017696	293,066952
50	520,25	527,8595	458,68425

Cuadro N°20: Comparación entre datos reales y estimaciones de modelos para la biomasa total Quillay.

Quillay Clases DAP	Datos Reales	Estimación Biomasa Total por componente (Kg)	Estimación Biomasa Total Genérica (Kg)
10	10,86	10,32848286	17,038122
20	59,65	69,85814596	72,243888
30	113,4	213,7182107	164,253498

Validación Ecuación Genérica Biomasa

Cuadro N°21: Comparación de Residuos entre ecuación genérica y ecuaciones individuales para el Ailanto

Componente	Estadística	Ecuación General	Ecuación Especie
Biomasa Total	$\sum e_i$	1159,91185	-2,86102E-06
	\bar{X}_{e_i}	115,991185	-2,86102E-07
	σ_{e_i}	143,751564	96,25297117
Biomasa Fustal	$\sum e_i$	1009,4784	1,9073E-06
	\bar{X}_{e_i}	100,94784	1,9073E-07
	σ_{e_i}	140,048791	98,0135773
Biomasa Ramas Grandes	$\sum e_i$	12,7414756	22,4640211
	\bar{X}_{e_i}	1,27414756	2,24640211
	σ_{e_i}	21,8223297	16,3480532
Biomasa Ramas Medianas	$\sum e_i$	27,471675	2,31880355
	\bar{X}_{e_i}	2,7471675	0,23188035
	σ_{e_i}	14,6936342	6,01899865
Biomasa Ramas Pequeñas	$\sum e_i$	-20,4828489	-0,73435719
	\bar{X}_{e_i}	-2,04828489	-0,07343572
	σ_{e_i}	2,93408922	2,79615121
Biomasa Foliar	$\sum e_i$	-35,0365556	2,21451506
	\bar{X}_{e_i}	-3,50365556	0,22145151
	σ_{e_i}	4,31223244	3,75152902

Cuadro N°22: Comparación de Residuos entre ecuación genérica y ecuaciones individuales para el Arce

Componente	Estadística	Ecuación General	Ecuación Especie
Biomasa Total	$\sum e_i$	-334,237396	0
	\bar{X}_{e_i}	-33,4237396	0
	σ_{e_i}	51,3993889	11,83777834
Biomasa Fustal	$\sum e_i$	-168,286484	7,7486E-07
	\bar{X}_{e_i}	-16,8286484	7,7486E-08
	σ_{e_i}	15,4554114	7,4176437
Biomasa Ramas Grandes	$\sum e_i$	-82,5381194	-3,55458307
	\bar{X}_{e_i}	-8,25381194	-0,35545831
	σ_{e_i}	11,1441448	25,6908598
Biomasa Ramas Medianas	$\sum e_i$	-32,962949	-3,23089562
	\bar{X}_{e_i}	-3,2962949	-0,32308956
	σ_{e_i}	3,76498635	12,5180143
Biomasa Ramas Pequeñas	$\sum e_i$	-24,6634712	-1,4901E-07
	\bar{X}_{e_i}	-2,46634712	-1,4901E-08
	σ_{e_i}	3,09011761	1,7043912
Biomasa Foliar	$\sum e_i$	-37,788969	3,4334849
	\bar{X}_{e_i}	-3,7788969	0,34334849
	σ_{e_i}	3,07224823	1,74050775

Cuadro N°23: Comparación de Residuos entre ecuación genérica y ecuaciones individuales para el Aromo

Componente	Estadística	Ecuación General	Ecuación Especie
Biomasa Total	$\sum e_i$	84,7925748	-23,50569806
	\bar{X}_{e_i}	8,47925748	-2,350569806
	σ_{e_i}	77,2835546	75,61827573
Biomasa Fustal	$\sum e_i$	112,293568	-9,6706388
	\bar{X}_{e_i}	11,2293568	-0,96706388
	σ_{e_i}	52,978388	45,7976605
Biomasa Ramas Grandes	$\sum e_i$	96,9732919	-1,6689E-06
	\bar{X}_{e_i}	9,69732919	-1,6689E-07
	σ_{e_i}	27,6084219	25,6784763
Biomasa Ramas Medianas	$\sum e_i$	29,9835883	-3,23089562
	\bar{X}_{e_i}	2,99835883	-0,32308956
	σ_{e_i}	12,8988242	12,5180143
Biomasa Ramas Pequeñas	$\sum e_i$	4,30810931	-0,97970772
	\bar{X}_{e_i}	0,43081093	-0,09797077
	σ_{e_i}	5,97090621	5,94036723
Biomasa Foliar	$\sum e_i$	123,014075	-6,75774622
	\bar{X}_{e_i}	12,3014075	-0,67577462
	σ_{e_i}	30,8098002	29,3617116

