



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN CIENCIAS FORESTALES

ESTIMACIÓN DE BIOMASA Y CARBONO EN SIERRA DE SANTA ROSA, GUANAJUATO

BOSSUET GASTÓN CORTÉS SÁNCHEZ

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

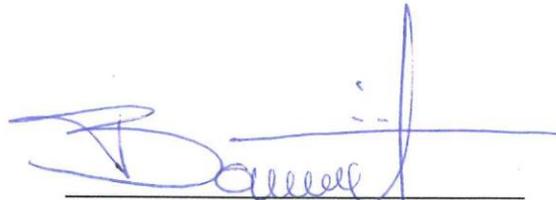
2018

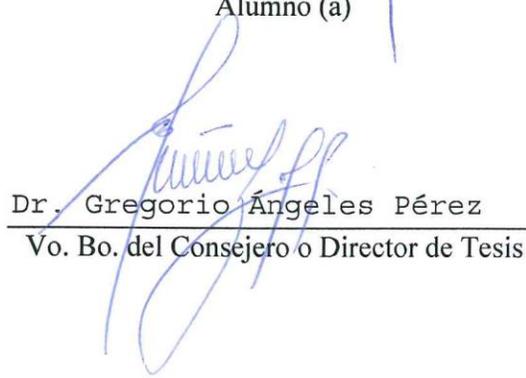
CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALIAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACION

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe Bossuet Gastón Cortés Sánchez, Alumno (a) de esta Institución, estoy de acuerdo en ser participe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor Gregorio Ángeles Pérez, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis "Estimación de biomasa y carbono en sierra de Santa Rosa, Guanajuato."

y de los producto de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre el colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Mpio. de Texcoco, Edo. de México, a 22 de junio de 2018


Firma del
Alumno (a)


Dr. Gregorio Ángeles Pérez
Vo. Bo. del Consejero o Director de Tesis

La presente tesis titulada: “**Estimación de biomasa y carbono en sierra de Santa Rosa, Guanajuato.**”, realizada por el alumno: **Bossuet Gastón Cortés Sánchez** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS
CIENCIAS FORESTALES

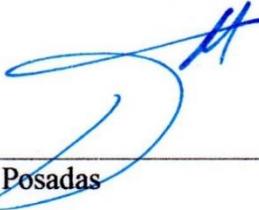
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



Dr. Gregorio Ángeles Pérez

ASESOR



Dr. Héctor M. de los Santos Posadas

ASESOR



Dr. Hugo Ramírez Maldonado

Montecillo, Texcoco, Estado de México, junio de 2018

Este trabajo de investigación fue financiado por el Programa de Paisajes Sustentables de la Agencia para el Desarrollo Internacional de Estados Unidos de América, a través de la Oficina de Programas Internacionales del Servicio Forestal del Departamento de Agricultura, y la Northern Research Station, a través del proyecto **“Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y mejoramiento del manejo forestal en México”**.

ESTIMACIÓN DE BIOMASA Y CARBONO EN SIERRA DE SANTA ROSA, GUANAJUATO, GTO.

Bossuet Gastón Cortés Sánchez, M. en C.
Colegio de Postgraduados, 2018.

RESUMEN

Los ecosistemas terrestres son considerados importantes sumideros de carbono (C). Entre estos, los bosques juegan un papel preponderante por su capacidad de fijar y almacenar grandes cantidades de CO₂ atmosférico. Sin embargo, aún existe incertidumbre acerca de cuanto C almacena un bosque, el cual puede variar dependiendo de su edad, composición florística, y productividad.

Uno de los primeros pasos para estimar el carbono almacenado en los bosques es determinar su biomasa de estos. En México, en las últimas décadas, se han generado modelos para diferentes regiones, ya sea para comunidades completas, grupos de especies o para especies individuales. Sin embargo, a pesar que el número de trabajos ha ido en aumento, aún se tiene un déficit de ecuaciones alométricas para estimar biomasa, en particular para géneros tan diversos como el género *Quercus*, especialmente en regiones donde la principal actividad no es la producción maderable, sino provisión de servicios ambientales para fijación de CO₂ atmosférico. Por esto, en este trabajo se desarrollaron modelos para estimar biomasa aérea para seis especies de encino en la Sierra de Santa Rosa, en el estado de Guanajuato. Dichos modelos estiman biomasa de componentes estructurales (fuste, ramas y follaje), mediante un sistema de ecuaciones y la propiedad de aditividad se estimó la biomasa total y, se desarrollaron modelos por grupos de especies de encino.

También se desarrollaron modelos de volumen rollo total árbol (V_{rta}) y volumen de ramas (V_r), donde la suma de ambos representa el volumen total árbol (V_{ta}). Se propone un modelo general del género *Quercus*, y seis específicos para las especies utilizadas en este trabajo. Asimismo, mediante un inventario realizado en el verano de 2014, y con diferentes estimadores de muestreo se determinó la biomasa almacenada en el área de estudio. A la par, se cuantificó el C almacenado con los mismos estimadores de muestreo.

Los modelos locales reducen la incertidumbre asociada, demostrándolo mediante la comparación de modelos generados en este trabajo y modelos propuestos para otras regiones.

La biomasa contenida en los predios de la Sierra de Santa Rosa, Guanajuato, tienen almacenada 364,096 Mg (± 199.5) de biomasa en 5,566.8 ha de superficie forestal. Se estimó un inventario de carbono almacenado de 171,731 Mg (± 91.4). Es decir, estos bosques almacenan, en promedio, 30.8 Mg ha⁻¹ (± 0.02) y un promedio de volumen total árbol de 75.5 m³ ha⁻¹ (± 0.04).

Palabras clave: biomasa aérea, ecuaciones alométricas, componentes estructurales, distribución de biomasa, volumen, distribución de volumen, inventario.

ESTIMATION OF BIOMASS AND CARBON IN THE SIERRA OF SANTA ROSA, GUANAJUATO, GTO.

Bossuet Gastón Cortés Sánchez, M. en C.
Colegio de Postgraduados, 2018.

ABSTRACT

Terrestrial ecosystems are considered important carbon sinks (C). Among these, forests play a main role for fixing and storing large amounts of atmospheric CO₂. Currently, there is large uncertainty about the amount of C that is stored in forest ecosystems, it varies depending on forest age, floristic composition and forest productivity.

The first step to estimate the amount of carbon stored in forests is to determine the biomass content. In Mexico, in the last decades, many biomass models have been generated for different regions, for complete communities, groups of species or for individual species. Research for developing biomass models has been very active in recent years. However, there is a lack of allometric equations to estimate biomass, particularly for genera such as *Quercus*, especially in regions where the timber production is not their main purpose, but the provision of environmental services such as the capture of atmospheric CO₂. For this reason, biomass models for six oak species in Santa Rosa mountains in Guanajuato state were developed. These models estimate the biomass by structural components (stem, branches and foliage) where total biomass was estimated using the property of additivity. Individual species and groups species models were developed.

Models for bole volume (V_{rta}) and branch volume (V_r) were developed, the sum of both components represented the total tree volume (V_{ta}). A general model is proposed for genus *Quercus* and six models for the harvested species. In addition, inventory data collected in the summer of 2014 at the study site, was used to estimate biomass storages using different sampling estimators. At the same time, the stored carbon was quantified using the same sampling estimators. The use of local models reduced the associated uncertainty, which was verified by comparing estimations using local models and models for the same genus developed in other regions.

The aboveground forest biomass contained in the Santa Rosa mountain, Guanajuato, was estimated as 364,096 Mg (± 199.5) in 5,566.8 ha. The total stored carbon inventory was estimated in 171,731 Mg (± 91.4). These oak forests store a mean of 30.8 Mg C ha⁻¹ (± 0.01) and an average V_{ta} of 75.5 m³ ha⁻¹ (± 0.04).

Keywords: Aboveground biomass, allometric equations, structural components, biomass distribution, volume, volume distribution, inventory.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el financiamiento de mis estudios de maestría.

Al Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, por ser la institución de enseñanza e investigación de alto nivel que permitió desarrollar mi trabajo de investigación, por la calidad académica, y en especial al Postgrado en Ciencias Forestales, por la oportunidad de seguir preparándome y continuar mis estudios de maestría.

Al Dr. Gregorio Ángeles Pérez, por el interés y tiempo dedicado al desarrollo y dirección de este trabajo de investigación, por no limitarse al compartir su conocimiento, mi reconocimiento y admiración como profesor y académico.

Al Dr. Héctor M. de los Santos Posadas, por su disposición y asesoría, por esa chispa inyectada al transmitir conocimiento y siempre compartirlo; un gran profesor.

Al Dr. Hugo Ramírez Maldonado, por el tiempo brindado, así como comentarios y sugerencias a este trabajo.

A los profesores de Postgrado en Ciencias Forestales por compartir su conocimiento y experiencia.

Al Ing. Marco Antonio González López representante legal de Industrial Santa Fe S. P. R., por el interés en desarrollar este trabajo de investigación en los predios que representa, así como el financiamiento de jornales para la toma de datos en campo y las facilidades en el desarrollo de este trabajo.

A Consultores en Manejo Forestal Sustentable S.C., en especial a los Ingenieros José Manuel Cabrera Laderos e Israel Cabrera Landeros, por las facilidades brindadas y el apoyo para realizar el presente trabajo de investigación, así también por compartir información y datos para complementar este trabajo.

A los amigos de siempre y a los nuevos compañeros de esta etapa, por la motivación y contribución en diferente medida.

DEDICATORIA

A mis queridos padres Salvador Cortés Jiménez y Robertina Sánchez Sánchez. A quienes respeto y admiro mucho. Gracias por el apoyo que siempre me han brindado en cada proyecto que he decidido emprender, por sus consejos oportunos y la confianza.

A mi hermano Arturo por la buena compañía, esos momentos felices que tenemos como familia y su gran amistad.

A Dafne Donají por su amor, y acompañarme en esta etapa de vida a la que nos aventuramos desconociendo el camino que había que recorrer, agradeciendo su paciencia y apoyo incondicional para concluir este periodo de aprendizaje.

CONTENIDO

RESUMEN	v
ABSTRACT	vii
LISTA DE CUADROS	xv
LISTA DE FIGURAS	xvii
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
PROBLEMÁTICA AMBIENTAL DEL CAMBIO CLIMÁTICO.....	1
EL PAPEL DE LOS ECOSISTEMAS FORESTALES	2
COMPROMISOS INTERNACIONALES Y NACIONALES.....	3
BIOMASA Y CARBONO.....	4
VOLUMEN.....	5
SOBRE EL GENERO <i>QUERCUS</i>	5
SOBRE EL ÁREA EL ESTUDIO	5
OBJETIVOS	7
General	7
Específicos	7
CAPÍTULO 1. ECUACIONES ALOMÉTRICAS PARA ESTIMAR BIOMASA AÉREA DE ESPECIES DE ENCINO EN GUANAJUATO, MÉXICO	8
1.1. RESUMEN.....	8
1.2. INTRODUCCIÓN	9
1.3. OBJETIVOS.....	10
1.4. MATERIALES Y MÉTODOS	10
1.4.1. Área de estudio	10
1.4.2. Trabajo de campo.....	11
1.4.3. Ajuste de modelos.....	13
1.4.4. Grupos de especies.....	14
1.4.5. Validación de modelos.....	15
1.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	16
1.5.1. Distribución de biomasa individual	16
1.5.2. Modelos de biomasa por componente estructural.....	17
1.5.3. Ecuaciones alométricas por grupo de especies	21

1.5.4.	Modelos específicos.....	24
1.6.	CONCLUSIONES	28
1.7.	LITERATURA CITADA.....	29

CAPÍTULO 2. VOLUMEN DE SEIS ESPECIES DE ENCINO EN SIERRA DE SANTA ROSA, GUANAJUATO, MÉXICO.....34

2.1.	RESUMEN.....	34
2.2.	INTRODUCCIÓN	35
2.3.	OBJETIVOS.....	36
2.4.	MATERIALES Y MÉTODOS	36
2.4.1.	Área de estudio	36
2.4.2.	Selección de arbolado	37
2.4.3.	Factor de forma.....	38
2.4.4.	Estimación de volumen.....	39
2.4.5.	Volumen de fuste (V_{rta})	39
2.4.6.	Volumen de ramas (V_r).....	40
2.4.7.	Volumen total árbol (V_{ta})	40
2.4.8.	Validación cruzada, bondad de ajuste y criterios de selección	40
2.5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	41
2.5.1.	Volumen individual	41
2.5.2.	Factor de forma.....	42
2.5.3.	Modelo de volumen general.....	42
2.5.4.	Ecuación de volumen por grupo de especies	47
2.5.5.	Ecuaciones de volumen por especies.....	49
2.6.	CONCLUSIONES	51
2.7.	LITERATURA CITADA.....	52

CAPÍTULO 3. INVENTARIO DE BIOMASA Y CARBONO EN SIERRA DE SANTA ROSA, GUANAJUATO, MÉXICO.....54

3.1.	RESUMEN.....	54
3.2.	INTRODUCCIÓN	55
3.3.	OBJETIVOS.....	55
3.4.	MATERIALES Y MÉTODOS	56
3.4.1.	Área de estudio	56
3.4.2.	Muestreo, colecta de datos en campo y procesamiento	56
3.4.3.	Estimación de biomasa y volumen	57
3.4.4.	Proporción de carbono almacenado (CC).....	58
3.4.5.	Estimadores de muestreo para inventario de un bosque de encino.....	59
3.4.5.1.	Muestreo simple aleatorio (MSA).....	59
3.4.5.2.	Muestreo estratificado (ME)	59

3.4.5.3. Estimadores de Razón (Proporción) y Regresión.....	61
3.4.5.4. Estimadores de razón bajo estratificación	62
3.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	63
3.5.1. Biomasa y volumen.....	63
3.5.2. Contenido de Carbono	67
3.6. CONCLUSIONES	70
3.7. LITERATURA CITADA.....	71
CONCLUSIONES GENERALES	74

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Especies muestreadas y parámetros dasométricos de los árboles muestreados.	12
Cuadro 2. Modelos con mejores parámetros de bondad de ajustes.	13
Cuadro 3. Sistema de ecuaciones para determinar biomasa por componente estructural y total.....	17
Cuadro 4. Parámetros estimados y estadísticos de bondad de ajuste del Sistema de Ecuaciones 1, para estimar biomasa por componente estructural y biomasa total.	18
Cuadro 5. Parámetros estimados y estadísticos de bondad de ajuste del Sistema de Ecuaciones 2, para estimar biomasa por componente estructural y biomasa total empleando modelos que incluyen la densidad de madera (ρ) como variable independiente.....	19
Cuadro 6. Valores de la prueba de análisis de covarianza para discernir el posible agrupamiento de especies.....	22
Cuadro 7. Parámetros estimados y estadísticos de bondad de ajuste de sistema de ecuaciones para determinar biomasa en grupos de encinos en Guanajuato, México.	23
Cuadro 8. Parámetros estimados y estadísticos de bondad de ajuste de sistema de ecuaciones para determinar biomasa de seis especies de encino en Guanajuato, México.	24
Cuadro 9. Comparación de error y sesgo para estimar biomasa total entre los sistemas propuestos (1 y 2), y el sistema de ecuaciones propuesto por Vargas-Larreta et al. (2017).	26
Cuadro 10. Modelos con mejores ajustes evaluados.	39
Cuadro 11. Parámetros dendrométricos mínimos y máximos, de especies utilizadas en muestreo.	41
Cuadro 12. Parámetros estimados y estadísticos de bondad de ajuste de modelos para determinar Vta de encinos en Guanajuato, México.	43
Cuadro 13. Sistemas de ecuaciones para determinar volumen por componente estructural y total.....	44
Cuadro 14. Parámetros y estadísticos de bondad del sistema de ecuaciones 3, ajustados para estimar Vta de encinos en Guanajuato, México.	44
Cuadro 15. Parámetros y estadísticos de bondad del sistema de ecuaciones 2, ajustados para estimar Vta en encinos en Guanajuato, México.	45
Cuadro 16. Valores del análisis de covarianza para discernir el posible agrupamiento de especies.....	48

Cuadro 17. Parámetros estimados y estadísticos de bondad de ajuste de sistema de ecuaciones para determinar volumen en grupos de encinos en Guanajuato, México.....	49
Cuadro 18. Parámetros estimados y bondad de ajuste de sistema de ecuaciones para determinar volumen de seis especies de encino en Guanajuato, México.....	50
Cuadro 19. Modelos empleados para determina biomasa y volumen en Sierra de Santa Rosa, Guanajuato. México.	58
Cuadro 20. Estimadores para muestreo simple aleatorio.....	59
Cuadro 21. Estimadores para muestreo estratificado.....	60
Cuadro 22. Estimadores para muestreo de razón y regresión.....	61
Cuadro 23. Estimadores para muestreo de razón bajo estratificación.	63
Cuadro 24. Estimadores de Muestreo Simple Aleatorio (MSA) y Muestreo Estratificado (ME), para inventario de biomasa y volumen.	63
Cuadro 25. Estimadores de Muestreo de Razón (ER) y Muestreo de Regresión (Ereg), para inventario de biomasa y volumen.....	66
Cuadro 26. Estimadores de Muestreo de Razón bajo Estratificación (ERE) para inventario de biomasa y volumen.....	67
Cuadro 27. Estimadores de Muestreo Simple Aleatorio (MSA) y Muestreo Estratificado (ME), para inventario de carbono almacenado.	67
Cuadro 28. Estimadores de Muestreo de Razón (ER) y Muestreo de Regresión (Ereg), para inventario de contenido de carbono.	69
Cuadro 29. Estimadores de Muestreo de Razón bajo Estratificación (ERE) para inventario de contenido de carbono.....	69

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo del carbono simplificado (Fuente: Lobianco et al. 2016; Ciaís y Sabine, 2013)	1
Figura 2. Localización del área de estudio.....	11
Figura 3. Distribución de biomasa promedio por componente estructural de seis especies de encino en Sierra de Santa Rosa, Guanajuato, México.....	16
Figura 4. Modelos ajustados para estimar biomasa por componente estructural del árbol: A) fuste, B) ramas, C) Follaje y D) Biomasa total, a través del sistema de ecuaciones 1.....	20
Figura 5. Patrón de asignación de biomasa para seis especies de encino, estimada a partir del sistema de ecuaciones 1.....	21
Figura 6. Biomasa total de grupos, se observa diferente patrón para cada grupo. Grupo 1: <i>Quercus rugosa</i> , <i>Q. candicans</i> y <i>Q. laurina</i> ; Grupo 2: <i>Q. obtusata</i> , <i>Q. coccolobifolia</i> y <i>Q. sideroxyla</i>	23
Figura 7. Comparación del desempeño a través del sesgo promedio porcentual de los sistemas de ecuaciones generados en este estudio (Sistema 1 y 2) y un sistema de ecuaciones reportado para especies de encinos en el norte de México.....	27
Figura 8. Localización del área de estudio.....	37
Figura 9. Distribución de biomasa promedio por componente (V_{rta} y V_r) de seis especies de encino en Sierra de Santa Rosa, Guanajuato, México.....	42
Figura 10. Estructura de residuales del volumen con respecto al volumen predicho de los modelos 3-7 (A) y 3-8 (B).....	43
Figura 11. Sistema de ecuaciones 2 para determinar volumen rollo total árbol (A), volumen de ramas (B) y Volumen total árbol (C) para encinos en Sierra de Santa Rosa, Guanajuato, México.....	46
Figura 12. Sesgo promedio para tres sistemas de ecuaciones aditivos y modelo de 1975 para estimar volumen total para encinos en Guanajuato, México.	47
Figura 13. Relación volumen-área basa (A) y biomasa-área basal (B) por hectárea.	65
Figura 14. Relación carbono-área basal.	68

INTRODUCCIÓN GENERAL

PROBLEMÁTICA AMBIENTAL DEL CAMBIO CLIMÁTICO.

Las mediciones atmosféricas demuestran un evidente y constante incremento en el promedio de la temperatura global. Este aumento se ha estimado en 0.8 °C durante las primeras décadas del siglo XXI, y un notable incremento a partir de 1975 (Hansen *et al.*, 2010).

Existe un creciente consenso entre la comunidad científica internacional de que el aumento de la temperatura es consecuencia del incremento de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, derivado de actividades humanas, y particularmente por la emisión de dióxido de carbono (CO₂) (CICC, 2017), ya que es uno de los principales GEI asociados al fenómeno de calentamiento global (Lobianco *et al.* 2016).

En la **Figura 1** se muestra de manera simplificada el ciclo global del carbono (C), con sus cuatro principales depósitos: atmósfera, biosfera terrestre, océanos y litosfera. Para cada sumidero se puede observar el carbono almacenado (CC) estimado, para el periodo 2006-2009, y sus principales flujos respecto los otros sumideros (Lobianco *et al.*, 2016).