Cuadro N°24: Comparación de Residuos entre ecuación genérica y ecuaciones individuales para el Ciruelo

Componente	Estadística	Ecuación General	Ecuación Especie
Biomasa Total	$\sum e_i$	-86,9107856	-1,19209E-06
	\bar{X}_{e_i}	-8,69107856	-1,19209E-07
	σ_{e_i}	23,908857	18,74040865
Biomasa Fustal	$\sum e_i$	-261,00936	-7,11972928
	\bar{X}_{e_i}	-26,100936	-0,71197293
	σ_{e_i}	40,6514028	9,90867143
Biomasa Ramas Grandes	$\sum e_i$	74,8587378	6,95631579
	\bar{X}_{e_i}	7,48587378	0,69563158
	σ_{e_i}	31,6672605	7,61322042
Biomasa Ramas Medianas	$\sum e_i$	26,7417933	3,5763E-07
	\bar{X}_{e_i}	2,67417933	3,5763E-08
	σ_{e_i}	8,39568898	3,64738873
Biomasa Ramas Pequeñas	$\sum e_i$	43,9111748	2,57958272
	\bar{X}_{e_i}	4,39111748	0,25795827
	σ_{e_i}	12,6935598	4,0908136
Biomasa Foliar	$\sum e_i$	-12,3460184	-9,3132E-09
	\bar{X}_{e_i}	-1,23460184	-9,3132E-10
	σ_{e_i}	5,00856718	2,36327026

Cuadro N°25: Comparación de Residuos entre ecuación genérica y ecuaciones individuales para el Falso Acacio

Componente	Estadística	Ecuación General	Ecuación Especie
Biomasa Total	$\sum e_i$	-253,763606	3,54648E-06
	\bar{X}_{e_i}	-25,3763606	3,54648E-07
	σ_{e_i}	97,716971	57,84263728
Biomasa Fustal	$\sum e_i$	289,592186	36,8557292
	\bar{X}_{e_i}	28,9592186	3,68557292
	σ_{e_i}	42,5007503	21,4280352
Biomasa Ramas Grandes	$\sum e_i$	63,9119524	24,2107983
	\bar{X}_{e_i}	6,39119524	2,42107983
	σ_{e_i}	36,4027967	28,7743168
Biomasa Ramas Medianas	$\sum e_i$	-23,5582773	9,01861346
	\bar{X}_{e_i}	-2,35582773	0,90186135
	σ_{e_i}	9,79047939	6,70395229
Biomasa Ramas Pequeñas	$\sum e_i$	40,1158109	16,1310458
	\bar{X}_{e_i}	4,01158109	1,61310458
	σ_{e_i}	18,9645084	7,38149681
Biomasa Foliar	$\sum e_i$	29,9762166	19,603714
	\bar{X}_{e_i}	2,99762166	1,9603714
	σ_{e_i}	22,7543125	9,73216686

Cuadro N°26: Comparación de Residuos entre ecuación genérica y ecuaciones individuales para el Liquidámbar

Componente	Estadística	Ecuación General	Ecuación Especie
Biomasa Total	$\sum e_i$	-441,606503	-4,056781441
	\bar{X}_{e_i}	-44,1606503	-0,405678144
	σ_{e_i}	75,17032	7,419322601
Biomasa Fustal	$\sum e_i$	-189,040091	-6,7055E-08
	\bar{X}_{e_i}	-18,9040091	-6,7055E-09
	σ_{e_i}	24,279056	2,14466777
Biomasa Ramas Grandes	$\sum e_i$	-68,2497537	3,66806102
	\bar{X}_{e_i}	-6,82497537	0,3668061
	σ_{e_i}	4,75977917	4,55392894
Biomasa Ramas Medianas	$\sum e_i$	-15,8737476	1,02470659
	\bar{X}_{e_i}	-1,58737476	0,10247066
	σ_{e_i}	2,24778157	0,98275193
Biomasa Ramas Pequeñas	$\sum e_i$	3,61252709	0,35212773
	\bar{X}_{e_i}	0,36125271	0,03521277
	σ_{e_i}	2,89784237	0,55150448
Biomasa Foliar	$\sum e_i$	-56,0955281	0,34334156
	\bar{X}_{e_i}	-5,60955281	0,03433416
	σ_{e_i}	2,27736628	0,85940064

Cuadro N°27: Comparación de Residuos entre ecuación genérica y ecuaciones individuales para el Maitén

Componente	Estadística	Ecuación General	Ecuación Especie
Biomasa Total	$\sum e_i$	-28,4436605	-0,608343065
	\bar{X}_{e_i}	-2,84436605	-0,060834306
	σ_{e_i}	11,6710761	6,54667422
Biomasa Fustal	$\sum e_i$	-167,352232	-1,74889675
	\bar{X}_{e_i}	-16,7352232	-0,17488967
	σ_{e_i}	8,60760567	3,04159304
Biomasa Ramas Grandes	$\sum e_i$	-58,0920686	-0,06532872
	\bar{X}_{e_i}	-5,80920686	-0,00653287
	σ_{e_i}	4,4207396	2,36646957
Biomasa Ramas Medianas	$\sum e_i$	-16,5881694	0,03163502
	\bar{X}_{e_i}	-1,65881694	0,0031635
	σ_{e_i}	1,87455937	1,32267864
Biomasa Ramas Pequeñas	$\sum e_i$	-14,9725378	-0,00748914
	\bar{X}_{e_i}	-1,49725378	-0,00074891
	σ_{e_i}	1,37622	0,82105414
Biomasa Foliar	$\sum e_i$	-24,6940894	0,01332557
	\bar{X}_{e_i}	-2,46940894	0,00133256
	σ_{e_i}	2,31075757	2,06959028

Cuadro N°28: Comparación de Residuos entre ecuación genérica y ecuaciones individuales para el Plátano Oriental

Componente	Estadística	Ecuación General	Ecuación Especie
Biomasa Total	$\sum e_i$	86,8609314	8,58307E-06
	\bar{X}_{e_i}	8,68609314	8,58307E-07
	σ_{e_i}	71,624381	77,34462767
Biomasa Fustal	$\sum e_i$	-71,2890797	3,9339E-06
	\bar{X}_{e_i}	-7,12890797	3,9339E-07
	σ_{e_i}	117,352509	56,5695652
Biomasa Ramas Grandes	$\sum e_i$	-74,7125307	-5,30245137
	\bar{X}_{e_i}	-7,47125307	-0,53024514
	σ_{e_i}	23,9451512	22,5564926
Biomasa Ramas Medianas	$\sum e_i$	0,44439411	-2,48492944
	\bar{X}_{e_i}	0,04443941	-0,24849294
	σ_{e_i}	6,00231523	5,92290641
Biomasa Ramas Pequeñas	$\sum e_i$	-33,054217	-1,03437111
	\bar{X}_{e_i}	-3,3054217	-0,10343711
	σ_{e_i}	7,6440316	6,39751743
Biomasa Foliar	$\sum e_i$	-40,9742892	-1,96771011
	\bar{X}_{e_i}	-4,09742892	-0,19677101
	σ_{e_i}	8,73517208	8,5989785

Cuadro N°29: Comparación de Residuos entre ecuación genérica y ecuaciones individuales para el Pimiento