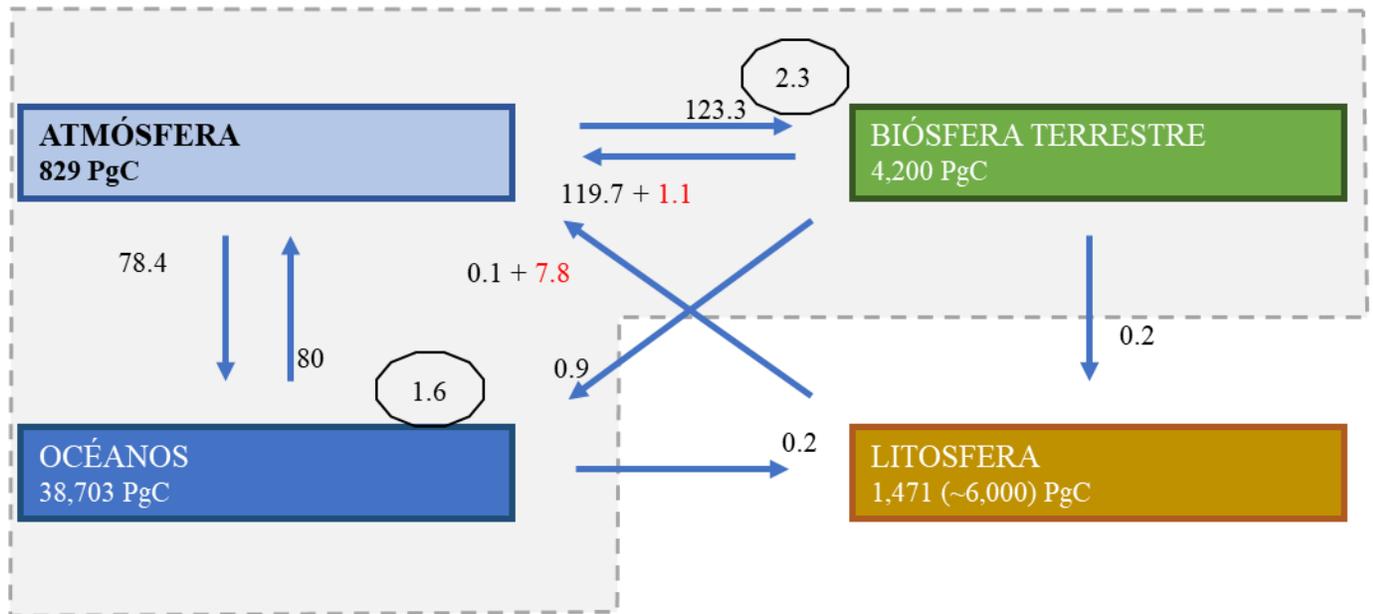


Figura 1. Ciclo del carbono simplificado (Fuente: Lobianco *et al.* 2016; Ciais y Sabine, 2013)

Los flujos entre la atmósfera y la biosfera terrestre incluyen la desgasificación del agua dulce, el cambio neto del uso de la tierra (en rojo), los flujos netos de la tierra y la meteorización de rocas; los flujos entre los océanos y la biosfera terrestre a la litosfera consisten en la sedimentación de CaCO_3 ; los flujos entre la litosfera y la atmósfera incluyen vulcanismo, combustibles fósiles y producción de cemento (los dos últimos en rojo). Los almacenes de C en la litosfera incluyen reserva de combustibles fósiles y, entre paréntesis, combustibles fósiles totales estimados que podrían recuperarse finalmente (alquitrán y petróleo pesado) (Lobianco *et al.* 2016).

EL PAPEL DE LOS ECOSISTEMAS FORESTALES

El largo historial de perturbaciones que han sufrido los bosques ha liberado grandes cantidades de CO_2 a la atmósfera, pero, actualmente, su recuperación y regeneración está revirtiendo el proceso. La cantidad de biomasa que los bosques almacenarán en el futuro dependerá en parte de cómo su biomasa actual alcance su máximo potencial (Brown, 1997).

Entre los ecosistemas terrestres, los bosques son el principal sumidero de C debido a su capacidad de captar CO_2 atmosféricos mediante el proceso de fotosíntesis y su almacenamiento por un prolongado periodo de tiempo en sus tejidos (CICC 2017). El C forestal se encuentra contenido en árboles vivos, la vegetación del sotobosque, materia orgánica muerta sobre el suelo (árboles muertos en pie, restos de madera y mantillo) y en la parte subterránea (raíces vivas y muertas y suelo mineral) (Ter-Mikaelian *et al.* 2015).

A pesar de que los bosques tropicales y boreales almacenan la mayor parte del C, existe una diferencia fundamental en su C estructural. Los bosques tropicales se almacenan el 56% del C en biomasa y el 32% en el suelo, mientras que bosques boreales contienen solamente el 20% en biomasa y el 60% en el suelo. Sin embargo, la estabilidad de los sumideros de carbono en los bosques boreales es el resultado de la gestión forestal, así como de las perturbaciones naturales en diferentes países y regiones (Pan *et al.*, 2011).

Las mayores densidades de C se encuentran en los bosques de América del Sur y de África occidental y central, que encierran alrededor de 120 Mg C ha^{-1} solamente en la biomasa viva. Mientras que el promedio mundial es cercano a las 74 Mg C ha^{-1} (FAO, 2015).

Los bosques pueden contribuir a atenuar estos impactos del cambio climático, aumentando la resiliencia de la sociedad, además genera múltiples beneficios, por ejemplo, al estabilizar las laderas. A su vez, la conservación de los ecosistemas forestales también contribuye a la

conservación de la biodiversidad y la conectividad ecológica a nivel de paisaje, lo que permitirá la migración de especies como respuesta adaptativa al cambio climático (CICC, 2017).

La adición de la captura de C a la lista de objetivos potenciales del manejo forestal está reflejada en demandas adicionales sobre los bosques y proporcionar oportunidades adicionales para los propietarios. Es importante destacar que el cambio climático también puede crear nuevas perturbaciones o interacciones entre los eventos de perturbación para los que pueden no aplicarse estrategias de comprensión y de gestión actuales (Millar *et al.*, 2007).

La capacidad de medir con exactitud y precisión el C almacenado en los bosques está ganando cada vez más atención mundial en reconocimiento del papel que los bosques tienen en el ciclo global del C, particularmente con respecto a la mitigación de las emisiones de CO₂ (Brown, 2002).

COMPROMISOS INTERNACIONALES Y NACIONALES

La necesidad nacional de información sobre el estado de los bosques ha aumentado considerablemente en los últimos años. Se ha pasado de necesitar únicamente información sobre la superficie forestal y las existencias en formación, a requerirse otros aspectos clave de la gestión sostenible de los bosques (FAO, 2017).

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), en diciembre de 2010, a través de la Conferencia de las Partes (COP 16), adoptó en Cancún una decisión titulada *“Enfoques de política e incentivos positivos sobre cuestiones relativas a la reducción de las emisiones por deforestación y degradación forestal en los países en desarrollo y el papel de la conservación, la gestión sustentable de los bosques y el aumento de las reservas de C de los bosques en los países en desarrollo”*, que actualmente se conoce como REDD+.

México, mediante su Sistema Nacional de Monitoreo Forestal, considera tres elementos (PFREDD+ y CSS, 2016): factores de emisión, datos de actividad e inventario de GEI. Este trabajo tiene cabida en el primer elemento (factores de emisión) que consiste en el cálculo de C que actualmente contienen los bosques y selvas del país, así como sus variaciones, mediante la generación de modelos matemáticos por medio de los cuales se puede determinar cuánto C almacena un árbol con base en datos como su diámetro y altura. Todo esto con la finalidad de reducir los errores asociados a la estimación (FAO, 2017).

BIOMASA Y CARBONO

De acuerdo con el IPCC¹ (2001), la biomasa es considerada como la masa total de organismos vivos en una zona o volumen determinado; a menudo se incluyen los restos de plantas que han muerto recientemente (biomasa muerta). Por otra parte, la FAO (1998) considera que la biomasa es el principal elemento para determinar la cantidad de C en el bosque.

Conocer la cantidad de biomasa de las especies arbóreas es fundamental para estimar la cantidad de C en el bosque. En la actualidad este proceso es considerado como un servicio ambiental y constituye una alternativa para el manejo forestal (Avendaño-Hernández *et al*, 2009).

Existen métodos directos e indirectos para estimar la biomasa aérea de un bosque. El método directo consiste en cortar el árbol y pesar la biomasa directamente. Otra forma es calcular la biomasa aérea de manera indirecta a través de ecuaciones y modelos matemáticos obtenidos por análisis de regresión entre las variables colectadas en terreno y en inventarios forestales (Brown 1997).

La dinámica de C en los ecosistemas forestales depende en gran medida de la biomasa del follaje, y aunque no es el depósito más importante en términos de cantidad (Lehtonen, 2005), es el principal responsable de los procesos de fotosíntesis-transpiración y de la captación total de C en el árbol (Zhang, 1997).

Lo sumideros de C se ven afectados principalmente por su dinámica. El equilibrio de los bosques boreales está determinado por los cambios en los patrones de cosecha, repoblación por abandono de tierras de cultivo y sus regímenes de perturbación. En los templados está impulsado principalmente por gestión forestal a través de una cosecha conservadora y reforestaciones a gran escala. Para los bosques tropicales, la deforestación y degradación forestal son la principal causa de emisiones de C. La repoblación y el aumento de bosques son los principales sumideros que equilibran las emisiones (Pan *et al.*, 2011), y en cada una de estas prácticas se encuentra la planeación y evaluación (gestión) de los recursos forestales que impactan directamente en los almacenes de C. Debido a esto importante estimar, evaluar y determinar la dinámica del ciclo del C en bosques que se encuentran bajo gestión forestal.

¹ Panel Intergubernamental del Cambio Climático

VOLUMEN

Los modelos de volumen total y comercial son herramientas empleadas en gestión de los recursos forestales esenciales en la estimación de existencias reales. La estimación confiable de volumen, biomasa y C por hectárea a través de expresiones matemáticas que toman referencia de mediciones de inventarios forestales, son una herramienta de alto valor en la planeación y gestión forestal, así como de la sostenibilidad de los ecosistemas forestales (Hernández-Ramos, 2016).

SOBRE EL GENERO *QUERCUS*.

En México, el género *Quercus* comprende entre 150 a 200 especies, con una gran diversidad morfológica, y existe un gran interés atribuido a su alta diversidad y a su importancia ecológica y económica (Valencia, 2004). En los ecosistemas de clima templado frío, los encinares, junto con los pinares, conforman estructuras uniformes y asociaciones ecológicas que pueden existir en masas puras, mezcladas, o bien, asociadas, con otras especies latifoliadas. Por lo general son árboles perennifolios o caducifolios con alturas de entre 3 hasta 25 m, con diámetros de 20 hasta 50 cm, con copas amplias y redondeadas cuando su crecimiento es libre, con hojas coriáceas y rígidas (Nixon, 1993).

El género *Quercus* forma parte de las especies de mayor importancia ecológica en los ecosistemas de pino – encino, por su distribución en los macizos montañosos de México, y forman el principal componente fisonómico en estos ecosistemas. Se presentan en un intervalo altitudinal entre los 1200 a 2800 m, resguardando mayor diversidad de especies por su estructura de crecimiento (Rezedowsky 1978). Este género se distribuye en los bosques templados, tropicales y matorrales de climas secos del hemisferio norte (Nixon, 1993).

Los bosques de encino guardan un potencial importante como fuente de servicios ambientales, pero a su vez son más vulnerables al ser utilizados para la fabricación de carbón vegetal, además de que es una de las principales especies para la generación de energía en las comunidades rurales de México (García-Molina, 2008).

ÁREA EL ESTUDIO

El presente proyecto de investigación se realizó en los bosques de la Sierra de Santa Rosa, Guanajuato. Esta se localiza al centro del estado de Guanajuato, abarcando los municipios de Guanajuato y Dolores Hidalgo. La vegetación está cubierta principalmente por encinares (con más

de 14 especies de *Quercus*). Estos bosques de encino se han encontrado bajo manejo en menor o mayor intensidad desde la época Virreinal, y aprovechamiento para la minería que se ha desarrollado en la región desde esa época.

Guanajuato es uno de los estados con menor producción forestal maderable con 211 m³ RTA de pino y 38,120 m³ RTA de encino, ocupando el lugar 19 en producción maderable, con un valor de producción de \$23,075,800.00 de pesos (SEMARNAT, 2016).

Es necesario aumentar el conocimiento del género *Quercus* como: la gran diversidad de género, su distribución, endemismos, hibridación y problemas taxonómicos. Siendo México el país con mayor riqueza y endemismo específico para *Quercus*, debido a fisiografía y disponibilidad de hábitats adecuados (Valencia, 2004).

A nivel nacional se ha desarrollado una actualización de los modelos para determinar volumen mediante sistemas biométricos, validados por especie y para uso regional. Este trabajo se desarrolló en 11 estados (Vargas-Larreta *et al.*, 2017), donde no se incluyó al estado de Guanajuato. Además, no cuenta con modelos que determinen biomasa para ninguna de las especies de importancia forestales en ese estado.

Esta investigación busca ampliar el conocimiento para el género y para las especies que se tomaron en campo mediante la generación de modelos volumen rollo total árbol (V_{rta}), volumen de ramas (V_r) y volumen total árbol (V_{ta}) para el género en la región, así como específicas para especie. También se elaboraron ecuaciones alométricas para estimar biomasa para el género, y específicos para especie. Con la información generada se determinó la biomasa y carbono almacenado en un bosque que se encuentra bajo gestión forestal.

OBJETIVOS

General

- Estimar biomasa de la parte aérea en bosques bajo gestión forestal en la Sierra de Santa Rosa, Guanajuato, México.

Específicos

- Generar modelos alométricos para estimar biomasa aérea total por especie y por componente estructural en bosques de encino.
- Desarrollar modelos alométricos por grupos de especies para encino.
- Actualizar y validar un modelo de volumen para el área de estudio.
- Estimar biomasa almacenada en bosques de encino en predios bajo gestión forestal.

CAPÍTULO 1. ECUACIONES ALOMÉTRICAS PARA ESTIMAR BIOMASA AÉREA DE ESPECIES DE ENCINO EN GUANAJUATO, MÉXICO

1.1. RESUMEN

Los bosques de encino juegan un papel importante desde el punto de vista ambiental, ya que funcionan como un gran almacén de carbono. Sin embargo, es necesaria la generación de ecuaciones alométricas para estimar con precisión su capacidad de fijación y almacenamiento de carbono atmosférico. Este trabajo está basado en un muestreo destructivo de 165 árboles de encino, con el objetivo de desarrollar ecuaciones alométricas para estimar la biomasa aérea de seis especies de *Quercus* sp. Se generaron modelos para estimar biomasa de componentes estructurales (fuste, ramas y follaje), donde mediante un sistema de ecuaciones simultaneo y la propiedad de aditividad se estimó la biomasa total (B_t) para las especies de encino, así como un modelo general. Para la mejora la capacidad predictiva de las ecuaciones se ajustaron modelos que incluyen las variables de diámetro normal (D_n), altura total (H), densidad (ρ) y gravedad específica de la madera (Ge). Los modelos con mejores parámetros de bondad de ajuste para el modelo general fueron: Modelo 1 $B_t = 0.074153D^{2.423372}H^{0.1744262}$, y Modelo 2 $B_t = 0.057707(\rho D_n^2 H)^{0.989101}$. Este último incluye la densidad de la madera como variable independiente. El mayor porcentaje de biomasa se concentró en el fuste con 60.6%, mientras que en las ramas y el follaje presentó 36.1 y 3.28%, respectivamente. Los modelos generados muestran buenos parámetros de bondad de ajuste. Las ecuaciones propuestas pueden ser utilizadas para la región, así como en bosques con características estructurales y de crecimiento similares a las de las comunidades de encino de la sierra de Guanajuato.

Palabras clave: biomasa aérea, componentes estructurales, distribución de biomasa, ajuste simultaneo, regresión iterativa aparentemente no relacionada.

1.2. INTRODUCCIÓN

El importante rol de los ecosistemas forestales como reservorios de C, ha generado una alta demanda en la precisión de la predicción de biomasa/carbono contenido en los árboles (Zhang *et al.*, 2017). Una estimación precisa de la biomasa es crucial para los diferentes fines que los usuarios necesiten, como un instrumento de planeación en la gestión forestal, para estudios científicos sobre productividad, y flujo de nutrientes, así como para la evaluación de cambios en el ciclo del C (Chave *et al.*, 2005; Henry *et al.*, 2010). Además de ser globalmente valorados por los bienes que proveen a la sociedad, los ecosistemas forestales son un factor importante en el balance del ciclo global del C y el calentamiento global (Pan *et al.* 2011; Bolaños *et al.*, 2017). Por estas razones existe la motivación para el uso de ecuaciones alométricas que permiten estimar biomasa, así como la necesidad de conocer la proporción de ella a través de los componentes estructurales de los árboles: raíz, fuste, corteza, ramas y hojas, a lo que se le ha llamado partición de biomasa (Aquino-Ramírez *et al.*, 2015; Sanquetta *et al.*, 2015). Estos modelos establecen la relación entre dimensiones del árbol como diámetro normal (D_n) con la biomasa total (B_t) o la contenida en algún componente estructural (Birdsey *et al.*, 2013). La inclusión de variables independientes adicionales como altura total (H), diámetro de copa (D_c), densidad (ρ) y gravedad específica (Ge) de la madera de las especies arbóreas, pueden mejorar la capacidad predictiva de los modelos de biomasa desarrollados (Chave *et al.*, 2005; Feldpausch *et al.*, 2012; Sileshi, 2014).

La elección de un modelo es una fuente de incertidumbre en la estimación de la biomasa en los bosques (van Breugel *et al.*, 2011), dado que puede variar sustancialmente dependiendo de la especie y sus condiciones de crecimiento. Varios estudios recomiendan el uso de modelos locales para lograr una mayor precisión cuando se ejecuta a escalas menores (Nam *et al.*, 2016). El entendimiento de la variación de biomasa a escala local es crucial para la evaluación de las existencias de carbono a escala regional (Nogueira *et al.*, 2012).

No se han desarrollado modelos de biomasa que sean suficientes, además la colecta de datos para su estimación no es sistemática en las diferentes regiones forestales de México, y no se cuenta con algún seguimiento a largo plazo (Bolaños *et al.*, 2017). Rojas-García *et al.* (2015) reportaron 478 ecuaciones alométricas para México concentradas principalmente en las familias Pinaceae, Fabaceae y Fagaceae, limitando la mayoría de los modelos desarrollados para el género *Quercus* spp. a uno general (multiespecie), debido a que son relativamente escasos los modelos por especie individual, a pesar de la alta diversidad específica de este género (CONABIO, 2016).

Se han realizado esfuerzos para desarrollar modelos que optimicen el conocimiento de los almacenes de C de especies del género *Quercus* en diferentes regiones de México, con importancia forestal por su producción maderable; por ejemplo, las ecuaciones desarrolladas para el norte de México por Vargas-Larreta *et al.* (2017). Aun así, las ecuaciones alométricas para este grupo de especies es limitado. Sin embargo, son necesarias puesto que estos bosques representan una superficie considerable del territorio nacional, ya sea en bosques mezclados con gimnospermas o masas mezcladas del mismo género. En esta situación se encuentra el estado de Guanajuato. Particularmente, la Sierra de Santa Rosa, donde no se han realizado estimaciones precisas de biomasa a nivel de árbol, lo cual es una limitante para el cálculo de la capacidad de almacenamiento de C de los bosques de la región.

1.3. OBJETIVOS

Los objetivos del presente trabajo fueron i) generar ecuaciones alométricas para estimar biomasa aérea total y por componente estructural por grupo de especies pertenecientes al género *Quercus*, y ii) generar ecuaciones alométricas específicas para estimar biomasa total y por componente estructural para seis especies del género *Quercus*, dominantes en los bosques de la Sierra de Santa Rosa, Guanajuato.

De los diferentes enfoques que existen para generar ecuaciones de biomasa total, este trabajo se basó en el ajuste de un sistema de ecuaciones por componente estructural en forma simultánea, y mediante la propiedad de aditividad de los parámetros.

1.4. MATERIALES Y MÉTODOS

1.4.1. Área de estudio

El estudio se realizó en predios de la Sierra de Santa Rosa, Guanajuato. El área se define como un bosque templado incoetáneo con diversas especies forestales, dentro de los municipios de Guanajuato y Dolores Hidalgo C. I. N. ($21^{\circ} 12' 52.65''$ N, $101^{\circ} 13' 30.80''$ O y $20^{\circ} 59' 11.79''$ N, $101^{\circ} 06' 23.36''$ O), en Guanajuato, México (**Figura 2**). Estos predios comprenden una superficie total de 6877.74 ha. La elevación sobre el nivel del mar varía entre 2000 y 2800 m. Se encuentra en las subprovincias fisiográficas Sierras y Llanuras del Norte de Guanajuato y Sierra de Guanajuato, en la región fisiográfica Mesa Central. De acuerdo al continuo nacional de edafología escala 1:250 000, los principales tipos de suelo en al área de estudio son Luvisol crómico, Regosol

esquelético y Phoezem lúvico (INEGI, 2014). El clima predominante es C(w2) y C(w1)(w), templado sub-húmedo con una temperatura media anual entre 12 y 18°C, precipitación anual de 200 a 1800 mm (INEGI, 2008).

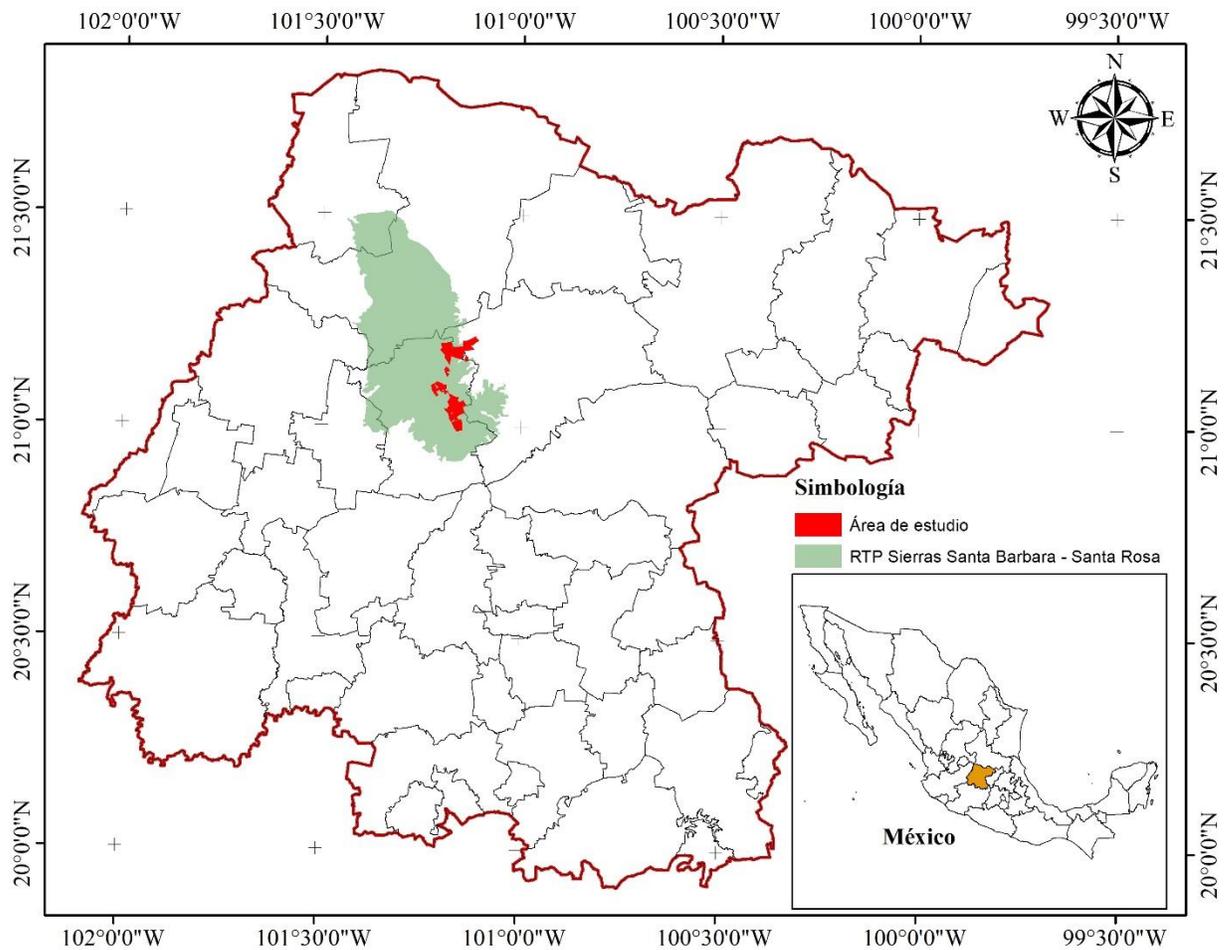


Figura 2. Localización del área de estudio.