Componente	Estadística	Ecuación General	Ecuación Especie
Biomasa Total	$\sum e_i$	-167,995784	-7,7486E-07
	\bar{X}_{e_i}	-16,7995784	-7,7486E-08
	σ_{e_i}	21,0428234	30,47173249
Biomasa Fustal	$\sum e_i$	-289,620966	-9,5367E-07
	\bar{X}_{e_i}	-28,9620966	-9,5367E-08
	σ_{e_i}	4,20627754	24,0658055
Biomasa Ramas Grandes	$\sum e_i$	-54,5290977	-0,62715776
	\bar{X}_{e_i}	-5,45290977	-0,06271578
	σ_{e_i}	6,84061687	4,03471914
Biomasa Ramas Medianas	$\sum e_i$	-26,1151946	-0,4238562
	\bar{X}_{e_i}	-2,61151946	-0,04238562
	σ_{e_i}	1,91419356	2,07899421
Biomasa Ramas Pequeñas	$\sum e_i$	-20,2879973	-0,74599052
	\bar{X}_{e_i}	-2,02879973	-0,07459905
	σ_{e_i}	1,46672343	2,72564984
Biomasa Foliar	$\sum e_i$	-40,1168314	1,0431E-07
	\bar{X}_{e_i}	-4,01168314	1,0431E-08
	σ_{e_i}	2,17361325	0,92704162

Cuadro N°30: Comparación de Residuos entre ecuación genérica y ecuaciones individuales para el Quillay

Componente	Estadística	Ecuación General	Ecuación Especie
Biomasa Total	$\sum e_i$	-18,6076487	16,61295164
	\bar{X}_{e_i}	-1,86076487	1,661295164
	σ_{e_i}	14,2486612	13,06603579
Biomasa Fustal	$\sum e_i$	-264,765929	1,7881E-07
	\bar{X}_{e_i}	-26,4765929	1,7881E-08
	σ_{e_i}	10,0661413	4,6054738
Biomasa Ramas Grandes	$\sum e_i$	-15,5982386	7,09668334
	\bar{X}_{e_i}	-1,55982386	0,70966833
	σ_{e_i}	5,31897621	4,09411697
Biomasa Ramas Medianas	$\sum e_i$	1,38453797	3,9164154
	\bar{X}_{e_i}	0,1384538	0,39164154
	σ_{e_i}	3,43317256	2,55783674
Biomasa Ramas Pequeñas	$\sum e_i$	-2,29742871	1,5698612
	\bar{X}_{e_i}	-0,22974287	0,15698612
	σ_{e_i}	1,50796284	1,34432107
Biomasa Foliar	$\sum e_i$	-0,98704653	5,44465025
	\bar{X}_{e_i}	-0,09870465	0,54446502
	σ_{e_i}	3,59749506	3,02107354

Validación de Modelos de Área Foliar

Cuadro N°31: Comparación entre Área Foliar de modelos y referencia Ailanto

Ailanto 117,75 m² (dato referencial)				
DAP (cm)	modelo 1	modelo 2	modelo 3	modelo 4
24,4	60,34049109	105,959605	104,1791352	73,9929363

Cuadro N°32: Comparación entre Área Foliar de modelos y referencia Arce

Arce 46,7 m² (dato referencial)				
DAP (cm)	modelo 1	modelo 2	modelo 3	modelo 4
17,3	31,91587909	42,31103766	32,34303791	33,0288298

Cuadro N°33: Comparación entre Área Foliar de modelos y referencia Aromo.

Aromo 58,16 m² (dato referencial)				
DAP (cm)	modelo 1	modelo 2	modelo 3	modelo 4
21,2	78,25967961	101,4118058	279,9891464	68,5820324

Cuadro N°34: Comparación entre Área Foliar de modelos y referencia Ciruelo.

Ciruelo 52,39 m² (dato referencial)				
DAP (cm)	modelo 1	modelo 2	modelo 3	modelo 4
18,3	28,7066254	75,57109779	44,15874423	43,653314

Cuadro N°35: Comparación entre Área Foliar de modelos y referencia Falso Acacio.

Falso Acacio 54,65 m² (dato referencial)				
DAP (cm)	modelo 1	modelo 2	modelo 3	modelo 4
24,6	28607690,41	104,8313062	47,19883151	32,8220345

Cuadro N°36: Comparación entre Área Foliar de modelos y referencia Liquidambar.

Liquidambar 49,92 m² (dato referencial)				
DAP (cm)	modelo 1	modelo 2	modelo 3	modelo 4
12,5	21,83610234	21,21524332	41,10144438	21,806396

Cuadro N°37: Comparación entre Área Foliar de modelos y referencia Maitén.