Los bosques de encino de la Sierra de Santa Rosa se componen por 14 especies del género *Quercus*, y constituyen el principal componente arbóreo del bosque de la zona de estudio; en menor proporción se encuentran *Pinus teocote* Schiede ex Schltdl., *Arbutus* spp. y *Arctostaphylos pungens* Kunth (Martínez y Téllez 2004).

1.4.2. Trabajo de campo

La determinación de especies para la construcción de las ecuaciones de biomasa, se formalizó mediante el cálculo del Índice de Valor de Importancia Relativo (IVIR) de la comunidad de

Quercus spp. Los datos para el cálculo del IVIR se colectaron en parcelas del inventario para el programa de manejo de la región (Cabrera-Andrade *et al.*, 2014). Se seleccionaron seis especies por su importancia estructural en la comunidad (alto valor de IVIR) (**Cuadro 1**).

Se seleccionaron 165 árboles abarcando la mayor parte del espectro de tamaños (categorías diamétricas) con énfasis en diámetros pequeños y grandes. Con lo anterior, se intentó representar la variabilidad en tamaños existente en la masa forestal. El número de árboles cosechados por especie varió de 12 a 34 individuos (**Cuadro 1**).

Previo al derribo de los árboles, se les midió el diámetro normal (Dn en cm) medido a 1.3 m de altura sobre el nivel del suelo. Posterior al derribo, se tomó la altura total (H) en metros, incluyendo la altura del tocón. A cada árbol se le obtuvo el peso fresco separando cada componente estructural (fuste, ramas y follaje) con una báscula electrónica TORREY CRS-HD® de 500 kg \pm 0.1 kg de precisión. Se obtuvieron tres muestras aleatorias de cada componente estructural: ramas y follaje, las cuales se pesaron en campo (peso fresco en g) con una balanza marca RADWAG® de capacidad de 10 kg y precisión de 0.1 g; para el fuste, se cortaron tres discos de 5 cm de grosor de la base, parte media y parte superior, cada disco se pesó para obtener el peso fresco. Para determinar la relación peso seco (ps): peso fresco (pf), las muestras se secaron en laboratorio en una estufa Sheldon modelo 1675-S® a 70 °C hasta obtener un peso constate. La disminución del peso de las muestras se siguió con una balanza marca RADWAG® de capacidad de 10 kg y precisión de 0.1 g. Se determinó el contenido de humedad (CH) = $\left(1 - \frac{ps}{pf}\right)$, con el factor $r = \left(\frac{ps}{pf}\right)$ se estimó la biomasa para componente estructural (Bc) = $pf \times r$. La biomasa total (Bt) de cada árbol se obtuvo con la suma de la biomasa de los tres componentes estructurales (Acosta-Mireles *et al.*, 2002; Soriano-Luna *et al.*, 2015).

Cuadro 1. Especies muestreadas y parámetros dasométricos de los árboles muestreados.

Nombre Científico	n	Dn (cm)	H (m)	ρ (g cm ⁻³)	Bt (kg)
<i>Quercus rugosa</i> Née	26	7.6 - 44.5	5.9 - 17.8	0.600	10.2 - 1216.1
<i>Quercus obtusata</i> Bonpl.	34	6.2 - 37.6	4.9 - 14.2	0.828	6.9 - 725.9
<i>Quercus sideroxyla</i> Bonpl.	33	4.8 - 40.5	3.6 - 15.7	0.813	4.5 - 994.1
<i>Quercus coccolobifolia</i> Trel.	12	8.6 - 19.1	5.4 - 8.3	0.600	20.8 - 131.3
<i>Quercus laurina</i> Bonpl..	30	5.8 - 48.6	4.4 - 20.6	0.66	6.6 - 1471.2
<i>Quercus candicans</i> Née	30	6.6 - 41.6	6.1 - 16.9	0.694	9.9 - 1012.2
General	165	4.8-48.6	3.6-20.6		4.5 - 1471.2

Donde: diámetro normal (Dn), altura total (H), densidad de madera (ρ), y biomasa total (Bt).

1.4.3. Ajuste de modelos

Los modelos para estimar biomasa generalmente utilizan el diámetro normal (Dn) como variable independiente. Sin embargo, el empleo de la altura total (H) aumenta la capacidad predictiva del modelo de estimación de biomasa. La ausencia de esta variable puede llegar a sobreestimar la biomasa (Feldpausch *et al.*, 2012; Ruiz-Aquino *et al.*, 2014).

Después de obtener la biomasa de cada componente estructural y total de cada árbol, con datos de diámetro normal y altura se ajustaron diferentes modelos encontrados en la literatura que son ampliamente utilizados. Los modelos con mejor ajuste para cada componente se integraron a un sistema de ecuaciones simultáneas para garantizar que la biomasa total aérea fuera la suma de la biomasa por componente estructural (Parresol, 2001; Alvarez-González *et al.*, 2007).

$$Bt = B_{fuste} + B_{ramas} + B_{follaje}$$

De los diferentes modelos evaluados para estimar biomasa aérea total, se seleccionaron cuatro modelos (**Cuadro 2**). El modelo 1-1 sólo utiliza el Dn como variable independiente, mientras que los modelos 1-2 y 1-3 relacionan incluyen el Dn y H , y el modelo 1-4 incluye además la densidad de la madera. Cabe mencionar que el modelo 1-2 es una variante utilizado por Soriano *et al.* (2015) del modelo de variable combinada propuesta por Spurr (1952), donde el escalamiento de α_0 dentro de la función exponencial permite mejorar la sensibilidad de este parámetro.

Cuadro 2. Modelos con mejores parámetros de bondad de ajustes.

No. de modelo	Estructura del modelo	Referencia
1-1	$B = \alpha_0 Dn^{\alpha_1}$	Zhang <i>et al.</i> , 2017
1-2	$B = \exp(-\alpha_0)(Dn^2 H)^{\alpha_1}$	Soriano <i>et al.</i> , 2015
1-3	$B = \alpha_0 Dn^{\alpha_1} H^{\alpha_2}$	Schumacher – Hall
1-4	$B = \alpha_0 (\rho Dn^2 H)^{\alpha_1}$	Chave <i>et al.</i> , 2014

B : biomasa total o componente estructural (kg), Dn : diámetro normal (cm), H : altura (m), ρ : densidad de madera (g cm^{-3}) y α_i : parámetros a estimar.

La estimación de la biomasa total y parcial mediante el ajuste independiente de los componentes estructurales produce inconsistencias en estimación de la biomasa estimada total que han sido ampliamente documentadas (Parresol, 1999; Sanquetta *et al.*, 2015). Para eliminar las

inconsistencias varios estudios recomiendan garantizar la aditividad en un sistema de ecuaciones simultaneo (Parresol, 2001; Bi *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2017).

El ajuste simultaneo se realizó mediante el método de regresiones iterativas aparentemente no relacionadas (*Iterated Seemingly Unrelated Regression, ITSUR*), utilizando el procedimiento “Model” del paquete estadístico de SAS/ETS® (SAS Institute, Inc., 2011). Este método minimiza el error asociado al sistema de ecuaciones, y permite la obtención de estimadores consistentes de los componentes en los sistemas no lineales (Álvarez-González *et al.*, 2005). Álvarez-González (2007) menciona que el sistema de ecuaciones resultante del ajuste es siempre el mejor posible, aunque el ajuste de las ecuaciones de cada partición de forma individual no sea necesariamente el mejor. Es común que el ajuste de este tipo de ecuaciones presente heterocedasticidad, por lo que se empleó regresión ponderada para este problema (Parresol, 1999; Alvarez-González *et al.*, 2007).

Con esta metodología la estimación de biomasa por componente estructural se desarrolló bajo tres enfoques: un sistema de ecuaciones general o multiespecie que integra todas las especies cosechadas, un sistema de ecuaciones específicas para cada especie cosechada en este trabajo. Además, se crearon grupos de especies estadísticamente similares.

1.4.4. Grupos de especies

La biomasa total de las seis especies de encino se analizó de manera simultánea para conocer si existían diferencias estadísticas entre especies, y determinar si pudieran ser agrupadas mediante un análisis de covarianza. Se realizó una prueba de adicionalidad mediante un análisis de regresión lineal incorporando variables indicadoras (Montgomery y Peck, 1982; Aquino-Ramírez *et al.*, 2015), mediante la siguiente expresión:

$$Bt = \alpha_0 + \beta_1(Dn^2H) + \varepsilon \quad (1-5)$$

A está expresión se incorporó el factor de especie como variable indicadora:

$$Bt = [\alpha_0 + \alpha_1Z_1 + \alpha_2Z_2 + \dots + \alpha_5Z_5] + [\beta_0 + \beta_1Z_1 + \beta_2Z_2 + \dots + \beta_5Z_5](Dn^2H) + \varepsilon \quad (2-6)$$

$$Z_1 = \begin{cases} 1, \text{ si pertenece a } Q. \text{ coccolobifolia} \\ 0, \text{ de otra forma} \end{cases}$$

$$Z_2 = \begin{cases} 1, \text{ si pertenece a } Q. \text{ rugosa} \\ 0, \text{ de otra forma} \end{cases}$$

$$Z_3 = \begin{cases} 1, \text{ si pertenece a } Q. \text{ sideroxyla} \\ 0, \text{ de otra forma} \end{cases}$$

$$Z_4 = \begin{cases} 1, \text{ si pertenece a } Q. \text{ laurina} \\ 0, \text{ de otra forma} \end{cases}$$

$$Z_5 = \begin{cases} 1, \text{ si pertenece a } Q. \text{ candicans} \\ 0, \text{ de otra forma} \end{cases}$$

Donde: Bt es biomasa total aérea del árbol (kg), Dn es el diámetro normal (cm), H es la altura (m), Z_1, \dots, Z_5 son las variables indicadoras, α_0, β_0 son los parámetros de regresión y $\beta_1 \dots \beta_5$ los parámetros de regresión debido a la adicionalidad, y ε el error.

Como especie base se consideró a *Quercus obtusata*, dado que representa la mayor densidad en comunidades de encinales en la Sierra de Santa Rosa, Guanajuato. Para agrupar a las especies como un solo grupo o grupos, se consideró la homogeneidad de pendientes ($H_0 = \beta_1 = \dots = \beta_5$) (Aquino *et al.*, 2015).

1.4.5. Validación de modelos

El ajuste de los modelos se verificó mediante la técnica de validación cruzada, evaluando la precisión. Además, se realizaron análisis numéricos y gráficos de los residuales que permite diagnosticar posibles anomalías de los modelos utilizados. El error absoluto promedio porcentual (MAPE por sus siglas en inglés) y el sesgo se cuantificó utilizando la ecuación 1-7 propuesto por Sileshi (2014), con las siguientes estructuras:

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|M_o - M_p|}{M_o} \quad (1-7)$$

$$BIAS = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{M_p - M_o}{M_o} \quad (1-8)$$

Donde: M_o y M_p son la biomasa observada y predicha del árbol, respectivamente, y n es el número de árboles. Siendo el Sesgo Ec. (1-8) el estadístico muy frecuente usado para comparar el desempeño de los modelos (Sileshi, 2014).

Para análisis numérico se consideró el coeficiente de determinación ajustada (R^2_{adj}) que expresa la variabilidad explicada por el modelo tomando en cuenta el número de parámetros. Asimismo, se tomó en cuenta la raíz del cuadrado medio del error (RCME) que define la precisión de las

estimaciones (Aquino et al., 2015), el error absoluto promedio porcentual (MAPE), y el sesgo promedio (BIAS) que evalúa el comportamiento del modelo (Forrester *et al.*, 2017).

1.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1.5.1. Distribución de biomasa individual

En el **Cuadro 1** se muestran los intervalos de las variables de Dn , H y Bt de los arboles cosechados pertenecientes a las seis especies muestreadas. La biomasa de fuste y ramas aumentan proporcionalmente conforme aumenta el tamaño del árbol; aunque la biomasa de ramas presenta mayor variación que la de fuste. La mayor proporción de biomasa en los encinos muestreados se concentró en fuste con un promedio de 60.6 %, mientras que la proporción para ramas fue en promedio del 36.1%, y de 3.28% en el follaje (**Figura 3**). Árboles grandes de *Q. obtusata* y *Q. sideroxyla* presentaron mayor biomasa de ramas que de fuste. Aunque es común que existan diferencias entre especies y dentro de la misma especie (Wang, 2006; Soriano-Luna *et al.*, 2015).

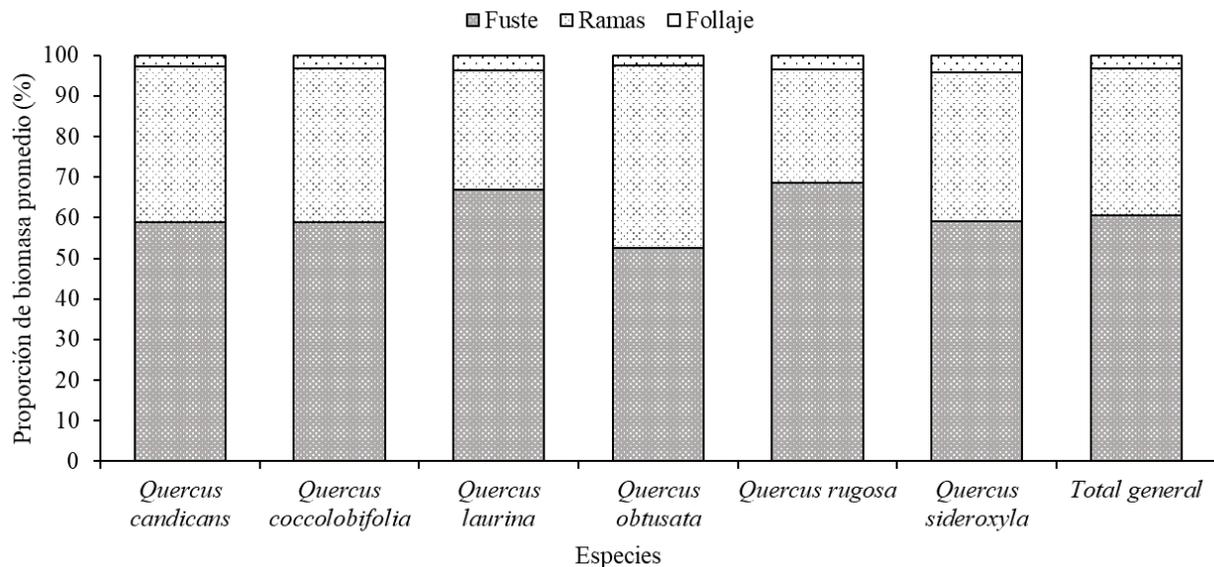


Figura 3. Distribución de biomasa promedio por componente estructural de seis especies de encino en Sierra de Santa Rosa, Guanajuato, México.

1.5.2. Modelos de biomasa por componente estructural

Este enfoque incluyó a todos los árboles cosechados de las seis especies. Se seleccionaron los modelos con mejores parámetros estadísticos de bondad de ajuste para estimar biomasa de cada componente estructural. Los modelos incluyeron el Dn y H del árbol para estimar biomasa de fuste y ramas, mientras que para follaje se utilizó una función exponencial del Dn (**Cuadro 3**). El uso de la variable de densidad de la madera (ρ) reportada por Sotomayor (2015) presentó buen ajuste, pero inferior al modelo 1-3 de forma Schumacher y Hall, utilizado para ajustar fuste y ramas **Cuadro 4** y **Cuadro 5**. En ambos sistemas de ecuaciones la biomasa de follaje se estimó utilizando sólo el Dn como variable independiente (**Cuadro 3**).

Cuadro 3. Sistema de ecuaciones para determinar biomasa por componente estructural y total.

Sistema de ecuaciones 1	Sistema de ecuaciones 2
$B_f = \alpha_0 D^{\alpha_1} H^{\alpha_2}$	$B_f = \alpha_0 (\rho D n^2 H)^{\alpha_1}$
$B_r = \alpha_3 D^{\alpha_4} H^{\alpha_5}$	$B_r = \alpha_2 (\rho D n^2 H)^{\alpha_3}$
$B_h = \alpha_6 D^{\alpha_7}$	$B_h = \alpha_4 D^{\alpha_5}$

B_f : biomasa de fuste (kg), B_r : biomasa de rama (kg), B_h : biomasa de follaje (kg), Dn : diámetro normal (cm), H : altura (m), ρ : densidad de madera (g cm^{-3}) y α_i : parámetros a estimar.

En el **Cuadro 4** y **Cuadro 5** se presentan los estimadores de los parámetros, así como los estadísticos de bondad de ajuste de los sistemas de ecuaciones 1 y sistema de ecuaciones 2, respectivamente, desarrolladas en este estudio. Se observa una ligera disminución en el RMSE y R^2_{adj} en el sistema de ecuaciones 2.

Cuadro 4. Parámetros estimados y estadísticos de bondad de ajuste del Sistema de Ecuaciones 1, para estimar biomasa por componente estructural y biomasa total.

Parámetro	Estimador	Error Std	Valor de t	Pr > t
Biomasa por componente estructural				
α_0	0.03367	2.91E-03	11.55	<0.0001
α_1	1.853235	0.0422	43.88	<0.0001
α_2	0.982072	0.0558	17.61	<0.0001
α_3	0.027143	0.00668	4.06	<0.0001
α_4	3.228496	0.0966	33.41	<0.0001
α_5	-0.82824	0.1065	-7.78	<0.0001
α_6	0.005954	0.00147	4.04	<0.0001
α_7	2.246321	0.0731	30.71	<0.0001
	Componente	Modelo	RMSE	R²adj
	Fuste	1-3	26.6329	0.9705
	Ramas	1-3	45.6342	0.8913
	Follaje	1-1	3.4853	0.8086
	Total	Σ	54.1079	0.9653
Parámetro	Estimador	Error Std	Valor de t	Pr > t
Biomasa total*				
α_0	0.074153	0.0110	6.74	<0.0001
α_1	2.423372	0.0615	39.43	<0.0001
α_2	0.174426	0.0728	2.40	0.0177
	Componente	Modelo	RMSE	R²adj
	Total*	1-3	53.6211	0.9659

* Biomasa total estimada a partir de biomasa total observada.

Cuadro 5. Parámetros estimados y estadísticos de bondad de ajuste del Sistema de Ecuaciones 2, para estimar biomasa por componente estructural y biomasa total empleando modelos que incluyen la densidad de madera (ρ) como variable independiente.

Parámetro	Estimador	Error Std	Valor de t	Pr > t
Biomasa por componente estructural				
α_0	0.00676	1.33E-03	5.1	<0.0001
α_1	1.155141	0.0204	56.74	<0.0001
α_2	0.486602	0.0261	18.66	<0.0001
α_3	0.631701	0.0045	140.43	<0.0001
α_4	1.383732	0.107	12.93	<0.0001
α_5	1.121362	0.034	32.99	<0.0001
	Componente	Modelo	RMSE	R²adj
	Fuste	1-4	42.3445	0.9255
	Ramas	1-4	69.713	0.7462
	Follaje	1-1	4.9442	0.6149
	Total	Σ	63.8259	0.9517
Parámetro	Estimador	Error Std	Valor de t	Pr > t
Biomasa total*				
α_0	0.057707	0.00955	6.04	<0.0001
α_1	0.989101	0.0177	55.86	<0.0001
	Componente	Modelo	RMSE	R²adj
	Total*	1-4	59.7288	0.9577

*Biomasa total estimada a partir de biomasa total observada.

El sistema de ecuaciones que estima la biomasa de especies de encino en sus componentes de fuste y follaje, fue el modelo 1-3 de forma Schumacher y Hall (**Cuadro 4**). Los estadísticos de bondad de ajuste son los menores en términos del RMSE y altos en la R^2 ajustada. Además, para la estimación de la biomasa total el sistema de ecuaciones 1 mostró los mejores estadísticos de bondad de ajuste en comparación con el sistema de ecuaciones 2 (que incluye la densidad de la madera como variable independiente).

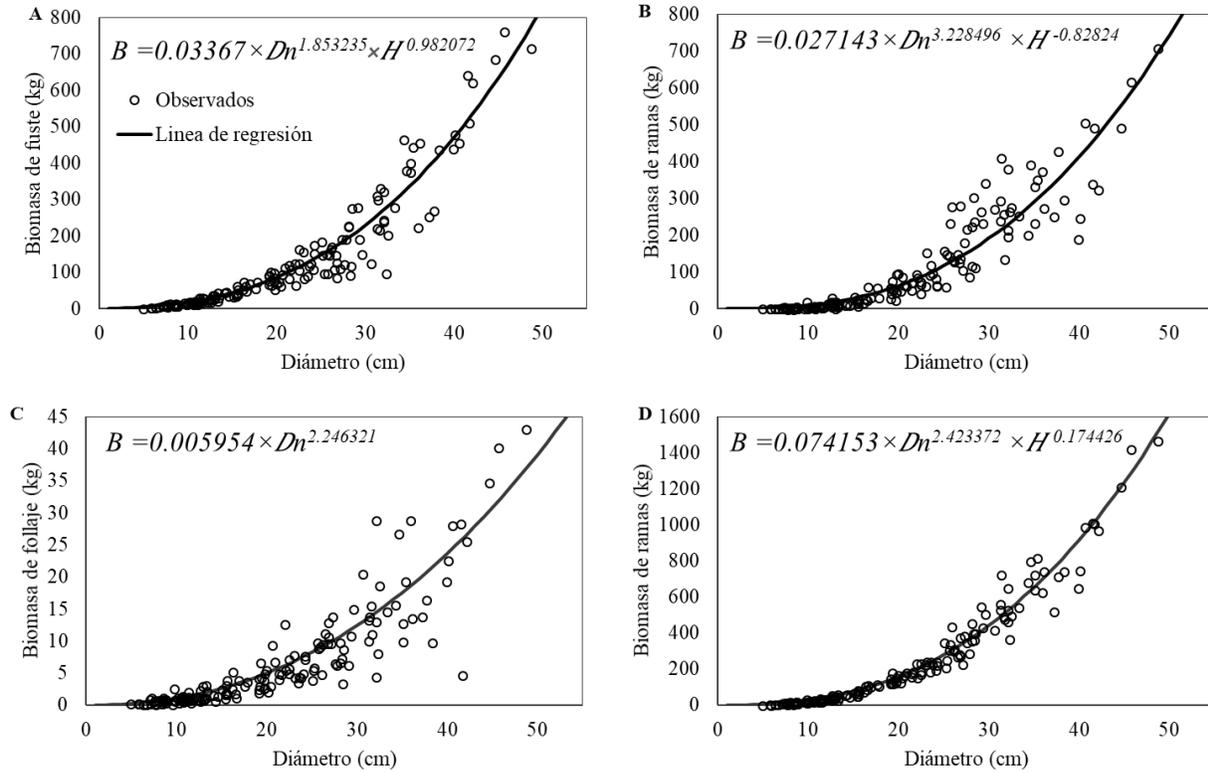


Figura 4. Modelos ajustados para estimar biomasa por componente estructural del árbol: A) fuste, B) ramas, C) Follaje a través del sistema de ecuaciones 1 y D) Biomasa total (M 1-4).

Al utilizar el sistema de ecuaciones 1 para analizar la partición de biomasa con el aumento del tamaño del árbol, se observó una disminución de la proporción de biomasa del fuste, la cual fue máxima en individuos menores a 15 cm de diámetro normal. El mismo patrón se presentó para la biomasa de follaje, el cual fue máxima en árboles pequeños. Por su parte, con el aumento del tamaño del árbol la proporción de biomasa de ramas aumentó (**Figura 5**). En promedio, la proporción de biomasa fue de 56.49% (± 6.28), 40.42% (± 6.77) y 3.09% (± 0.52), para fuste, ramas y follaje, respectivamente.

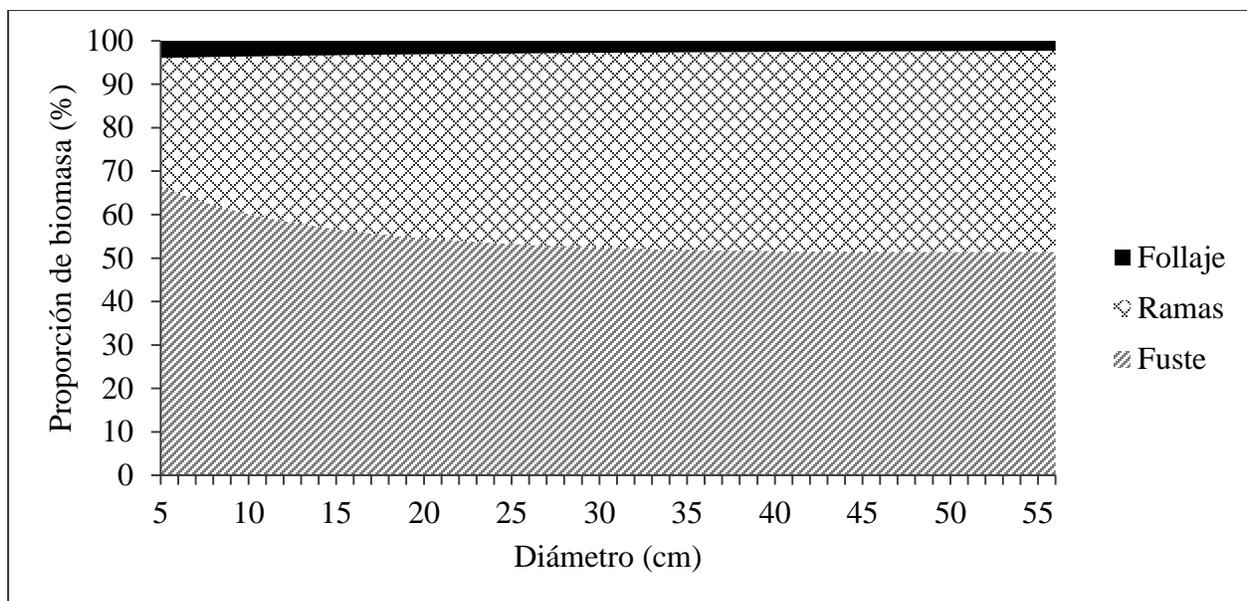


Figura 5. Patrón de asignación de biomasa para seis especies de encino, estimada a partir del sistema de ecuaciones 1.

1.5.3. Ecuaciones alométricas por grupo de especies

Los resultados obtenidos en el análisis de covarianza (**Cuadro 6**) indican que existe evidencia suficiente para agrupar a las seis especies de encino en dos grupos, donde las especies *Q. rugosa*, *Q. candicans* y *Q. laurina*, presentaron diferencias significativas entre las pendientes ($\beta_0 = \beta_2$, $p = < 0.0001$; $\beta_0 = \beta_3$, $p = < 0.0001$; $\beta_0 = \beta_4$, $p = < 0.0001$) con respecto a *Quercus obtusata*. Lo anterior sugiere la posibilidad de agrupar estas especies en “Grupo 1”, mientras que en las especies *Q. sideroxylla*, *Q. coccolobifolia* sus parámetros no son significativos respecto a la especie base *Q. obtusata*, por lo que se agruparon en el “Grupo 2” (**Cuadro 6**). Los parámetros estimados y estadísticos de bondad de ajuste de los modelos para el grupo de especies 1 y 2, se presentan en el **Cuadro 7**.

El uso de variables indicadoras en un análisis de covarianza de un modelo lineal ayudó a encontrar diferencias significativas en la biomasa debido a las características propias de las especies. Esto permite agrupar en función de la similitud alométrica entre ellas como lo sugiere Picard *et al.* (2012).

Cuadro 6. Valores de la prueba de análisis de covarianza para discernir el posible agrupamiento de especies.

Especie	Parámetro	Estimador	Valor t	Pr< t
<i>Q. obtusata</i>	α_0	-9.44442	-0.61	0.5404
	β_0	0.046068	20.29	<0.0001
<i>Q. coccolobifolia</i>	α_1	8.100332	0.22	0.8885
	β_1	-0.000004	-0.00	0.9998
<i>Q. rugosa</i>	α_2	2.701167	0.13	0.8991
	β_2	-0.01141	-4.39	<0.0001
<i>Q. sideroxylla</i>	α_3	17.13583	0.86	0.3912
	β_3	0.00327	-1.12	0.2638
<i>Q. laurina</i>	α_4	-3.44984	-0.17	0.8663
	β_4	-0.01331	-5.53	<0.0001
<i>Q. candicans</i>	α_5	15.27748	0.72	0.4743
	β_5	-0.01067	-3.95	0.0001

α_0 y β_0 : parámetros de la regresión; β_1 : parámetro de adicionalidad debido a *Q. coccolobifolia*; β_2 : parámetro de adicionalidad debido a *Q. rugosa*; β_3 : parámetro de adicionalidad debido a *Q. sideroxylla*; β_4 : parámetro de adicionalidad debido a *Q. laurina*; β_5 : parámetro de adicionalidad debido a *Q. candicans*.

Si bien las diferencias son entre grupos son estadísticas, estas están dadas por la densidad de la madera, así como por la arquitectura de las diferentes especies analizadas (Basuki *et al.*, 2009; Aquino-Ramírez *et al.*, 2015). De los grupos identificados se observa que el Grupo 2 contiene más biomasa por unidad de volumen (expresado como la variable combinada Dn^2H) (**Figura 6**). Lo anterior se debe a que las especies que lo conforman, *Quercus coccolobifolia*, *Q. sideroxylla* y *Q. obtusata*, poseen una densidad de la madera más alta que las del Grupo 1. Al respecto, Sotomayor (2015) reporta una densidad de la madera de 0.6, 0.813 y 0.828 g cm⁻³, respectivamente, para las tres especies mencionadas.

Cuadro 7. Parámetros estimados y estadísticos de bondad de ajuste de sistema de ecuaciones para determinar biomasa en grupos de encinos en Guanajuato, México.

Biomasa de componentes estructurales y total	RMS E	R ²	Biomasa de componentes estructurales y total	RMS E	R ²
Grupo 1			Grupo 2		
$Bf = 0.031052 * Dn^{1.992101} H^{0.835385}$	29.88	0.98	$Bf = 0.072967 * Dn^{2.087881} H^{0.32756}$	27.71	0.90
$Br = 0.002501 * (Dn^2 H)^{1.165467}$	58.46	0.85	$Br = \exp(-5.345159) * (Dn^2 H)^{1.168119}$	46.78	0.86
$Bh = 0.005943 * Dn^{2.239402}$	4.06	0.80	$Bh = 0.004423 * (Dn^2 H)^{2.346752}$	2.69	0.82
$Bt = \sum Bi$	68.89	0.96	$Bt = \sum Bi$	39.23	0.97

Dn = diámetro normal (cm), H = altura total (m), Bf = biomasa de fuste (kg), Br = biomasa de ramas (kg), Bh = Biomasa de follaje (kg), Bt = biomasa aérea total ($Bf + Br + Bh$) (kg), RMSE es la raíz del cuadrado medio del error.

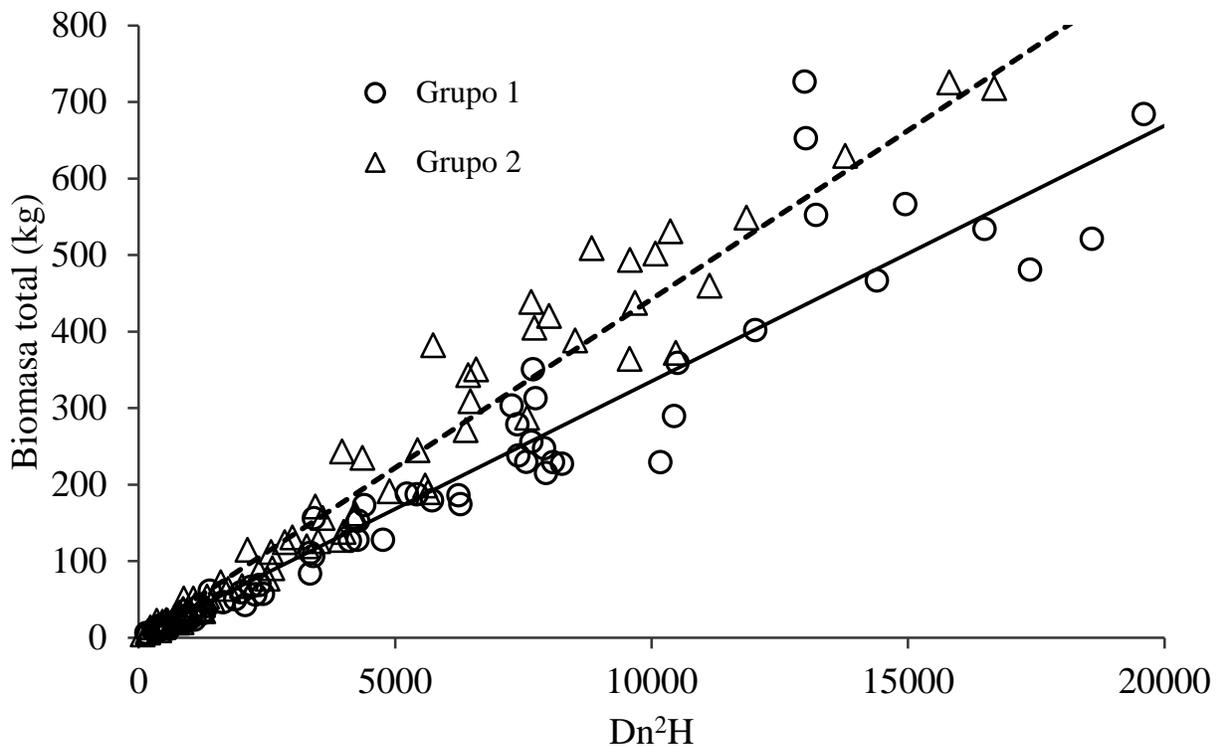


Figura 6. Biomasa total de grupos, se observa diferente patrón para cada grupo. Grupo 1: *Quercus rugosa*, *Q. candicans* y *Q. laurina*; Grupo 2: *Q. obtusata*, *Q. coccolobifolia* y *Q. sideroxila*.

1.5.4. Modelos específicos

Se desarrollaron seis sistemas de ecuaciones, uno para cada especie de encino incluidas en este estudio. Estos sistemas cumplieron con la propiedad de aditividad y fueron consistentes para que la suma de las estimaciones de biomasa de cada componente estructural (fuste, ramas y follaje) fuera similar a la biomasa total estimada. Los modelos específicos presentaron buenos coeficientes de determinación ($R^2 > 0.93$) para la estimación de Bt . Los coeficientes de determinación más bajos se presentaron en los modelos para estimar biomasa de follaje (**Cuadro 8**). Este componente estructural es uno de los más complicados para lograr un buen ajuste.

Cuadro 8. Parámetros estimados y estadísticos de bondad de ajuste de sistema de ecuaciones para determinar biomasa de seis especies de encino en Guanajuato, México.

Biomasa de componentes estructurales y total	RMSE	R ²	Biomasa de componentes estructurales y total	RMSE	R ²
<i>Quercus coccolobifolia</i>			<i>Q. rugosa</i>		
$Bf = \exp(-2.720472) * (Dn^2 H)^{0.871993}$	4.21	0.96	$Bf = \exp(-0.582646) * Dn^{1.812402}$	47.09	0.93
$Br = \exp(-6.861464) * (Dn^2 H)^{1.385174}$	9.45	0.77	$Br = \exp(-5.676428) * (Dn^2 H)^{1.144757}$	64.86	0.78
$Bh = \exp(-2.097929) * Dn$	0.69	0.34	$Bh = 0.001091 * Dn^2 H$	4.11	0.82
$Bt = \sum Bi$	9.28	0.94	$Bt = \sum Bi$	72.48	0.95
<i>Q. candicans</i>			<i>Q. sideroxyla</i>		
$Bf = \exp(4.775313) * Dn^{1.798292} * H^{1.570775}$	26.78	0.96	$Bf = \exp(-2.988285) * Dn^{1.613082} * H^{1.16314}$	17.79	0.97
$Br = \exp(-3.547008) * Dn^{2.593972}$	47.84	0.86	$Br = \exp(-4.317865) * Dn^{3.305381} * H^{-0.64785}$	25.53	0.96
$Bh = \exp(-4.752007) * Dn^2$	2.58	0.60	$Bh = \exp(-4.613824) * Dn^{2.16245}$	2.40	0.91
$Bt = \sum Bi$	69.02	0.93	$Bt = \sum Bi$	26.52	0.99
<i>Q. laurina</i>			<i>Q. obtusata</i>		
$Bf = \exp(-3.184629) * Dn^{2.025824} * H^{0.690906}$	34.31	0.98	$Bf = \exp(-3.53684) * Dn^{2.043763} * H^{0.759522}$	31.37	0.86
$Br = \exp(-6.893717) * (Dn^2 H)^{1.247303}$	44.92	0.94	$Br = \exp(-5.803952) * (Dn^2 H)^{1.224292}$	50.74	0.84
$Bh = \exp(-4.816123) * Dn^{2.174373}$	3.23	0.92	$Bh = \exp(-6.181035) * Dn^{2.488617}$	2.01	0.82
$Bt = \sum Bi$	60.25	0.98	$Bt = \sum Bi$	50.50	0.94

Dn = diámetro normal (cm), H = altura total (m), Bf = biomasa de fuste (kg), Br = biomasa de ramas (kg), Bh = Biomasa de follaje (kg), Bt = biomasa aérea total ($Bf + Br + Bh$)(kg), RMSE es la raíz del cuadrado medio del error.

La raíz del cuadrado medio del error (RMSE) varió en el intervalo de 9.28 a 72.48 kg de biomasa aérea total (*Bt*) (Cuadro 8). Mientras que los mismos estadísticos para la biomasa de componentes estructurales varió en 4.21-47.09, 9.45-64.86, 0.69-4.11 kg para el fuste, ramas y follaje respectivamente.

Ecuaciones específicas para estimar la biomasa individual de especies arbóreas, son convenientes para determinar de manera precisa los almacenes de C en ecosistemas forestales. Sin embargo, en bosques mezclados con un gran número de especies, el desarrollo de ecuaciones específicas es muy costoso y a menudo no es posible encontrar el número suficiente de árboles para la construcción del modelo. En esta situación, es recomendable el desarrollo de ecuaciones para grupos de especies con características estructurales o de densidad de la madera similares. Este es el caso de los bosques mezclados de especies de encino, donde debido a su gran diversidad, es difícil contar con ecuaciones específicas para regiones particulares.

A pesar del gran esfuerzo en la generación de ecuaciones alométricas de biomasa para grupos de encinos en México, aun existen vacíos para regiones específicas. En este estudio se generaron dos sistemas de ecuaciones para seis especies de encino. Asimismo, se generaron ecuaciones específicas para cada una de ellas. Los resultados concuerdan con los obtenidos para otras especies del mismo género, aunque varían ligeramente en la biomasa de ramas y follaje (Gómez et al., 2011; Vargas-Larreta *et al.*, 2017). Resultados similares fueron obtenidos por Gómez-García y Pérez-Rodríguez (2015) donde estimaron que la biomasa total de *Quercus* spp. varía entre el 61% y el 69% en fuste mientras que en la copa (ramas y follaje) entre el 31% a 39% de la biomasa total. Ruiz-Aquino *et al.* (2014) reportó que para *Q. laurina* y *Q. crassifolia* el promedio de biomasa de fuste fue mayor al 82%. Las diferencias entre especies en la asignación de biomasa entre componentes estructurales de sus individuos, se deben a la arquitectura de la copa de cada especie, la cual a su vez está determinada por las condiciones ambientales a lo largo de su distribución natural (Henry *et al.*, 2010; Nam *et al.*, 2016).

La inclusión de la variable de densidad de la madera (ρ) disminuyó ligeramente el ajuste de los parámetros para estimar biomasa de los componentes estructurales, así como de la biomasa total. Esta variable suele ser muy importante para el ajuste de modelos de biomasa de especies arbóreas en regiones tropicales (Chave *et al.*, 2005), mientras que para los bosques templados se ha observado que la inclusión de la altura (*H*) ayuda a mejorar la estimación en mayor medida que la

densidad de la madera (Henry *et al.*, 2010). En el proceso de modelaje, se presentaron algunos problemas con el supuesto de homocedasticidad, donde la varianza de los residuos debe ser constante y no variar en los diferentes niveles de los regresores. Para garantizar este supuesto se utilizó la metodología propuesta por Harvey (1976) mediante el uso de una ponderación de los residuales (Alvarez-González *et al.*, 2007).

Aun cuando se ha observado que diámetro normal es la principal variable independiente para estimar la biomasa total y por componente estructural del árbol (Forrester *et al.*, 2017), la inclusión de la altura total incrementó la precisión en la estimación de la biomasa en las seis especies muestreadas en este estudio. Estudios similares han señalado la necesidad de incluir la altura total para evitar sobreestimaciones de biomasa principalmente en árboles de grandes dimensiones (Feldpausch *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2017). Sin embargo, dependiendo de los objetivos del usuario, así como de la bondad de ajuste y los datos disponibles, existe la posibilidad de incluir esta o más variables tales como el diámetro de copa, densidad de la madera o área basal.

Se encontraron diferencias en las estimaciones de las ecuaciones presentadas en este estudio con respecto a las publicadas previamente para especies de encino en México. El modelo general propuesto por Vargas-Larreta *et al.* (2017) para especies de encino de Durango, México, tiende a sobrestimar ligeramente la biomasa en diámetros inferiores a 35 cm, mientras que subestima en diámetros > a 35 cm.

En el **Cuadro 9** se presenta la comparación de la capacidad de estimación del sistema de ecuaciones 1 y 2 desarrollados en este trabajo, y el del sistema propuesto Vargas-Larreta (2017) para especies de encino del norte de México.

Cuadro 9. Comparación de error y sesgo para estimar biomasa total entre los sistemas propuestos (1 y 2), y el sistema de ecuaciones propuesto por Vargas-Larreta *et al.* (2017).

Estadísticos	Sistema 1	Sistema 2	Vargas-Larreta <i>et al.</i> (2017)
Error absoluto medio (%) (MAPE)	18.79	25.40	43.70
Sesgo (%)	11.46	15.77	37.93

Los tres modelos se evaluaron mediante validación cruzada en “10-fold”. El sistema 1 tiene un error absoluto promedio porcentual inferior de 18.8%, mientras el sistema 2 tiene un error

ligeramente superior de 25,4%. No se observaron diferencias estadísticas entre estos sistemas de ecuaciones. El modelo propuesto por Vargas-Larreta *et al.*, (2017) mostró el mayor error porcentual para los datos de este trabajo. El sesgo tuvo un comportamiento similar al descrito para el error. En la **Figura 7** se puede observar el comportamiento del error para los tres modelos evaluados.