Maitén 16,84 m² (dato referencial)				
DAP (cm)	modelo 1	modelo 2	modelo 3	modelo 4
15,8	16,95749052	16,88215336	16,2142394	16,4689685

Cuadro N°38: Comparación entre Área Foliar de modelos y referencia Pimiento.

Pimiento 98,4 m² (dato referencial)				
DAP (cm)	modelo 1	modelo 2	modelo 3	modelo 4
28,5	13,68351774	14,69369527	13,50674931	13,4000027

Cuadro N°39: Comparación entre Área Foliar de modelos y referencia Plátano Oriental.

Plátano Oriental 194,98 m² (dato referencial)				
DAP (cm)	modelo 1	modelo 2	modelo 3	modelo 4
35,2	206,3552734	201,8941151	205,1658103	196,386708

Cuadro N°40: Comparación entre Área Foliar de modelos y referencia Plátano Oriental.

Quillay 39,05 m² (dato referencial)				
DAP (cm)	modelo 1	modelo 2	modelo 3	modelo 4
14	40,06182422	64,39617496	322,935783	53,0368583

9 ANEXO 1

Densidades utilizadas para el cálculo de la biomasa fustal

Espece	Densidad 1	Cita	Densidad 2	Cita
Ailanto	540 kg/m ³	http://www.yale.edu/fes519b/saltonstall/allometry/allometry/allometry%20pages/basi%20tree%20data.html	577 kg/m ³	Alden, H., 1995. Hardwoods of North America. Gen. Tech. Rep FPL-GTR-83 Madison, WI. US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
Liquidámbar	560 kg/m ³	Handbook of Hardwoods, 1972. Department of the Environmental Building Research Establishment. Princes Risbourough laboratory	576,6 kg/m ³	Plumb, T., Wolf, M., Selly, J., 1999. California Urban Woody Utilization. Urban Forest Ecosystem Institute. California Polytecnic State University
Acacia	660 kg/m ³	Handbook of Hardwoods, 1972. Department of the Environmental Building Research Establishment. Princes Risbourough laboratory	656,7 kg/m ³	Plumb, T., Wolf, M., Selly, J., 1999. California Urban Woody Utilization. Urban Forest Ecosystem Institute. California Polytecnic State University
Ciruelo	600 kg/m ³	Handbook of Hardwoods, 1972. Department of the Environmental Building Research Establishment. Princes Risbourough laboratory	561 kg/m ³	Alden, H., 1995. Hardwoods of North America. Gen. Tech. Rep FPL-GTR-83 Madison, WI. US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
Plátano oriental	560,03 kg/m ³	Massengale, R., 2001. Missouri Woods. Conservation Comission of the State of Missouri. http://www.mdc.mo.gov/documents/forest/woods/intro.pdf	512,5 kg/m ³	Plumb, T., Wolf, M., Selly, J., 1999. California Urban Woody Utilization. Urban Forest Ecosystem Institute. California Polytecnic State University
Maiten	705 kg/m ³	Wood Technical Fact Sheet. USDA Forest Service. Forest Products Laboratory	710 kg/m ³	Brown, S., 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer. Fao Forestry Paper-134.

Especie	Densidad 1	Cita	Densidad 2	Cita
Pimiento	669 kg/m ³	Anderson, P., 2004. Schinus molle. Peace corps,Bolivia. http://www.rngr.net/publications/ttsm/folder.2003-07-11.4726/pdf.2004-03-16.2734/file	610 kg/m ³	Agroforestry Tree Database http://www.worldagroforestry.org/sea/products/AFDbases/WD/asp/s/displaydetail.asp?secID=3049
Quillay	526,7 kg/m ³	Maldonado, F., 1967. Rendimiento de Corteza de Quillay en la Zona de Valparaíso. Memoria de Título, Facultad de Agronomía. Universidad de Chile.	560 kg/m ³	Mansilla, H., García, R., Tapia, J., Duran, H., Urzúa, A., 1991. Chemical Characterization of Chilean Hardwoods. Wood Science and Technology 25(2): 145-149.
Robinia	720 kg/m ³	Handbook of Hardwoods, 1972. Department of the Environmental Building Research Establishment. Princes Risborough laboratory	769 kg/m ³	Alden, H., 1995. Hardwoods of North America. Gen. Tech. Rep FPL-GTR-83 Madison, WI. US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
Arce	526,03 kg/m ³	http://hearth.com/what/heathvalues.html	513 kg/m ³	Alden, H., 1995. Hardwoods of North America. Gen. Tech. Rep FPL-GTR-83 Madison, WI. US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.