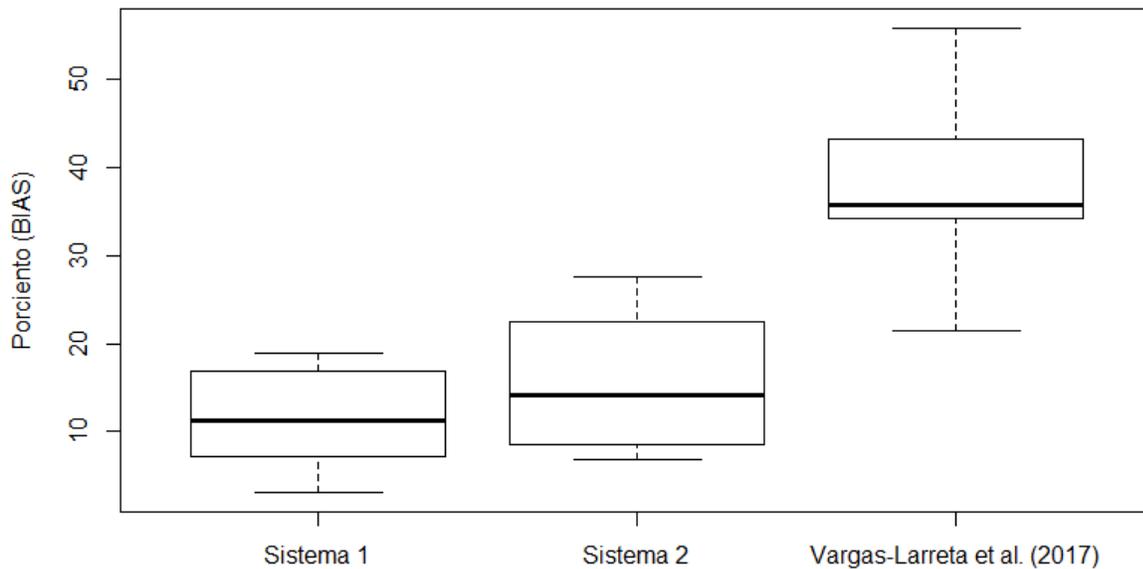


Figura 7. Comparación del desempeño a través del sesgo promedio porcentual de los sistemas de ecuaciones generados en este estudio (Sistema 1 y 2) y un sistema de ecuaciones reportado para especies de encinos en el norte de México.

El sistema de ecuaciones 1 fue el más preciso de los cuatro modelos evaluados. El modelo de Nívar *et al.* (2009) y el sistema 2 que incluye densidad de la madera (ρ) como variable independiente, resultaron marginalmente similares en su sesgo; mientras que el modelo de Nívar *et al.* (2009) es más preciso comparando el error de estimación de los modelos. El sistema de ecuaciones propuesto por Vargas-Larreta *et al.* (2017) presenta mayor error y sesgo a los demás modelos. Dado que este último sistema fue desarrollado en el norte de México, es normal que su desempeño resultara menos eficiente que el desarrollado en este estudio, dado que los modelos locales siempre son más precisos (Chave *et al.*, 2005, 2014; Nam *et al.*, 2016). Las razones son variadas y una de ellas es que las

características arquitectónicas y estructurales de los árboles varían de acuerdo con las condiciones ambientales prevalecientes a lo largo de su distribución natural (natural), además que se trata de diferentes especies. Pero aun cuando fueron incluidas dos especies iguales, el crecimiento de estas también puede variar de acuerdo a las mismas condiciones ambientales y con las características de los rodales y mezcla de especies (Figueroa *et al.*, 2010).

1.6. CONCLUSIONES

La diferencia estadística en la biomasa total de las seis especies de encino se le atribuye a la densidad de la madera a través del árbol y su morfología. Los encinos de la Sierra de Santa Rosa, Guanajuato, como otras especies de latifoliadas, presentaron una alta proporción de biomasa de ramas, llegando a tener una proporción 1:1 con respecto a la biomasa de fuste; y en algunos casos fue mayor la biomasa de ramas que de fuste.

Los sistemas de ecuaciones de biomasa propuestos son buenos predictores de biomasa para árboles individuales. Su uso en comunidades dominadas por especies de encino en la región donde fueron generados, y en bosques con condiciones estructurales y de crecimiento similares, contribuirán a la una mayor precisión en las estimaciones de los stocks de biomasa y C, y así determinar su papel funcional en el almacenamiento de C y su papel en la mitigación del cambio climático.

RECONOCIMIENTOS

El presente trabajo fue financiado por el Programa de Paisajes Sustentables de la Agencia para el Desarrollo Internacional de Estados Unidos de América, a través de la Oficina de Programas Internacionales del Servicio Forestal del Departamento de Agricultura, y el Northern Research Station, a través del proyecto "Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y mejoramiento del manejo forestal en México". También se agradece a Industrial Santa Fe S. P. R. y a su Representante legal Ing. Marco Antonio González López, por el financiamiento de jornales para la toma de datos en campo.

1.7. LITERATURA CITADA

- Acosta-Mireles, M., J. Vargas-Hernández, A. Velázquez-Martínez y J. D. Etchevers-Barra (2002). Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia* 6:725-736.
- Álvarez-González, J. G., M. A. Balboa M., A. Merino y R. Rodríguez S. 2005. Estimación de la biomasa arbórea de *Eucalyptus globulus* y *Pinus pinaster* en Galicia. *Recursos Rurais* 1:21-30.
- Álvarez-González, J. G., R. Rodríguez-Soalleir y A. Rojo-Alboreca. 2007. Resolución de problemas del ajuste simultáneo de sistemas de ecuaciones: heterocedasticidad y variables dependientes con distinto número de observaciones. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales* 23: 35-42.
- Aquino-Ramírez, M., A. Velázquez-Martínez, J. F. Castellanos-Bolaños, H. De los Santos-Posadas y J. D. Etchevers-Barra. 2015. Partición de la biomasa aérea en tres especies arbóreas tropicales. *Agrociencia* 49: 299-314.
- Basuki, T. M., P. E. van Laake, A. K. Skidmore and Y. A. Hussin. 2009. Allometric equations for estimating the above-ground biomass in tropical lowland dipterocarp forest. *Forest Ecology and Management* 257: 1684-1694.
- Birdsey, R., G. Angeles-Pérez., W. A. Kurz., A. Lister., M. Olguin., Y. Pan., C. Wayson, B. Wilson and K. Johnson. 2013. Approaches to monitoring changes in carbon stocks for REDD+. *Carbon Management* 4(5): 519-537.
- Bolaños-González, Y., M. A. Bolaños-González, F. Paz-Pellat y J. I. Ponce-Pulido. 2017. Estimación de carbono almacenado en bosques de oyamel y ciprés en Texcoco, Estado de México. *Terra Latinoamericana* 35: 73-86.
- Brown, S. 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests: A Primer. FAO Forestry Paper 134. Food and Agriculture Organization, Rome, Italy. 55 p.
- Cabrera-Andrade A., J. M. Cabrear-Landeros e I. Cabrera-Landeros. 2014. Refrendo de la autorización de aprovechamiento de recursos forestales maderables “Industrial Santa Fé S. de R. L.”. Consultores en Manejo Forestal Sustentable S. C. Guanajuato, México. 151 p.
- Challenger, A. 1998. Utilización de los Ecosistemas Terrestres de México. Pasado, Presente y Futuro. Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO). México. 847 p.

- Chave, J., C. Andalo, S. Brown, M. A. Cairns, J. Q. Chambers, D. Eamus, H. Föölster, F. Fromard, N. Higuchi, T. Kira, J. P. Lescure, B. W. Nelson, H. Ogaea, H. Puig, B. Riéra and T. Yamakura. 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia* 145: 87-99.
- Chave, J., M. Réjou-Méchain, A. Búrquez, E. Chidumayo, M. S. Colgan, W. B. C. Delitti, A. Duque, T. Eid, P. M. Fearnside, R. C. Goodman, M. Henry, A. Martínez-Yrizar, W. A. Mugasha, H. C. Muller-Landau, M. Mencuccini, B. W. Nelson, A. Ngomanda, E. M. Nogueira, E. Ortiz-Malavassi, R. Pélissier, P. Plotton, C. M. Ryan, J. G. Saldarriaga and G. Vieilledent. 2014. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology* 20: 3177–3190. doi: 10.1111/gcb.12629
- CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad). 2016. Estrategia nacional sobre la biodiversidad de México (ENBioMex) y plan de acción 2016 – 2030. CONABIO, México. 383 p.
- Feldpausch, T. R., J. Lloyd, S. L. Lewis, R. J. W. Brienen, M. Gloor, A. Monteagudo M., G. Lopez G., L. Banin, K. Abu Salim, K. Affum-Baffoe, M. Alexiades, S. Almeida, I. Amaral, A. Andrade, L. E. O. C. Aragão, A. Araujo M., E. J. M. M. Arets, L. Arroyo, G. A. Aymard C., T. R. Baker, O. S. Bánki, N. J. Berry, N. Cardozo, J. Chave, J. A. Comiskey, E. Alvarez, A. de Oliveira, A. Di Fiore, G. Djagbletey, T. F. Domingues, T. L. Erwin, P. M. Fearnside, M. B. França, M. A. Freitas, N. Higuchi, E. Honorio C., Y. Iida, E. Jiménez, A. R. Kassim, T. J. Killeen, W. F. Laurance, J. C. Lovett, Y. Malhi, B. S. Marimon, B. H. Marimon-Junior, E. Lenza, A. R. Marshall, C. Mendoza, D. J. Metcalfe, E. T. A. Mitchard, D. A. Neill, B. W. Nelson, R. Nilus, E. M. Nogueira, A. Parada, K. S.-H. Peh, A. Pena C., M. C. Peñuela, N. C. A. Pitman, A. Prieto, C. A. Quesada, F. Ramírez, H. Ramírez A., J. M. Reitsma, A. Rudas, G. Saiz, R. P. Salomão, M. Schwarz, N. Silva, J. E. Silva E., M. Silveira, B. Sonké, J. Stropp, H. E. Taedoumg, S. Tan, H. ter Steege, J. Terborgh, M. Torello R., G. M. F. van der Heijden, R. Vásquez, E. Vilanova, V. A. Vos, L. White, S. Willcock, H. Woell, and O. L. Phillips. 2012. Tree height integrated into pantropical forest biomass estimates. *Biogeosciences*. 9: 3381–3403. doi:10.5194/bg-9-3381-2012
- Figueroa-Navarro, C. M., G. Ángeles-Pérez, A. Velázquez-Martínez y H. M. de los Santos-Posadas. 2010. Estimación de la biomasa en un bosque bajo manejo de *Pinus patula* Schltdl. et Cham. en Zacualtipán, Hidalgo. *Revista mexicana de ciencias forestales* 1: 105-112.

- Forrester, D. I., I. H. H. Tachauer, P. Annughoefer, I. Barbeito, H. Pretzch, R Ruiz.Peinado, H. Stark, G. Vacchiano, T. Zlatanov, T. Chakraborty, S. Saha and G. W. Sileshi. 2017. Generalized biomass and leaf area allometric equations for European tree species incorporating stand structure, tree age and climate. *Forest Ecology and Management* 396: 160–175. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2017.04.011>
- Gómez D., J. D., J. D. Etchevers B., A. I. Monterroso R., J. Campo A., and J. A. Tinoco R. 2011. Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Quercus magnoliaefolia*. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 17: 261-272.
- Gómez-García, E., F. Pérez-Rodríguez. 2015. Evolución de la biomasa y del carbono acumulado por *Quercus robur* en Galicia (España). *Bosque* 36(2):255-264. doi: 10.4067/S0717-92002015000200011
- Harvey, A. C. 1976. Estimadeting regression models with multiplicative heteroscedasticity. *Econometrica* 44: 461-465.
- Henry, M., A. Besnard, W.A. Asante, J. Eshun, S. Adu-Bredu, M. Bernoux, L. Saint-André and R. Valentini. 2010. Wood density, phytomass variations within and among trees, and allometric equations in a tropical rainforest of Africa. *Forest Ecology and Management* 260: 1375–1388.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2008. Conjunto de datos vectoriales escala 1: 1000000. Unidades climáticas. <http://www.beta.inegi.org.mx/temas/mapas/climatologia/> (Consulta: septiembre de 2017)
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2014. Conjunto de datos vectorial edafológico escala 1: 250000 Serie II (Continuo Nacional). http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/edafologia/vectorial_serieii.aspx. (Consulta: septiembre de 2017)
- Martínez-Cruz, J. y O. Téllez-Valdés. 2004. Listado florístico de la sierra de Santa Rosa, Guanajuato, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 74: 31-49.
- Montgomery D., C., and E. A. Peck. 1982. *Introduction to linear regression analysis*. Wiley. New York. 504 p.
- Nam T., V., M. van Kuijk and N. P. R. Anten. 2016. Allometric equations for aboveground and belowground biomass estimations in an evergreen forest in Vietnam. *PloS ONE* 11: 1-19. doi:10.1371/journal.pone.0156827.

- Návar, J. 2009. Allometric equations for tree species and carbon stocks for forests of northwestern Mexico. *Forest Ecology and Management* 257: 427-434.
- Nogueira, L. A. J., R. Suwa, G. H. Pires M.R., T. Kajimoto, J. dos Santos, R. Pereira S., C. A. Sampaio S., P. Castro B., H. Noguchi, M. Ishizuka and N. Huguchi. 2012. Allometric models for estimating above- and below-ground biomass in Amazonian forests at São Gabriel da Cachoeira in the upper Rio Negro, Brazil. *Forest Ecology and Management* 277: 163–172.
- Pan, Y., R. A. Birdsey, J. Fang, R. Houghton, P. E. Kuppri, W. A. Kurz, O. L. Phillips, A. Schvidenko, S. L. Lewis, J. G. Canadell, P. Ciais, R. B. Jackson, S. W. Pacala, A. D. McGuire, S. Piao, A. Rautiainen, S. Sitch and D. Hayes. 2011. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science* 333:988–993.
- Parresol, B. R. 1999. Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons. *Forest Science* 45: 573-593.
- Parresol, B. R. 2001. Additivity of nonlinear biomass equations. *Canadian Journal of Forest Research* 31: 865-878.
- Picard N., L. Saint-André y M. Henry. 2012. Manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles: del trabajo de campo a la predicción. Las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y el Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Rome, Montpellier, 223 p.
- Rojas-García, F., B. H. J. De Jong, P. Martínez-Zurimendí and F. Paz-Pellat. 2015. Database of 478 allometric equations to estimate biomass for Mexican trees and forests. *Annals of Forest Science* 72: 835-864. doi: 10.1007/s13595-015-0456-y
- Ruiz-Aquino, F., J. H. Valdez-Hernández, F. Manzano-Méndez, G. Rodríguez-Ortiz, A. Romero-Manzanares y M. E. Fuentes-López. 2014. Ecuaciones de biomasa aérea para *Quercus laurina* y *Q. crassifolia* en Oaxaca, México. *Madera y Bosques* 20(2):33-48.
- Sanquetta, C. R., A. Behling, A. P. Dalla C., S. Péllico N., A. B. Schikowski and M. K. do Amaral. 2015. Simultaneous estimation as alternative to independent modeling of tree biomass. *Annals of Forest Science* 72:1099–1112. doi: 10.1007/s13595-015-0497-2
- SAS Institute Inc. 2011. SAS/STAT® 9.3. User's Guide. Cary, NC. SAS Institute Inc.

- Schumacher, E. X. and F. D. S. Hall. 1933. Logarithmic expression of timber-tree volume. *Journal of Agricultural Research* 4: 719-734.
- Sileshi, G. W. 2014. A critical of forest biomass estimation models, common mistakes and corrective measures. *Forest Ecology and Management* 329: 237-254.
- Soriano-Luna, M. A., G. Ángeles-Pérez, T. Martínez-Trinidad, F.O. Plascencia-Escalante y R. Rázo-Zarate. 2015. Estimación de biomasa aérea por componente estructural en Zacualtipán, Hidalgo, México. *Agrociencia* 49: 423-438.
- Sotomayor C., J. R. 2015. Comportamiento elástico de la madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 319 p.
- Spurr, H. 1952. *Forest inventory*. Ronald Press, New York, USA. 476 p.
- van Breugel, M., J. Ransijn, D. Craven, F. Bongers and J. S. Hall. 2011. Estimating carbon stock in secondary forests: decisions and uncertainties associated with allometric biomass models. *Forest Ecology and Management* 262:1648-1657.
- Vargas-Larreta, B., C. A. López-Sánchez, J. J. Corral-Rivas, J. O. López-Martínez, C. G. Aguirre-Calderón and J. G. Álvarez-González. 2017. Allometric Equations for Estimating Biomass and Carbon Stocks in the Temperate Forests of North-Western Mexico. *Forests* 8, 269. doi:10.3390/f8080269
- Wang, C. 2006. Biomass allometric equations for 10 co-occurring tree species in Chinese temperate forests. *Forest Ecology and Management* 222: 9–16.
- Zhang, X., Q.V. Co, C. Xiang, A. Duan and J. Zhang. 2017. Predicting total and component biomass of Chinese fir using a forecast combination method. *iForest* 10: 687-691. doi: 10.3832/ifor2243-010

CAPÍTULO 2. VOLUMEN DE SEIS ESPECIES DE ENCINO EN SIERRA DE SANTA ROSA, GUANAJUATO, MÉXICO.

2.1. RESUMEN

La adecuada cuantificación del volumen de árboles individuales, ya sea total, de fuste o de ramas es una herramienta importante para la administración y gestión de los recursos forestales. El objetivo fue proponer una herramienta actual para cuantificar el volumen total árbol (V_{ta}), el volumen de fuste (V_{rta}) y el volumen de ramas (V_r) en bosques naturales de la sierra de Santa Rosa, Guanajuato, Gto., Se empleó información de 165 árboles, de seis especies de encino. Donde se evaluaron tres sistemas de ecuaciones aditivos para la estimación de V_{ta} , además se compararon con el modelo generado en 1976 en el “Inventario Forestal del Estado de Guanajuato”. Se emplearon variables indicadoras para conocer la posibilidad de agrupar las especies mediante un análisis de covarianza, demostrando que existen diferencias estadísticas entre estas. Mediante validación cruzada se evaluaron los tres sistemas, así como el modelo de 1976, donde no existieron evidencias de que sean diferentes estadísticamente uno del otro al estimar V_{ta} . Mediante el sistema de ecuaciones que incluye el volumen de los componentes V_{rta} y V_r . Nuevos modelos no se habían desarrollado para la región, donde se garantiza que la suma de ambos componentes es igual al V_{ta} mediante la propiedad de aditividad. El sistema que presentó los mejores parámetros de bondad de ajuste fue el que utilizó la estructura del modelo de Schumacher-Hall para estimar V_{rta} , mientras que para estimar V_r se empleó una proporción del V_{rta} . Este sistema se utilizó para estimar volumen por especie y multiespecie. El Factor de Forma de *Quercus laurina*, *Q. candicans*, *Q. obtusata* y *Q. rugosa* fue de tipo cónico con un ff de 0.31, 0.34, 0.35 y 0.36 respectivamente, mientras que, para *Q. sideroxyla* es de 0.39 y *Q. coccolobifolia* de 0.42, teniendo más semejanza el fuste del árbol a un paraboloides.

Palabras clave: encinos, volumen comercial, volumen ramas, distribución de volumen, aditividad.

2.2. INTRODUCCIÓN

México es el segundo centro de diversidad del género *Quercus* a nivel mundial, lo que le confiere gran interés por parte de la comunidad científica, tanto por su diversidad específica como por su relevancia ecológica (Valencia, 2004). El aprovechamiento con fines maderables de las especies de encino es limitado, debido a que durante el proceso de industrialización se requiere de técnicas y cuidados diferentes a los que se emplean en coníferas (Honorato-Salazar y Fuentes-López, 2001). Por otro lado, el carácter simpodial (patrón de ramificación) de su crecimiento, en muchos casos ha limitado el interés de su estudio para el desarrollo de metodologías que permitan estimar con precisión los inventarios de madera en regiones donde estas especies son dominantes.

Una de las principales herramientas para la silvicultura y gestión forestal es el contar con un sistema que determine la cubicación precisa del volumen total y comercial de madera contenida en árboles individuales. En México, la mayoría de los modelos se han desarrollado y aplicado para las especies de pino, mientras que para latifoliadas estos están disponibles en menor proporción (Muñoz-Flores *et al.* 2012). La utilización y perfeccionamiento de estos sistemas ha aumentado durante las últimas dos décadas debido principalmente a la capacidad de procesamiento de grandes bases de datos de los sistemas de cómputo actuales, donde se recomienda que la construcción de modelos debe ser desarrollados por especie y para uso regional (Vargas-Larreta *et al.*, 2017).

En años recientes se han desarrollado modelos de cubicación en pie como el propuesto por Tamarit-Urias *et al.* (2017) para el género *Quercus* en el estado de Puebla, y Pompa-García *et al.* (2009) en el noroeste del estado de Chihuahua. En encinos como en latifoliadas, el volumen de ramas (V_r) ha sido despreciado, principalmente enfocándose en la estimación del volumen rollo total árbol (V_{rta}), aunque el V_r llega a ser una proporción considerable del V_{rta} .

En el estado de Guanajuato se han utilizado modelos para estimar volumen que fueron elaborados en la década de 1970 (SAG, 1976). A pesar de que el estado no es uno de los principales productores forestales, cuenta con una producción maderable de pino y encino considerable, en una superficie forestal de 442,417.38 ha (SEMARNAT – CONAFOR, 2015).

Los bosques de encino de la sierra de Santa Rosa, Guanajuato, se encuentran habitados por 14 especies del *Quercus* sp. Estos constituyen el principal componente aéreo del bosque de la zona de estudio, siendo este bosque la principal comunidad vegetal cohabitando en asociaciones con *Pinus teocote* Schiede ex Schltdl., *Arbutus* spp. y *Arctostaphylos pungens* Kunth (Martínez y Téllez 2004). En la región no se han desarrollado modelos actuales para la cubicación en pie. Con el

presente estudio se pretende ajustar modelos para determinar: volumen rollo total, volumen de ramas y volumen total.