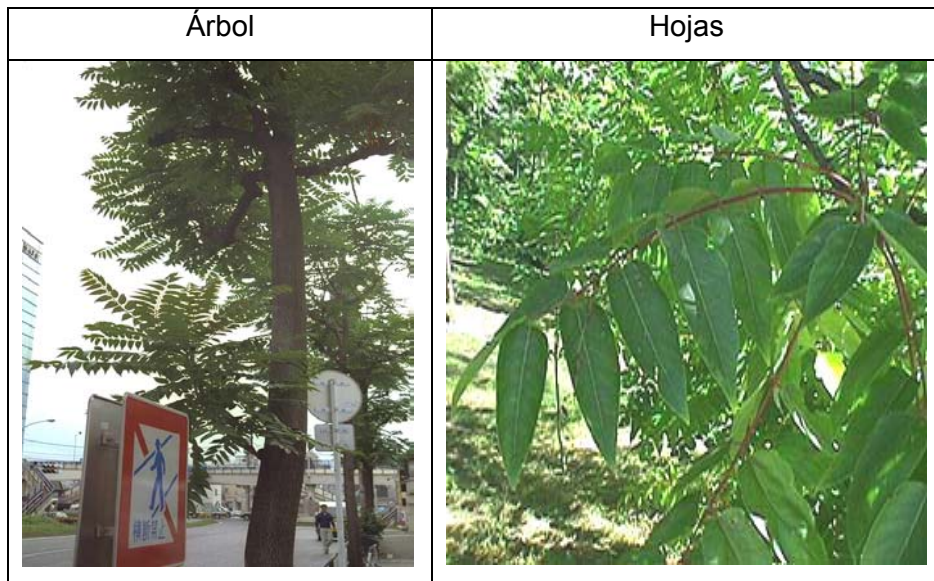
Espece	Densidad 1	Cita	Densidad 2	Cita
Ailanto	550 kg/m ³	http://www.windsorplywood.com/nam_hardwoods/ailanthus_altissima.html		
Liquidámbar	545 kg/m ³	Alden, H., 1995. Hardwoods of North America. Gen. Tech. Rep FPL-GTR-83 Madison, WI. US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.	544.6 kg/m ³	Massengale, R., 2001. Missouri Woods. Conservation Commission of the State of Missouri. http://www.mdc.mo.gov/documents/forest/woods/intro.pdf
Acacia	640 kg/m ³	http://ajh-knives.com/xylon-1.html		
Ciruelo	560 kg/m ³	Massengale, R., 2001. Missouri Woods. Conservation Commission of the State of Missouri. http://www.mdc.mo.gov/documents/forest/woods/intro.pdf	561 kg/m ³	http://www.windsorplywood.com/nam_hardwoods/prunus_serotina.html
Plátano oriental	545 kg/m ³	Alden, H., 1995. Hardwoods of North America. Gen. Tech. Rep FPL-GTR-83 Madison, WI. US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.		
Maiten	705 kg/m ³	Southamerican Hardwoods: tree and wood characteristics. http://www.news.ai/build/woods.html	710 kg/m ³	http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf_files/Chp3/Anx_3A_1_Data_Tables.pdf

Espece	Densidad 1	Cita	Densidad 2	Cita
Pimiento	610 kg/m ³	Schinus molle L. Seed leaflet N°57 January 2002 Basfor. http://www.dfsc.dk/pdf/seedleaflets/schinus%20molle_57_int.pdf	610 kg/m ³	Stratton, L., Goldstein, G., Meinen, F.C., 2000. Stem water storage capacity and efficiency of water transport: their functional significance in a Hawaiian dry forest. Plant, Cell & Environment, vol 23(1) January 200, page 10
Quillay				
Robinia	771.84 kg/m ³	Massengale, R., 2001. Missouri Woods. Conservation Commission of the State of Missouri. http://www.mdc.mo.gov/documents/forest/woods/intro.pdf	769 kg/m ³	http://www.windsorplywood.com/nam_hardwoods/black_locust.html
Arce	546.7 kg/m ³	Massengale, R., 2001. Missouri Woods. Conservation Commission of the State of Missouri. http://www.mdc.mo.gov/documents/forest/woods/intro.pdf	513 kg/m ³	http://www.windsorplywood.com/nam_hardwoods/acer_negundo.html