2.3. OBJETIVOS

Los objetivos del estudio fueron i) generar un sistema de ecuaciones para estimar volumen rollo total, de ramas y total para seis especies de encino, ii) generar un sistema de ecuaciones para estimar volumen comercial, de ramas y total por grupo de especies y general (multiespecie) en bosques bajo gestión forestal en la sierra de Santa Rosa, Guanajuato, México.

2.4. MATERIALES Y MÉTODOS

2.4.1. Área de estudio

El estudio se realizó en predios de la sierra de Santa Rosa, Guanajuato, caracterizado por ser un bosque templado incoetáneo con diversas especies de importancia forestal. Esta sierra se encuentra dentro de los municipios de Guanajuato y Dolores Hidalgo, en la cual se ubica un conjunto predial denominado “Sierras de Santa Rosa y Guanajuato” (21° 12’ 52.65’’ N, 101° 13’ 30.80’’ O y 20° 59’ 11.79’’ N, 101° 06’ 23.36’’ O) (**Figura 8**). Comprenden una superficie total de 6877.74 ha. La elevación sobre el nivel del mar varía entre los 2000 y 2800 m. Se encuentra en las subprovincias fisiográficas Sierras y Llanuras del Norte de Guanajuato y Sierra de Guanajuato, en la región fisiográfica Mesa Central. De acuerdo al continuo nacional de edafología escala 1:250 000 los principales tipos de suelo en al área de estudio son Luvisol crómico, Regosol esquelético y Phoezem lúvico (INEGI, 2014). El clima predominante es C(w2) y C(w1)(w), templado sub-húmedo con una temperatura media anual entre 12 y 18°C, precipitación anual de 200 a 1800 mm (Arriaga *et al.*, 2000; INEGI, 2008).

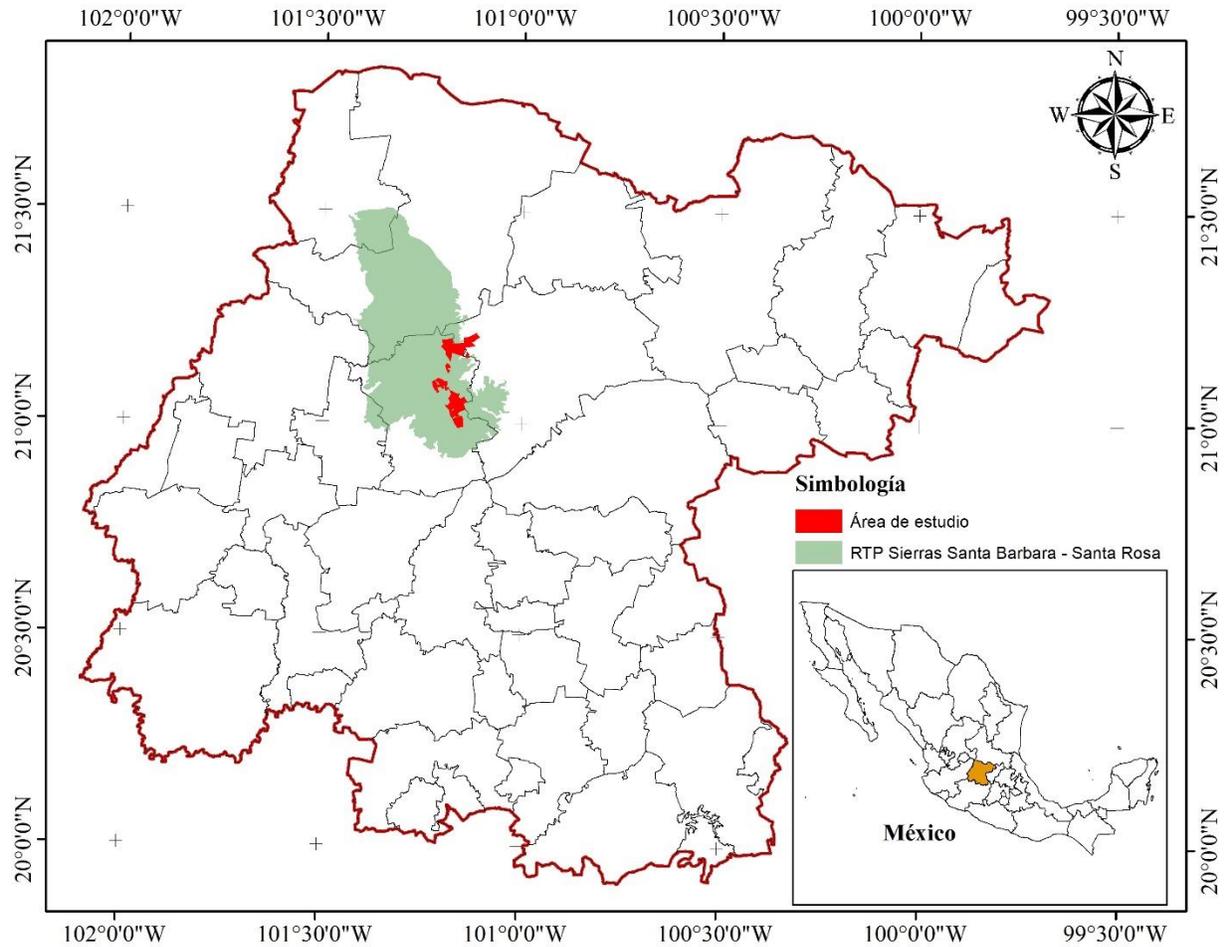


Figura 8. Localización del área de estudio.

2.4.2. Selección de arbolado

En el estudio se utilizó información de 165 árboles contemplando la mayor parte del espectro de categorías diamétricas, con lo que se intentó representar la variabilidad existente en la masa forestal. El número de árboles por especie se distribuyó de la siguiente manera: 34 árboles de *Quercus obtusata*, 33 de *Q. sideroxylla*, 30 de *Q. laurina*, 30 *Q. candicans*, 26 de *Q. rugosa* y 12 de *Q. coccolobifolia*. Estas especies representan más del 90% de la diversidad de especies arbóreas de los bosques en la zona de estudio. Los árboles de la muestra tuvieron una distribución de clase diamétrica de 4.8 a 48.6 cm de rango. La altura total (H) se midió posterior al derribo incluyendo la altura del tocón.

2.4.3. Factor de forma

El factor de forma (*ff*) es una característica numérica asociada a la forma del fuste del árbol, comparada con el volumen de cilindro teórico ($V_{\text{árbol}} \approx V_{\text{cilindro}}$), pero también se puede relacionar con algún otro cuerpo geométrico como un cono o paraboloides, compartiendo las mismas dimensiones de la base como de altura (Romahn y Ramírez, 2006). En este trabajo se estimó el *ff* mediante la pendiente del volumen fustal (β) empleando la variable combinada (Dn^2H), y se asume que Dn y H del cilindro son los mismos. El volumen se correlaciona con Dn^2 y la H , bajo este contexto el volumen del cilindro es:

$$V_{\text{cilindro}} = \frac{\pi}{40000} \times Dn^2 \times H \quad (2-1)$$

Donde el volumen del árbol siempre será menor al volumen del cilindro teórico, por lo que el volumen del árbol debe de ser proporcional al volumen del cilindro multiplicado por una constante ($V_{\text{árbol}} \approx V_{\text{cilindro}} \times c$) menor a uno ($c < 1$), de aquí que C es el factor de forma (*ff*) de los árboles. Esto lleva al modelo siguiente, en donde el volumen del árbol será aproximadamente igual al volumen del cilindro por su constante de proporcionalidad (Tlaxcala-Mendez *et al.*, 2016):

$$V_{\text{árbol}} \approx c \times \frac{\pi}{40000} \times Dn^2 \times H \quad (2-2)$$

Entonces:

$$V_{\text{árbol}} \approx \beta \times Dn^2H \quad (2-3)$$

Esto conduce a la expresión que representa el modelo del coeficiente mórfo constante, asumiendo un intercepto cero de la siguiente manera:

$$V_{\text{árbol}} \approx \beta \times (Dn^2H) + \varepsilon \quad (2-4)$$

Eventualmente los árboles tienen un diámetro mínimo invariable asumiendo volumen cero, originando el siguiente modelo de variable combinada (Tlaxcala-Mendez *et al.*, 2016):

$$V_{\text{árbol}} \approx \alpha + \beta \times (Dn^2H) \times \frac{1}{k} + \varepsilon \quad (2-5)$$

Donde α reflejará el efecto del diámetro mínimo invariable y β será la constante de forma siempre que se considere a la constante $k = \pi/40000$. A lo que el ff se puede expresar de la siguiente manera:

$$ff = \frac{\beta \times 4}{\pi} \quad (2-6)$$

ff es el factor de forma

β es la pendiente del volumen fustal

π es la constante pi

2.4.4. Estimación de volumen

Los modelos lineales y no lineales ampliamente utilizados para estimar volumen son los mostrados en el **Cuadro 10**.

Cuadro 10. Modelos con mejores ajustes evaluados.

Modelo	Ecuación	No. de Modelo
Schumacher y Hall	$V = \alpha_0 Dn^{\alpha_1} H^{\alpha_2}$	2-7
Spurr no lineal	$V = \alpha_0 (Dn^2 H)^{\alpha_1}$	2-8
Spurr lineal	$V = \alpha_0 + \alpha_1 (Dn^2 H)$	2-9
Takata	$V = Dn^2 H / (\alpha_0 + \alpha_1 Dn)$	2-10
Exponencial	$V = \alpha_0 Dn^{\alpha_1}$	2-11

V : volumen total, fuste o ramas (m^3), Dn : diámetro normal (cm), H : altura (m) y α_i : parámetros a estimar.

2.4.5. Volumen de fuste ($Vrta$)

El volumen de fuste ($Vrta$) se consideró hasta que el fuste presentó bifurcación en la copa del árbol. Previo al derribo se midió el Dn a la altura de 1.3 m sobre el suelo. Posterior al derribo del árbol a partir del diámetro normal (Dn) se midió en intervalos o secciones de 1.0 m de longitud, tomando registro de los diámetros de cada sección.

Se generaron 1080 pares de diámetros (d) y alturas a lo largo del fuste (Hm). La cubicación se realizó mediante el método de trozas traslapadas de Bailey (1995), el cual utilizó como principio la fórmula de Newton y el método del centroide de Wiant *et al.* (1992).

2.4.6. Volumen de ramas (V_r)

Para cada individuo se determinó el volumen de ramas (V_r) mediante la cubicación de secciones de longitud variable pero no mayor a 2.0 m de longitud y se calculó el volumen de cada sección mediante la fórmula de Smalian. La punta de las ramas, se cubico con la fórmula del cono.

2.4.7. Volumen total árbol (V_{ta})

Posterior a la obtención del volumen de fuste y de ramas para cada árbol, con datos de D_n y H se ajustaron diferentes modelos encontrados en la literatura ampliamente utilizados (**Cuadro 10**). Donde los modelos que presentaron mejores parámetros de bondad de ajuste para cada componente, se integraron a un sistema de ecuaciones simultáneas. Lo anterior para garantizar que el volumen total (V_{ta}) fuera la suma del volumen de fuste (V_{rta}) y ramas (V_r), mediante la propiedad de aditividad (Parresol, 2001; Alvarez-González *et al.*, 2007).

2.4.8. Validación cruzada, bondad de ajuste y criterios de selección

La selección del mejor modelo se basó en el ajuste de los modelos de volumen, mediante validación cruzada, evaluando su precisión, además de análisis numéricos y gráficos de los residuales, lo que permite diagnosticar posibles anomalías en la predicción de los modelos.

Para análisis numérico se consideró el coeficiente de determinación ajustada (R^2_{adj}) que expresa la variabilidad explicada por el modelo tomando en cuenta el número de parámetros, y la raíz del cuadrado medio del error (RCME) que define la precisión de las estimaciones (Aquino *et al.*, 2015). Además, se utilizó el coeficiente de variación (CV), el sesgo (\bar{E}).

El ajuste simultaneo se realizó mediante el método de regresión iterativa aparentemente no relacionadas (*Iterated Seemingly Unrelated Regression, ITSUR*), utilizando el procedimiento “Model” del paquete estadístico de SAS/ETS® (SAS Institute, Inc., 2011). Álvarez-Gonzalez *et al.* (2007) mencionan que el sistema de ecuaciones resultante del ajuste es siempre el mejor posible, aunque el ajuste de las ecuaciones de cada partición de manera individual no sea necesariamente el mejor.

Es común que el ajuste de este tipo de ecuaciones presente heterocedasticidad, por lo que se empleó la metodología de pesos y regresión ponderada para corregir este tipo de problemas (Parresol, 1999; Alvarez-González *et al.*, 2007).

Con esta metodología el volumen se estimó mediante dos enfoques; un sistema de ecuaciones general o multiespecie donde se encuentran todas las especies que se evaluaron en este trabajo y por otro lado se generaron sistemas de ecuaciones específicos por especie.

2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.5.1. Volumen individual

En el **Cuadro II** se muestran los intervalos de las variables medidas en campo de los árboles cosechados, así como del volumen observado de las seis especies de encino muestreadas. Las especies de *Quercus rugosa* y *Q. laurina* fueron las especies que presentaron las tallas más grandes, así como el volumen; mientras que las tallas más pequeñas se presentaron en *Q. coccolobifolia*, lo cual puede deberse a que esta especie se distribuye en los sitios de más baja productividad.

Cuadro 11. Parámetros dendrométricos mínimos y máximos, de especies utilizadas en muestreo.

Nombre Científico	<i>n</i>	<i>Dn</i> (cm)	<i>H</i> (m)	<i>Vrta</i> (m ³)	<i>Vr</i> (m ³)	<i>Vta</i> (m ³)
<i>Quercus rugosa</i>	26	7.6 - 44.5	5.85 - 17.8	0.016 - 0.9669	0.001 - 0.4599	0.0171 - 1.4268
<i>Quercus obtusata</i>	34	6.2 - 37.6	4.85 - 14.2	0.0116 - 0.593	0.0005 - 0.3381	0.0122 - 0.7996
<i>Quercus sideroxyla</i>	33	4.8 - 40.5	3.55 - 15.7	0.0042 - 0.7991	0 - 0.3737	0.0044 - 1.1727
<i>Quercus coccolobifolia</i>	12	8.6 - 19.1	5.36 - 8.3	0.0194 - 0.1093	0.0036 - 0.0445	0.023 - 0.1429
<i>Quercus laurina</i>	30	5.8 - 48.6	4.35 - 20.6	0.0074 - 1.1369	0 - 0.6694	0.0074 - 1.8063
<i>Quercus candicans</i>	30	6.6 - 41.6	6.09 - 16.85	0.0145 - 0.6793	0.0005 - 0.5963	0.0158 - 1.2755
General	165	4.8 - 48.6	3.55 - 20.6	0.0042 - 1.1369	0 - 0.6694	0.0044 - 1.8063

Donde: diámetro (*Dn*), altura total (*H*), volumen rollo total árbol (*Vrta*), volumen de ramas (*Vr*) y volumen total árbol (*Vta*).

Para las especies, el volumen rollo total árbol representa al menos el 70% del volumen total (**Figura 9**). De las especies muestreadas: *Q. laurina* es la que representa la menor proporción de volumen de ramas de 15%, mientras que *Q. obtusata* es la que mostro mayor proporción, con un 32%.

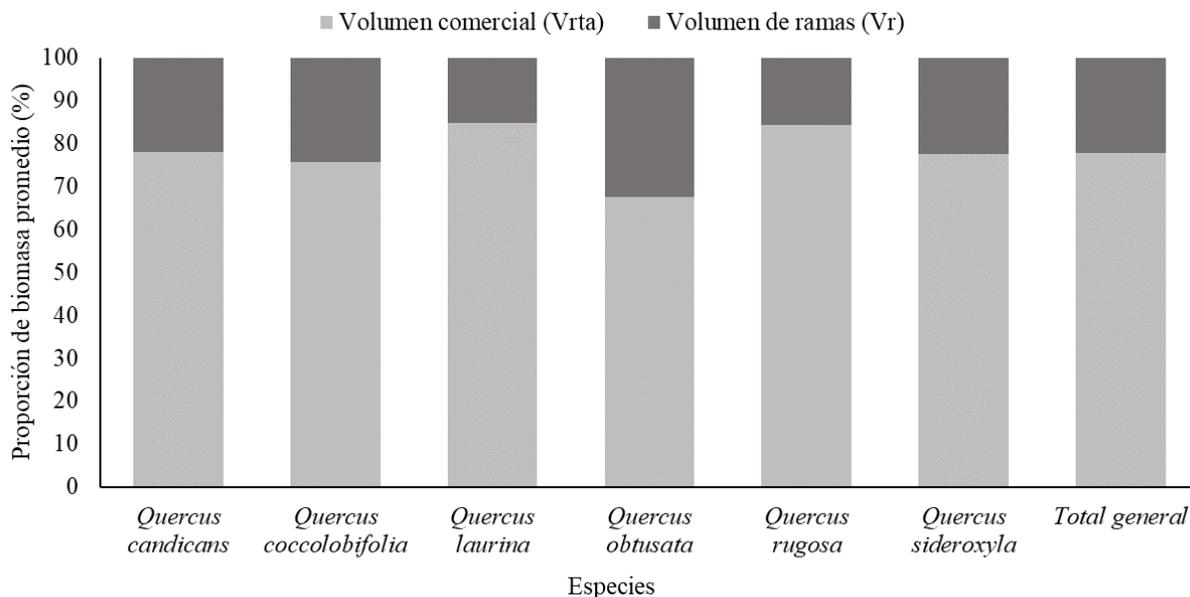


Figura 9. Distribución de biomasa promedio por componente ($Vrta$ y Vr) de seis especies de encino en Sierra de Santa Rosa, Guanajuato, México.

2.5.2. Factor de forma

En lo que respecta al factor de forma (ff) las especies *Quercus laurina*, *Q. candicans*, *Q. obtusata* y *Q. rugosa* son de tipo cónico con un ff de 0.31, 0.34, 0.35 y 0.36 respectivamente; mientras que para *Q. sideroxylla* es de 0.39 y *Q. coccolobifolia* de 0.42, teniendo más semejanza el tronco del árbol a un paraboloides.

2.5.3. Modelo de volumen general

Con este enfoque se incluyeron todos los árboles cosechados, donde se evaluaron los modelos del **Cuadro 10**. Los modelos de volumen total (Vta) evaluados presentaron buenos parámetros de bondad de ajuste, donde el diámetro normal y la altura total explican más del 90% del volumen total. En el **Cuadro 12** se muestran los parámetros estimados, así como su error estándar. Los estadísticos obtenidos en los cuatro modelos proveen una estimación adecuada del volumen total, siendo el más preciso el modelo de Schumacher y Hall (2-7), seguido del modelo Spurr no lineal (2-8), mientras que el modelo de Spurr lineal (2-9) fue el que presentó mayor variación.

Cuadro 12. Parámetros estimados y estadísticos de bondad de ajuste de modelos para determinar Vta de encinos en Guanajuato, México.

Modelo	Parámetro	Estimador	Error Std	Valor de t	Pr > t	RMSE	R2adj
3-7	α_0	0.000128	0.000017	7.6	<0.0001	0.0725	0.9493
	α_1	2.15585	0.0553	39.01	<0.0001		
	α_2	0.377898	0.071	5.32	<0.0001		
3-8	α_0	0.000113	0.000017	6.64	<0.0001	0.0768	0.9432
	α_1	0.899221	0.0161	55.82	<0.0001		
3-9	α_0	0.007589	0.00291	2.61	<0.0001	0.0901	0.9218
	α_1	0.000043	8.37E-07	51.28	<0.0001		
3-10	α_0	16691.96	1136.8	14.68	<0.0001	0.0793	0.9394
	α_1	196.4133	36.9316	5.32	<0.0001		
3-11	α_0	0.000161	0.000022	7.43	<0.0001	0.0787	0.9403
	α_1	2.375883	0.0397	59.91	<0.0001		

Para que el supuesto de homogeneidad de varianza se realizó una ponderación, la cual tiene una relación directa con la varianza del volumen, como se muestra la **Figura 10** mediante un análisis de la estructura de los residuales.

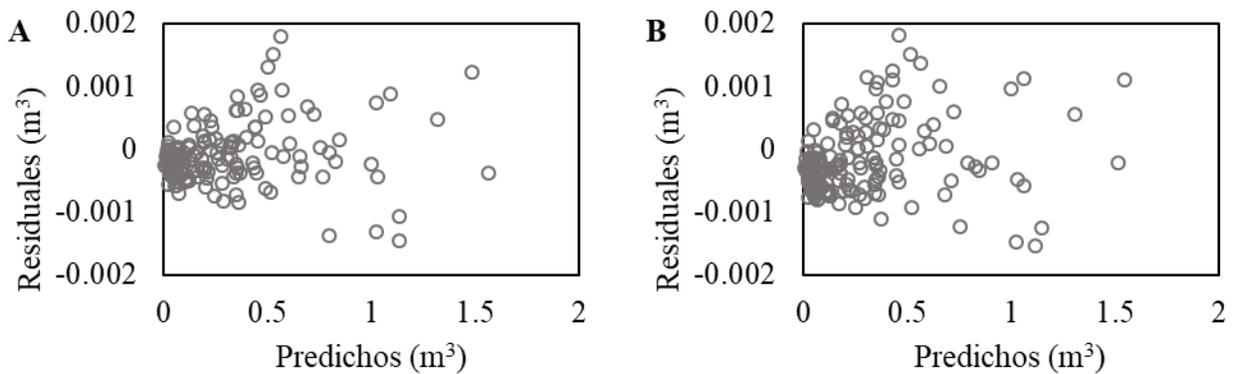


Figura 10. Estructura de residuales del volumen con respecto al volumen predicho de los modelos 3-7 (A) y 3-8 (B).