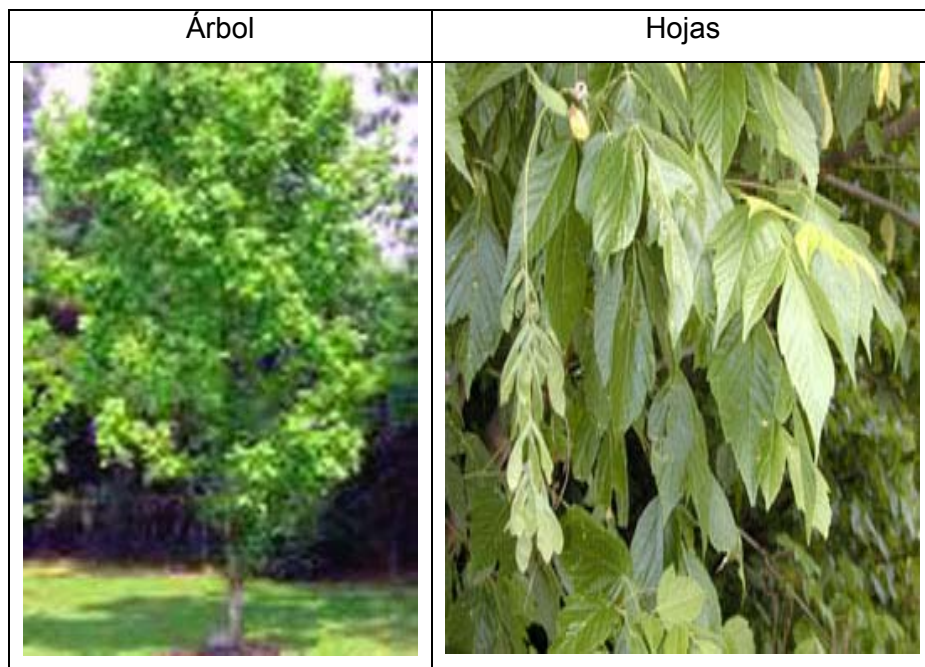
10 ANEXO 2

Imágenes de las especies en estudio



Ailanto





Arce



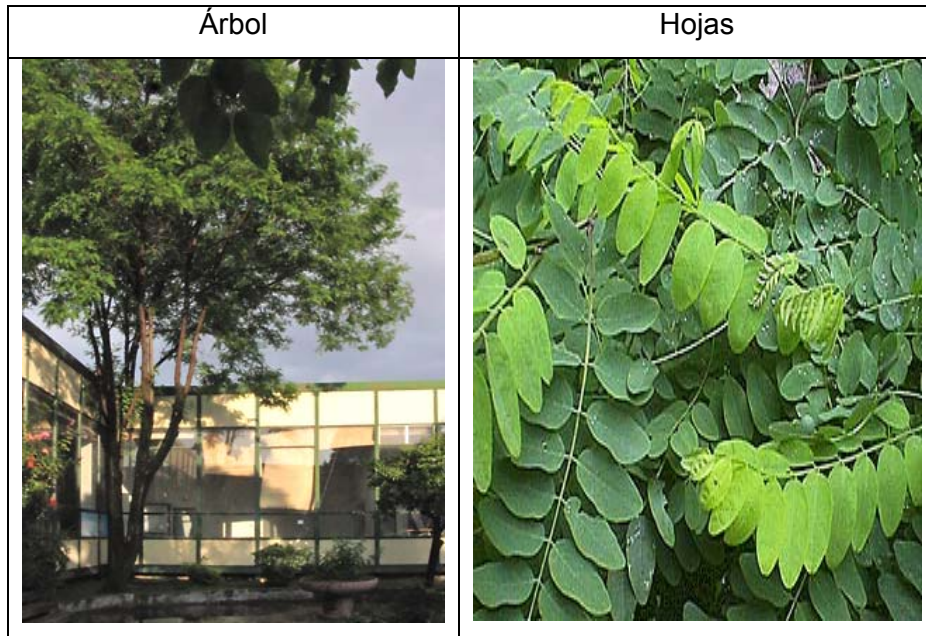
Aromo

Árbol	Hojas
	

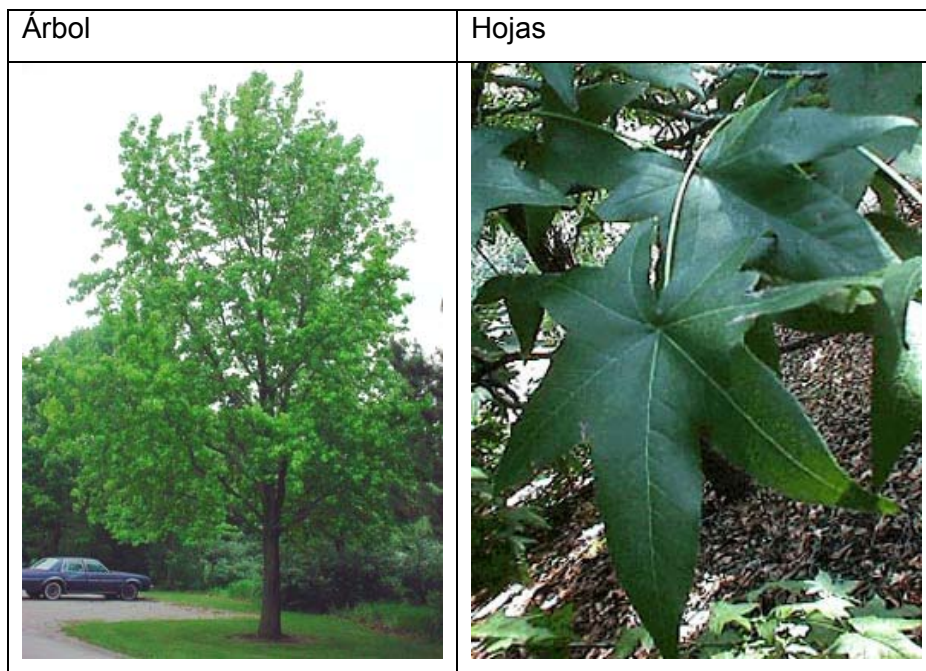
Ciruelo

Árbol	Hojas
	



Falso Acacio





Liquidámbar





Maitén

Árbol	Hojas
	

Pimiento

Árbol	Hojas
	

Plátano Oriental

Árbol	Hojas
	

Quillay



Árbol	Hojas
	

TABLA DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	1
2	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	2
2.1	Antecedentes generales de la vegetación urbana	2
2.2	Situación de la vegetación urbana en Santiago	4
2.3	Antecedentes generales de biomasa	5
2.4	Métodos de estimación de biomasa de árboles individuales	7
2.4.1	Método destructivo	7
2.4.2	Método no destructivo	8
2.5	Relaciones alométricas	15
2.6	Antecedentes de área foliar	16
3	MATERIAL Y MÉTODO	18
3.1	Descripción del área de estudio	18
3.2	Material	18
3.2.1	Selección de los árboles a muestrear	18
3.3	Método	19
3.3.1	Estimación de parámetros para árboles individuales	19
3.3.2	Construcción de modelos de estimación de biomasa y área foliar	23
4	PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	24
4.1	Modelos de Biomasa por componente	24
4.1.1	Biomasa Total	24
4.1.2	Biomasa Fustal	26
4.1.3	Biomasa Ramas	28
4.1.4	Biomasa Foliar	33
4.2	Modelo de Biomasa Genérica	35
4.3	Distribución de los componentes de biomasa por especie	36
4.4	Modelos de Área Foliar	40
5	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	42
6	CONCLUSIÓN	46
7	BIBLIOGRAFÍA	48
8	APÉNDICE	54
9	ANEXO 1	69

10 ANEXO 2 73