Se seleccionaron los mejores modelos para integrar un sistema de ecuaciones aditivo con el propósito de estimar Vta a partir de Vrta y Vr. El sistema de ecuaciones se seleccionó mediante los parámetros de bondad de ajuste y la validación cruzada. Se seleccionaron y evaluaron tres sistemas de ecuaciones (**Cuadro 13**). Para el sistema de ecuaciones 1 (S1) se utiliza el Dn y H del árbol para estimar el Vrta y el de Vr, por lo que la suma de estos dos componentes resulta en el Vta, mientras

que el sistema de ecuaciones 2 (S2) el volumen de ramas (V_r) se estimó mediante una proporción del volumen rollo total el cual se estimó mediante una función de D_n y H . El sistema de ecuaciones 3 (S3) el V_r se estimó mediante una tarifa del D_n .

Cuadro 13. Sistemas de ecuaciones para determinar volumen por componente estructural y total.

Sistema de ecuaciones 1 (S1)	Sistema de ecuaciones 2 (S2)	Sistema de ecuaciones 3 (S3)
$Vrta = \alpha_0 D^{\alpha_1} H^{\alpha_2}$	$Vrta = \exp(\alpha_0) D^{\alpha_1} H^{\alpha_2}$	$Vrta = \exp(-\alpha_0) D^{\alpha_1} H^{\alpha_2}$
$Vr = \exp(-\alpha_3) D^{\alpha_4} H^{\alpha_5}$	$Vr = \exp(\alpha_0) D^{\alpha_1} H^{\alpha_2} * \gamma$	$Vr = \exp(-\alpha_3) D^{\alpha_4}$
$Vta = Vrta + Vr$	$Vr = Vta - Vrta$	$Vta = Vrta + Vr$

$Vrta$: volumen rollo total árbol (m^3), V_r : volumen de ramas (m^3), Vta : volumen total árbol (m^3), D_n : diámetro normal (cm), H : altura (m) y α_i : parámetros a estimar.

El S1 presentó un buen ajuste ligeramente menor a los sistemas S2 y S3, con un coeficiente de determinación 0.9491 para Vta , mientras para $Vrta$ y V_r presento 0.9701 y 0.7265 respectivamente. Presentó un RMSE de 0.0727 para Vta , y de 0.0382 y 0.619 para $Vrta$ y V_r , respectivamente.

En el **Cuadro 14** y **Cuadro 15** se presentan los estimadores de los parámetros del sistema de ecuaciones 3 y sistema de ecuaciones 2, respectivamente, además de los estadísticos de bondad de ajuste de cada sistema.

Cuadro 14. Parámetros y estadísticos de bondad del sistema de ecuaciones 3, ajustados para estimar Vta de encinos en Guanajuato, México.

Parámetro	Estimador	Error Std	Valor de t	Pr > t
α_0	9.265723	1.09E-01	85.17	<0.0001
α_1	1.781406	0.0427	41.75	<0.0001
α_2	0.844218	0.0581	14.53	<0.0001
α_3	11.11329	0.3574	31.09	<0.0001
α_4	2.705634	0.1025	26.4	<0.0001
	Componente	Modelo	RMSE	R²adj
	$Vrta$	3-7	0.039	0.9690
	V_r	3-11	0.0638	0.7093
	Vta	Σ	0.0724	0.9495

$Vrta$ = Volumen rollo total árbol (m^3), Vr = volumen de ramas (m^3), Vta = volumen total (m^3), MSE es el cuadrado medio del error, RMSE es la raíz del cuadrado medio del error y R^2 adj es el coeficiente de determinación ajustado.

El sistema de ecuaciones 3 aditivo explica más del 70% de la varianza del volumen de ramas, mientras que el volumen rollo total árbol presentó los mejores valores de coeficiente de determinación cercano al 97%.

Cuadro 15. Parámetros y estadísticos de bondad del sistema de ecuaciones 2, ajustados para estimar Vta en encinos en Guanajuato, México.

Parámetro	Estimador	Error Std	Valor de t	Pr > t
α_0	9.437297	0.0673	140.14	<0.0001
α_1	1.98792	0.0330	60.32	<0.0001
α_2	0.644444	0.0492	13.11	<0.0001
γ_1	1.391558	0.0197	70.51	<0.0001
	Componente	Modelo	RMSE	R²adj
	$Vrta$	3-7	0.0440	0.9604
	Vr		0.0685	0.6643
	Vta	Σ	0.0720	0.9501

$Vrta$ = Volumen rollo total árbol (m^3), Vr = volumen de ramas (m^3), Vta = volumen total (m^3), MSE es el cuadrado medio del error, RMSE es la raíz del cuadrado medio del error y R^2 adj es el coeficiente de determinación ajustado.

Por otro lado, el sistema de ecuaciones 2 utiliza una función de proporción respecto al $Vrta$ para estimar Vta , mientras el Vr resulta de la diferencia entre Vta y $Vrta$. En este sistema de ecuaciones el coeficiente de determinación de Vta es ligeramente mayor al que presentó el sistema de ecuaciones 3, aunque la R^2 adj en el modelo de $Vrta$ del S3 es mayor al S2. El RMSE de ambos sistemas son similares en Vta , ligeramente menor en S2.

En la **Figura 11** se muestra el buen ajuste los modelos generados a los datos observados para cada componente $Vrta$, Vr y Vta . Además, el S2 optimizó los parámetros de bondad de ajuste (**Cuadro 15**), en comparación con los obtenidos por el Modelo 2-7 que sólo estima Vta (**Cuadro 12**).

De los tres sistemas ajustados; el S1 presentó un $CV = 25.59$ y un $E = 0.0014$. Mientras que el S2 presentó un $CV = 25.43$ y un $E = 0.0040$. Finalmente, el S3 presentó un $CV = 25.52$ y un $E = 0.0029$. Con base a esta información el sistema 2 presento los mejores parámetros de bondad de ajuste.

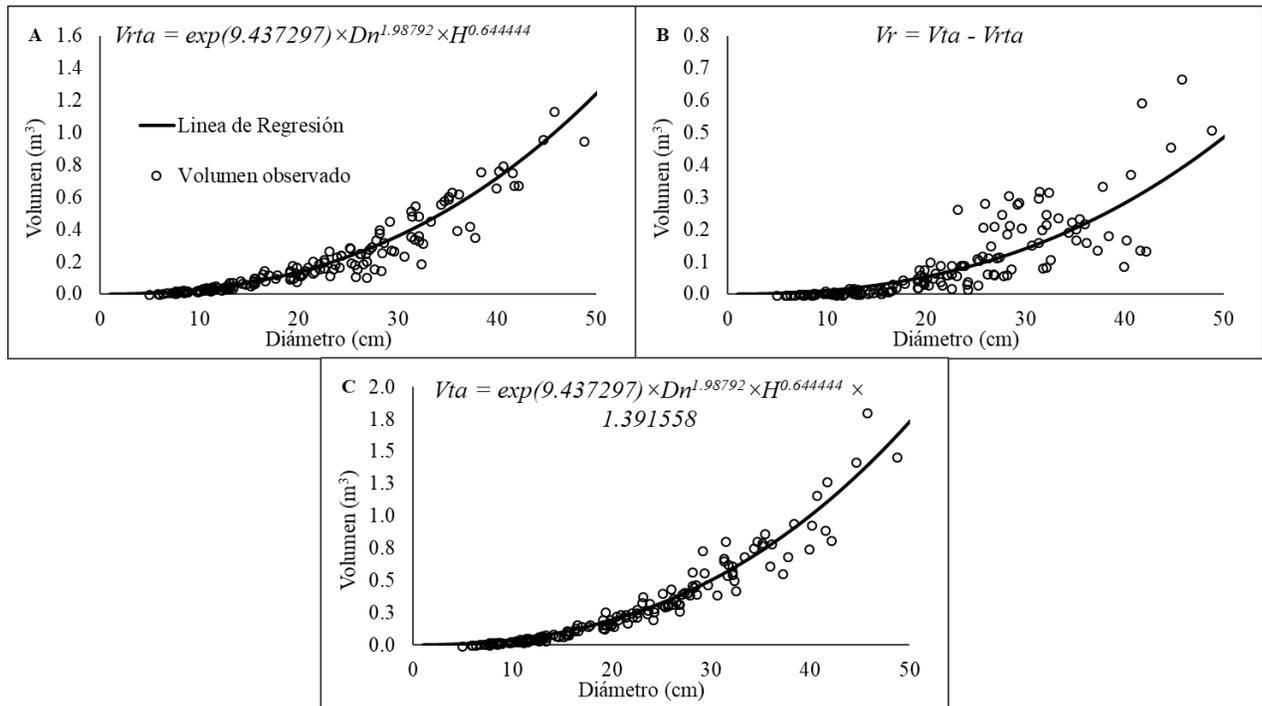


Figura 11. Sistema de ecuaciones 2 para determinar volumen rollo total árbol (A), volumen de ramas (B) y Volumen total árbol (C) para encinos en Sierra de Santa Rosa, Guanajuato, México.

Los tres sistemas de ecuaciones evaluados en este trabajo, así como el modelo que se generó para latifoliadas en el inventario estatal forestal del estado de Guanajuato (SAG, 1976), se evaluaron mediante validación cruzada en *10-folds*. Se compararon los parámetros de bondad de ajuste, y se observó que los tres sistemas, así como el modelo de 1976, presentan parámetros de bondad de ajuste similares entre ellos.

En la **Figura 12** se presenta una gráfica de cajas para la validación cruzada. Se puede observar que el sistema de ecuaciones 2 es el que presenta el menor sesgo promedio, mientras que el Sistema de ecuaciones 1 y el modelo de 1976 (S76) presentan mayor sesgo. Mediante una prueba estadística paramétrica de Tukey de los elementos de la validación cruzada se observó que no existen

diferencias significativas entre los promedios de los sistemas que se evaluaron, así como del modelo desarrollado en 1976 (SAG, 1976).

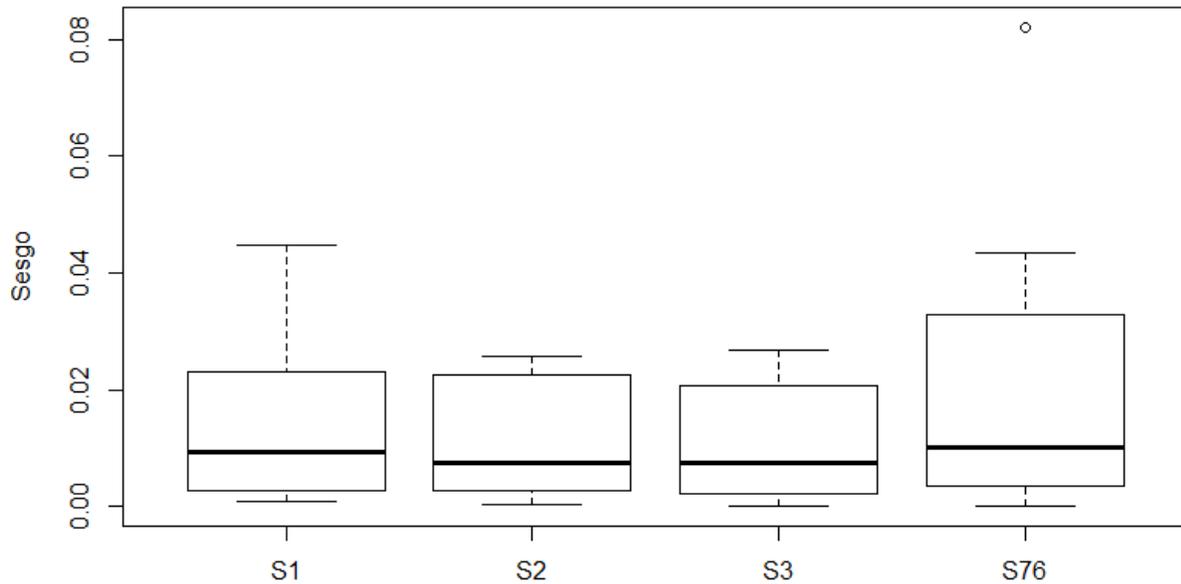


Figura 12. Sesgo promedio para tres sistemas de ecuaciones aditivos y modelo de 1975 para estimar volumen total para encinos en Guanajuato, México.

2.5.4. Ecuación de volumen por grupo de especies

Mediante un análisis de covarianza de un modelo lineal (**Cuadro 16**) se analizó de manera conjunta a las especies empleando variables indicadoras, con la finalidad de determinar si existía evidencia estadística para agrupar a las especies en un sólo grupo o más, en función de la similitud alométrica (Picard *et al.* 2012).

Las especies de *Quercus rugosa*, *Q. laurina* y *Q. candicans*, mostraron diferencias estadística significativa en sus pendientes ($\beta_0 = \beta_2$, $p = < 0.0001$; $\beta_0 = \beta_4$, $p = < 0.0001$; $\beta_0 = \beta_5$, $p = < 0.0001$) con respecto a *Q. obtusata*, lo que sugiere la posibilidad de agrupar estas especies en el “Grupo A”. Mientras que las especies *Q. sideroxyla* y *Q. coccolobifolia* no son estadísticamente significativos respecto a la especie base *Q. obtusata*, por lo que estas especies se integra el “Grupos B” (**Cuadro 16**).

Cuadro 16. Valores del análisis de covarianza para discernir el posible agrupamiento de especies.

Especie	Parámetro	Estimador	Valor t	Pr< t
<i>Q. obtusata</i>	α_0	0.016596	0.95	0.3419
	β_0	0.000049	19.16	<0.0001
<i>Q. coccolobifolia</i>	α_1	-0.00564	-0.14	0.8901
	β_1	-4.28E-06	-0.19	0.8532
<i>Q. rugosa</i>	α_2	-0.00956	-0.4	0.6915
	β_2	-9.99E-06	-3.4	0.0009
<i>Q. sideroxylla</i>	α_3	-0.00324	-0.14	0.8858
	β_3	-1.34E-06	-0.41	0.6859
<i>Q. laurina</i>	α_4	-0.01028	-0.44	0.6575
	β_4	-0.00001	-5.17	<0.0001
<i>Q. candicans</i>	α_5	-0.00751	-0.31	0.7557
	β_5	-7.16E-06	-2.34	0.0203

α_0 y β_0 : parámetros de la regresión; β_1 : parámetro de adicionalidad debido a *Q. coccolobifolia*; β_2 : parámetro de adicionalidad debido a *Q. rugosa*; β_3 : parámetro de adicionalidad debido a *Q. sideroxylla*; β_4 : parámetro de adicionalidad debido a *Q. laurina*; β_5 : parámetro de adicionalidad debido a *Q. candicans*.

La diferencia entre especies puede ser debida a que *Quercus rugosa* y *Q. laurina* son las que se presentan en mayor proporción en el área de estudio, por lo tanto, son las que especie con mayor manejo forestal.

En el **Cuadro 17** se muestran los estimadores de los modelos generados para cada grupo de especies, mostrando el R^2 adj para cada componente y su RMSE.

Cuadro 17. Parámetros estimados y estadísticos de bondad de ajuste de sistema de ecuaciones para determinar volumen en grupos de encinos en Guanajuato, México.

<i>Grupo A</i>					<i>Grupo B</i>				
Parametro	Estimador	Error Std	Valor de t	Pr > t	Parametro	Estimador	Error Std	Valor de t	Pr > t
α_0	9.993708	0.112	89.24	<.0001	α_0	9.737997	0.0855	113.96	<.0001
α_1	1.825595	0.0496	36.79	<.0001	α_1	1.972437	0.039	50.55	<.0001
α_2	1.05731	0.0887	11.93	<.0001	α_2	0.787131	0.0664	11.85	<.0001
γ	1.315381	0.0181	72.6	<.0001	γ	1.542679	0.0395	39.04	<.0001
Componente	MSE	RMSE	R ² adj		Componente	MSE	RMSE	R ² adj	
<i>Vrta</i>	0.00188	0.043	0.973		<i>Vrta</i>	0.00173	0.042	0.915	
<i>Vr</i>	0.00533	0.073	0.686		<i>Vr</i>	0.00279	0.053	0.744	
<i>Vta</i>	0.00677	0.082	0.953		<i>Vta</i>	0.0018	0.042	0.967	

Vrta = Volumen rollo total árbol (m³), *Vr* = volumen de ramas (m³), *Vta* = volumen total (m³), MSE es el cuadrado medio del error, RMSE es la raíz del cuadrado medio del error y R² adj es el coeficiente de determinación.

2.5.5. Ecuaciones de volumen por especie

Se ajustaron seis sistemas de ecuaciones aditivos, uno para cada especie de encino de este estudio. Los sistemas específicos presentaron buenos coeficientes de determinación (R²adj > 0.92) para determinar volumen total, mientras como se esperaba, el menor coeficiente de determinación se presentó en el volumen de ramas, en intervalos de 0.66 a 0.85 de R²adj. Para esto se probaron tres sistemas de ecuaciones aditivos (**Cuadro 13**), y se eligió el mejor sistema de ecuaciones para cada especie evaluada mediante los parámetros de bondad de ajuste.

En el **Cuadro 18** se muestran los estimadores de los parámetros del sistema de ecuaciones (S2). Este sistema de ecuaciones fue el que presentó los mejores parámetros de bondad de ajuste para el volumen total árbol (*Vta*) para las seis especies que se evaluaron. Además, la principal ventaja del S2 es la de presentar el volumen de ramas mediante una proporción del *Vrta*, reflejado en el estimador del parámetro γ . *Quercus rugosa* y *Q. laurina* fueron las especies que presentan menor proporción de *Vr* respecto al *Vrta*, seguido de *Q. coccolobifolia* y *Q. candicans* con un 27%, 28%, 32% y 39% respectivamente. *Quercus sideroxylla* y *Q. obtusata* resultaron las especies que contienen la mayor proporción de volumen de ramas respecto al *Vrta*.

El Modelo 3-7 (**Cuadro 12**) con la estructura de Schumacher-Hall es el que presentó el mejor ajuste para describir el volumen comercial ($Vrta$) para las seis especies, mientras que las ramas representadas por una proporción del $Vrta$ resultó la forma en el que el sistema aditivo presentó los mejores valores de bondad de ajuste para el volumen total árbol (Vta); pero donde el volumen de ramas (Vr) no siempre presentó los mejores valores de bondad de ajuste.

Cuadro 18. Parámetros estimados y bondad de ajuste de sistema de ecuaciones para determinar volumen de seis especies de encino en Guanajuato, México.

<i>Quercus coccolobifolia</i>					<i>Q. rugosa</i>				
Parametro	Estimador	Error Std	Valor de t	Pr > t	Parametro	Estimador	Error Std	Valor de t	Pr > t
$\alpha 0$	9.221494	0.3845	23.98	<.0001	$\alpha 0$	10.158610	0.1959	51.85	<.0001
$\alpha 1$	1.587249	0.152	10.44	<.0001	$\alpha 1$	1.866586	0.0848	22.01	<.0001
$\alpha 2$	1.101187	0.3128	3.52	0.0048	$\alpha 2$	1.08983	0.168	6.49	<.0001
γ	1.327151	0.0336	39.49	<.0001	γ	1.274997	0.0292	43.72	<.0001
Componente	MSE	RMSE	R ² adj		Componente	MSE	RMSE	R ² adj	
$Vrta$	0.000044	0.007	0.945		$Vrta$	0.00129	0.036	0.980	
Vr	0.000037	0.006	0.731		Vr	0.00237	0.049	0.790	
Vta	0.00006	0.008	0.959		Vta	0.00193	0.044	0.984	

<i>Q. candicans</i>					<i>Q. sideroxyla</i>				
Parametro	Estimador	Error Std	Valor de t	Pr > t	Parametro	Estimador	Error Std	Valor de t	Pr > t
$\alpha 0$	10.194430	0.2045	49.85	<.0001	$\alpha 0$	9.723826	0.1088	89.36	<.0001
$\alpha 1$	1.865743	0.1064	17.53	<.0001	$\alpha 1$	2.039811	0.047	43.36	<.0001
$\alpha 2$	1.089134	0.1876	5.81	<.0001	$\alpha 2$	0.710627	0.0816	8.71	<.0001
γ	1.39616	0.0359	38.85	<.0001	γ	1.459542	0.0426	34.27	<.0001
Componente	MSE	RMSE	R ² adj		Componente	MSE	RMSE	R ² adj	
$Vrta$	0.00195	0.044	0.949		$Vrta$	0.000939	0.031	0.968	
Vr	0.00545	0.074	0.670		Vr	0.00143	0.038	0.852	
Vta	0.00698	0.084	0.928		Vta	0.00162	0.040	0.977	

Continuación...(Cuadro 18)

<i>Q. laurina</i>					<i>Q. obtusata</i>				
Parametro	Estimador	Error Std	Valor de t	Pr > t	Parametro	Estimador	Error Std	Valor de t	Pr > t
α_0	10.529290	0.157	67.05	<.0001	α_0	9.821431	0.2063	47.62	<.0001
α_1	1.789077	0.0569	31.46	<.0001	α_1	1.908644	0.0706	27.05	<.0001
α_2	1.278012	0.1104	11.58	<.0001	α_2	0.882327	0.1455	6.06	<.0001
γ	1.289863	0.0249	51.77	<.0001	γ	1.658715	0.0702	23.62	<.0001
Componente	MSE	RMSE	R ² adj		Componente	MSE	RMSE	R ² adj	
<i>Vrta</i>	0.00195	0.044	0.982		<i>Vrta</i>	0.00261	0.051	0.836	
<i>Vr</i>	0.00664	0.082	0.714		<i>Vr</i>	0.00451	0.067	0.666	
<i>Vta</i>	0.00675	0.082	0.969		<i>Vta</i>	0.0027	0.052	0.944	

Vrta = Volumen rollo total árbol (m³), *Vr* = volumen de ramas (m³), *Vta* = volumen total (m³), MSE es el cuadrado medio del error, RMSE es la raíz del cuadrado medio del error y R² adj es el coeficiente de determinación.

2.6. CONCLUSIONES

Aunque los tres sistemas de ecuaciones y el modelo que se desarrolló en 1976, no presentaron diferencia estadística significativas entre ellos, los sistemas de ecuaciones ajustados en este trabajo tienen la principal propiedad de estimar la proporción de *Vr* respecto al *Vrta*, en los sistemas generados para especie, grupo y multiespecie (general).

La actualización constante de estas herramientas es de importancia para una óptima gestión de los recursos forestales. Así como la necesidad de modelos precisos para estimar volumen de sus componentes estructurales (fuste y ramas) y volumen total, son imprescindibles para una eficiente administración, así como para una adecuada gestión de los recursos forestales. Los modelos obtenidos en este trabajo servirán como una herramienta para los gestores de los recursos forestales de la región de Sierra de Santa Rosa y el estado de Guanajuato donde se distribuyen las especies analizadas. También servirán de complemento para el sistema biométrico forestal (Vargas-Larreta *et al.*, 2017), ya que para el estado no se desarrollaron nuevos modelos.

A pesar de los esfuerzos de los investigadores por el desarrollo de modelos específicos por especie y por región aún existe un gran trabajo por realizar, por lo que se propone seguir generando modelos para determinar volumen para las demás especies que comprenden la diversidad de esta comunidad.

2.7. LITERATURA CITADA

- Álvarez-Gonzalez., J. G., R. Rodríguez-Soalleir y A. Rojo-Alboreca. 2007. Resolución de problemas del ajuste simultáneo de sistemas de ecuaciones: heterocedasticidad y variables dependientes con distinto número de observaciones. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales 23: 35-42.
- Bailey, L. R. 1995. Upper stem volumes from stem analysis data: an overlapping bolts method. Canadian Journal Forest Reseach. 25: 170-173.
- Corral-R. S., J. J. Návar-Chaidez y F. Fernandez-Sanchez. 1999. Ajuste de funciones de ahusamiento a los perfiles fustales de cinco Pináceas de la región de El Salto, Durango. Madera y Bosques 5(2), 1999:53-65.
- Honorato-Salazar, J. A. y M. E. Fuentes-López. 2001. Propiedades Físico-Mecánicas de la madera de cinco especies de encino del estado de Guanajuato. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 26(90):5-28.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2008. Conjunto de datos vectoriales escala 1: 1000000. Unidades climáticas. <http://www.beta.inegi.org.mx/temas/mapas/climatologia/> (Consulta: septiembre de 2017)
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2014. Conjunto de datos vectorial edafológico escala 1: 250000 Serie II (Continuo Nacional). http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/edafologia/vectorial_serieii.aspx. (Consulta: septiembre de 2017)
- Parresol, B. R. 1999. Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons. Forest Science 45: 573-593.
- Parresol, B. R. 2001. Additivity of nonlinear biomass equations. Canadian Journal of Forest Research 31: 865-878.
- Picard N., L. Saint-André y M. Henry. 2012. Manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles: del trabajo de campo a la predicción. Las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y el Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Rome, Montpellier, 223 págs.

- Pompa-García, M., J. J. Corral-Rivas, J. C. Hernández-Díaz and J. G. Alvarez-Gonzalez. 2009. A system for calculating the merchantable volume of oak trees in the northwest of the state of Chihuahua, Mexico. *Journal of Forestry Research* 20(4): 293–300. doi 10.1007/s11676-009-0051-x
- Romahn de la V., C. F. y H. Ramírez M. 2006. *Dendrometría*. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco. México. 295 p.
- Secretaría de Agricultura Ganadería (SAG). 1976. *Inventario forestal del estado de Guanajuato*. Subsecretaría Forestal y de la Fauna. Dirección General del Inventario Forestal. Núm. 36. México, D. F., México. 56 p.
- SEMARNAT – CONAFOR. 2015. *Inventario estatal forestal y de suelos – Guanajuato 2014*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México D. F. 137 p.
- Tamarit-Urías, J. C., H. M. De los Santos-Posadas, A. Aldrete, J. R. Valdez-Lazalde, H. Ramírez-Maldonado y V. Guerra-De la Cruz. Sistema de cubicación para árboles individuales de *Tectona grandis* L. f. mediante funciones compatibles de ahusamiento-volumen. . *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 5: 58-74.
- Tlaxcala-Méndez, R. M., H. M. de los Santos-Posadas, P. Hernández-de la Rosa y J. L. López-Ayala. 2016. Variación del factor de forma y el ahusamiento en procedencias de cedro rojo (*Cedrela odorata* L.). *Agrociencia* 50: 89-105.
- Valencia A., Susana. 2004. Diversidad del género *Quercus* (Fagaceae) en México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 75:33-53.
- Vargas-Larreta, B., J. J. Corral-Rivas, O. A. Aguirre-Calderón, J. O. López-Martínez, H. M. De los Santos-Posadas, F. J. Zamudio-Sánchez, E. J. Treviño-Garza, M. Martínez-Salvador and C. G. Aguirre-Calderón. 2017. SiBiFor: Forest Biometric System for forest management in Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 23(3), 437-455. doi: 10.5154/r.rchscfa.2017.06.040
- Wiant, Jr. H. V., G. B. Wood, and G. M. Furnival. 1992. Estimating log volume using the centroid position. *Forest Science*. 38: 187-191.

CAPÍTULO 3. INVENTARIO DE BIOMASA Y CARBONO EN SIERRA DE SANTA ROSA, GUANAJUATO, MÉXICO.

3.1. RESUMEN

La correcta estimación de cualquier recurso natural debe de realizarse con las herramientas adecuadas disponibles en el momento y para el lugar en el que desarrolla dicha estimación. Aún en la actualidad, pese a nuevas tecnologías empleadas como los sistemas de información geográfica, los inventarios mediante muestreo en campo son una poderosa herramienta para obtener estimaciones estadísticas precisas y confiables. Dependiendo del diseño del muestreo, se pueden obtener diferentes detalles de precisión y confiabilidad de los estimadores. En este trabajo se estima la biomasa almacenada, principalmente de *Quercus* spp., mediante cinco enfoques: el empleo de un modelo general de biomasa, el empleo de un modelo aditivo general de biomasa, usando modelos específicos aditivos por especie y comparando las estimaciones de un modelo y un sistema de ecuaciones generados para el género *Quercus* en otras zonas geográficas de México. A la par de la estimación de biomasa se estimó la fracción de carbono contenido en los bosques de la Sierra de Santa Rosa, Guanajuato. Además, también se estimó el volumen con un modelo generado para la región y se comparó con el modelo propuesto en 1976 para el estado de Guanajuato. Todo esto tomando como base un levantamiento de datos para inventario en un muestreo tradicional de un bosque mezclado con diversas especies de encino principalmente. Se encontró que los estimadores mejores evaluados fueron los de regresión y los de razón (proporción) estratificado de biomasa-área basal que permiten, una reducción de 91% y 94% del esfuerzo de muestreo respectivamente, con un error permisible de muestreo del 5%. La biomasa contenida en los predios de la sierra de Santa Rosa, Guanajuato, se estimó en 364,096 Mg (± 199.5) de biomasa en 5,566.8 ha de bosques de encino. El inventario de carbono almacenado fue de 171,731 Mg (± 91.4) lo que implica que, estos bosques almacenan en promedio 30.8 Mg ha⁻¹ (± 0.02) y un promedio de volumen total árbol de 75.6 m³ ha⁻¹ (± 0.04).

Palabras clave: Inventario forestal, muestreo, encinos, estimadores de razón, regresión, biomasa, contenido de carbono.

3.2. INTRODUCCIÓN

Las estimaciones precisas de biomasa son importantes para un mejor entendimiento de la actividad del ciclo de carbono (C) terrestre e implementar una efectiva gestión de los bosques (Sun et al., 2016). Existen diferentes enfoques para determinar biomasa en grandes superficies como los métodos que emplean sensores remotos (Yemshanov et al., 2012); estos proveen una completa cobertura de un área geográfica mostrando propiedades espaciales, así como la variabilidad que presentan los ecosistemas a diferentes escalas (Wang et al., 2018).

Las tendencias actuales en la estimación de biomasa y C son la incorporación de modelos de biomasa regionales, específicos para especie o grupos de especies (Domke et al., 2013). Una de las formas de estimar el biomasa y volumen es mediante inventarios y el empleo de estimadores de muestreo. Hoover *et al.* (2018) coincide que el inventario y monitoreo es un componente esencial de la gestión forestal, donde los datos de inventario son importantes para múltiples propósitos como en la producción maderable, hábitat, salud del bosque y captura de C. Los inventarios de recursos forestales recurren a herramientas de muestreo basado en diseño (muestreo estratificado) y en modelos (regresión y razón) (Roldán-Cortés et al., 2014). El muestro consiste en la selección de un cierto número de unidades muestrales (UM) mejor conocidos como “sitios de inventario”, que pueden ser al azar o sistemáticos, donde la estratificación reduce la variabilidad dentro de los estratos, maximizándola entre ellos, y mejorando los estimadores de muestreo.

En 2014 se realizó un muestreo en el área de sierra de Santa Rosa en el estado de Guanajuato, el cual proporciona información suficiente para determinar la cantidad de biomasa y carbono aéreo de bosques del área de estudio mediante el empleo de variables dasométricas.

3.3. OBJETIVOS

Los objetivos de este trabajo fueron i) estimar la biomasa y volumen almacenados en bosques bajo gestión forestal en sierra de Santa Rosa, Gto. y ii) estimar carbono almacenado en bosque de sierra de Santa Rosa, Gto., a través del uso de los modelos desarrollados en el Capítulo 1 y Capítulo 2.

3.4. MATERIALES Y MÉTODOS

3.4.1. Área de estudio

El estudio se realizó en predios de la Sierra de Santa Rosa, Guanajuato, un bosque templado incoetáneo con diversas especies forestales, dentro de los municipios de Guanajuato y Dolores Hidalgo C. I. N. (21° 12' 52.65'' N, 101° 13' 30.80'' O y 20° 59' 11.79'' N, 101° 06' 23.36'' O), Guanajuato, México, que comprenden una superficie total de 6877.74 ha, la elevación sobre el nivel del mar varía entre los 2000 y 2800 m, se encuentra en las subprovincias fisiográficas Sierras y Llanuras del Norte de Guanajuato y Sierra de Guanajuato, en la región fisiográfica Mesa Central, de acuerdo al continuo nacional de edafología escala 1:250 000 los principales tipos de suelo en el área de estudio son Luvisol crómico, Regosol esquelético y Phoezem lúvico (INEGI, 2014). El clima predominante es C(w2) y C(w1)(w), templado sub-húmedo con una temperatura media anual entre 12 y 18°C, precipitación anual de 200 a 1800 mm (INEGI, 2008).

3.4.2. Muestreo, colecta de datos en campo y procesamiento

Pearson *et al.* (2007) mencionan que las actividades forestales y las características del paisaje pueden variar en tamaño, donde pueden ser bloques vecinos o muchos dispersos en áreas de diferentes proporciones, por lo que los límites espaciales de estos paisajes deben de estar claramente definidos para facilitar la medición, el monitoreo, la contabilidad y verificación. Por lo anterior se utilizó una clasificación y cuantificación de superficies, donde se agruparon áreas con características semejantes de vegetación y poca variación, estas superficies son llamado rodales, que de acuerdo NOM-152-SEMARNAT-2006 dichas áreas son definidas por características permanentes, como el suelo, pendiente, parteaguas y arroyos, que tienen un mismo potencial productivo; estos deben de ser permanentes a través de ciclos de corta ciclos de corta sucesivos, aun cuando haya cambios en la vegetación u otras variables. Con herramientas de sistemas de información geográfica (SIG) se delinearon los diferentes rodales que comprenden el área de estudio, donde cada rodal se utilizó como un estrato; información que fue generada a partir del Programa de Manejo Forestal vigente (Cabrera *et al.*, 2014).

El inventario, así como la recopilación de información, se realizó en sitios de muestreo que se establecieron mediante un muestreo estratificado, donde en cada estrato se realizó un muestreo sistemático (Cochran, 1977; Bell, 1998). En México, los inventarios de recursos forestales están regulados por la norma NOM-152-SEMARNAT-2006, donde establece la metodología del inventario.

Se midieron un total de 872 unidades de muestreo (UM), y el tamaño de las unidades de muestreo es 500 m² o 0.05 hectáreas. Con brigadas de campo se localizaron coordenadas específicas para cada sitio usando GPS recreativos. Las UM se hicieron de forma circular con un radio de 12.615 m, se midieron los árboles mayores a 7.5 cm de diámetro normal (Dn) y se determinó la altura total en campo (H). Los datos de campo se colectaron en verano de 2014-

3.4.3. Estimación de biomasa y volumen

Los modelos alométricos son ecuaciones matemáticas para predecir biomasa de un árbol a partir de variables dendrométricas como diámetro normal (Dn) y altura (H). La correcta selección de los modelos para determinar biomasa puede influenciar las estimaciones de biomasa, por lo que se recomienda el empleo de modelos locales (Sileshi, 2014; Picard *et al.*, 2015).

Se realizaron cinco inventarios para determinar la biomasa y dos para estimar volumen, los cuales se estimaron con modelos generados en el Capítulo 1 para determinar biomasa utilizando los modelos generales y modelos específicos, comparándolos con modelos generados para el mismo género realizados por Návar (2009) y Vargas-Larreta *et al.* (2017). El volumen se determinó con el modelo general del Capítulo 2, comparándolo con las estimaciones de los modelos generados en la década de los setentas (SAG, 1976).

En **Cuadro 19** se muestran los modelos que se emplearon para determinar biomasa y volumen del género *Quercus sp.* para los siete inventarios que se evaluaron:

Cuadro 19. Modelos empleados para determina biomasa y volumen en Sierra de Santa Rosa, Guanajuato. México.

Inventario	Género	Modelo	Referencia
B1	<i>Quercus sp.</i>	<i>Modelo 1 – 3</i>	Capítulo 1
B2	<i>Quercus sp.</i>	<i>Sistema de ecuaciones 1</i>	Capítulo 1
B3	<i>Quercus sp.</i>	<i>Sistemas de ecuaciones especificos</i>	Capítulo 1
B4	<i>Quercus sp.</i>	$Bt_g = 0.0890Dn^{2.5226}$	Návar (2009)
B5	<i>Quercus sp.</i>	<i>Sistema de ecuaciones 2 para volumen</i>	Capítulo 2
V1	<i>Quercus sp.</i>	$Vta = e^{-9.437297} D^{1.98792} H^{0.644444} * 1.391558$	Vargas-Larreta <i>et al.</i> (2017)
V2	<i>Quercus sp.</i>	$Vta = e^{-9.45552671+1.83036294 \ln(Dn)+0.97662425 \ln(H)}$	SAG (1976)
Todos B_i	<i>Pinus teocote</i>	$Bt = \exp(-3.182) Dn^{2.702}$	Návar (2010)
	<i>Alnus sp.</i>	$Bt = \exp(-2.14) Dn^{2.702}$	Acosta <i>el al.</i> (2002)
Todos V_i	<i>Pinus teocote</i>	$Vta = e^{-9.56168726+1.83727218 \ln(Dn)+1.03577031 \ln(H)}$	SAG (1976)
	<i>Alnus sp.</i>	$Vta = e^{-9.45552671+1.83036294 \ln(Dn)+0.97662425 \ln(H)}$	SAG (1976)

Dn = diámetro normal (cm), H = altura total (m), Bf = biomasa de fuste (kg), Br = biomasa de ramas (kg), Bh = Biomasa de follaje (kg), Bt_g = biomasa aérea total (kg), Bt_{ga} = biomasa aérea total aditiva (kg), Bt_e = biomasa aérea total aditiva específica (kg) y Vta = volumen total árbol (m³).

3.4.4. Proporción de carbono almacenado

Para determinar el carbono almacenado en área del proyecto es necesario determinar la biomasa almacenada mediante los inventarios mencionados. A la par del procesamiento de datos para estimar biomasa también se determinó la concentración de C orgánico a nivel de árbol, que de acuerdo al IPCC (2006) los bosques templados y boreales tienen una porción de carbono de 47% para las especies arbóreas en general, mientras que para coníferas un 51 % es C. Con esta información se desarrollaron tres inventarios (B1, B y B3) con diferentes estimadores de muestreo

para determinar el carbono almacenado en bosques bajo gestión forestal en la sierra de Santa Rosa, Guanajuato.

3.4.5. Estimadores de muestreo para inventario de un bosque de encino

3.4.5.1. Muestreo simple aleatorio (MSA)

Tillé (2005), menciona que “un diseño muestral es simple aleatorio si todas las muestras del mismo tamaño tienen la misma probabilidad de ser seleccionadas”. En el **Cuadro 20** se muestra la estructura matemática de los estimadores del MSA.

Cuadro 20. Estimadores para muestreo simple aleatorio.

Media muestral	$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$	(3-1)
Varianza muestral	$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n - 1}$	(3-2)
Varianza de la media muestral	$S_{\bar{y}}^2 = \frac{S^2}{n} \left(\frac{N - n}{N} \right)$	(3-3)
Total de la población	$\bar{T} = N\bar{y}$	(3-4)
Tamaño de muestra	$n = \frac{t_{n-1,(\alpha/2)}^2 N S_{\bar{y}}^2}{B^2 N + S_{\bar{y}}^2 t_{n-1,(\alpha/2)}^2}$	(3-5)

Donde:

y_i = Biomasa (kg) o volumen (m³) en el i-ésimo sitio de muestreo.

N = Número de total de unidades de muestreo en la población.

n = Número de unidades incluidas en la muestra.

B = Tamaño aceptable del error de estimación o de muestreo.

t = Distribución t de Student.

3.4.5.2. Muestreo estratificado (ME)

La población es dividida en sub-poblaciones no traslapadas, llamados estratos (Johnson, 2000; Thompson, 2002), seleccionando una muestra sistemática de sitios de inventario independientes, entre los estratos, siendo lo más heterogéneos entre ellos, pero siendo lo más homogéneo dentro de ellos (Bell, 1998; Roldan-Cortés *et al.*, 2014).

Se emplearon los estimadores del muestreo estratificado para los datos de inventario del área de estudio, determinando biomasa, volumen y carbono almacenado **Cuadro 21**.

Cuadro 21. Estimadores para muestreo estratificado.

Unidades muestrales	$N = \sum_{h=1}^L N_h$; $n = \sum_{h=1}^L n_h$	(3-6)
Estimadores muestrales		
Media muestral para el estrato (h)	$\bar{y}_h = \frac{1}{n_h} \sum_{i=1}^{n_h} \bar{y}_{h,i}$	(3-7)
Varianza muestral entre unidades muestrales del estrato h	$S_h^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_h} (y_{h,i} - \bar{y}_h)^2}{n_h - 1}$	(3-8)
Varianza de la media muestral en el estrato h	$S_{\bar{y}_h}^2 = \frac{S_h^2}{n_h} \left(\frac{N_h - n_h}{N_h} \right)$	(3-9)
Total por estrato h	$\hat{T} = N_h \bar{y}_h$	(3-10)
Varianza del total por estrato	$S_{T_h}^2 = (N_h)^2 S_{\bar{y}_h}^2 = (N_h)^2 \frac{S_h^2}{n_h} \left(\frac{N_h - n_h}{N_h} \right)$	(3-11)
Estimadores poblacionales		
Media muestral de la población	$\bar{y}_E = \sum_{h=1}^L \frac{N_h}{N} \bar{y}_h = \frac{1}{N} \sum_{h=1}^L N_h \bar{y}_h$	(3-12)
Varianza de la media muestral de la población	$S_{\bar{y}_E}^2 = \sum_{h=1}^L \left(\frac{N_h}{N} \right)^2 S_{\bar{y}_h}^2$	(3-13)
Estimador del total de la población	$\hat{T}_E = N \bar{y}_E = N \left(\frac{1}{N} \sum_{h=1}^L N_h \bar{y}_h \right) = \sum_{h=1}^L \hat{T}_h$	(3-14)
Varianza del estimado total de la población	$S_{\hat{T}_E}^2 = N^2 S_{\bar{y}_E}^2 = \sum_{h=1}^L N_h^2 S_{\bar{y}_h}^2 = \sum_{h=1}^L S_{\hat{T}_h}^2$	(3-15)
Estimación del tamaño de muestra	$n = \frac{(\sum_{h=1}^L N_h S_h)^2}{N^2 \frac{B^2}{t^2} + \sum_{h=1}^L N_h S_h^2}$	(3-16)

Donde:

N_h = Número total de unidades muestrales en el estrato h .

L = Número total de estratos en la población.

N_h = Número total de unidades muestrales en el estrato h incluidas en la muestra.

$y_{h,i}$ = Valor observado de la variable de interés y (biomasa en kg o volumen en m³).

Las otras variables ya han sido definidas.

Este muestreo permite asignar la muestra a cada estrato de varias maneras, resultado diferentes tamaños de muestra según la magnitud y el estrato, teniendo diferentes errores de estimación (Johnson, 2000; Roldán-Cortés *et al.*, 2014).

3.4.5.3. Estimadores de Razón (Proporción) y Regresión

El método de Razón se desarrolló para incrementar la precisión de las medias y totales calculados con información de una variable auxiliar que bajo ciertas condiciones proporciona estimaciones más confiables. Este método es más preciso si la relación entre la variable de interés (biomasa o volumen) y una variable auxiliar dada, es lineal y pasa a través del origen y están altamente correlacionados. Estos estimadores son sesgados por definición, pero con varianza pequeña, llegando a reducir el sesgo cuando las condiciones son favorables, siendo más eficientes que el MSA. Para los estimadores de regresión se requieren condiciones semejantes, pero no siendo necesario que la relación entre la variable principal y auxiliar pase por el origen (Schreuder *et al.*, 2004; Roldan-Cortés *et al.*, 2014).

El uso de estos estimadores, parte del supuesto de que el valor de la variable auxiliar a nivel poblacional es conocido sin error de muestreo, siendo posible en ciertos casos, pero en otros casos se puede asumir el valor muestral como valor poblacional de la variable auxiliar (Roldan-Cortés *et al.*, 2014).

Cuadro 22. Estimadores para muestreo de razón y regresión.

Razón	$R = \frac{\mu_h}{\mu_x}$	(3-17)
Estimadores de Razón		
Estimador de Razón	$\hat{R} = \frac{\bar{y}}{\bar{x}} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{\sum_{i=1}^n x_i}$	(3-18)
Media	$\bar{y}_R = \hat{R}\mu_x = \frac{\bar{y}}{\bar{x}}\mu_x$	(3-19)
Varianza de la Razón	$S_{\hat{R}}^2 = \frac{1}{\mu_x^2} \frac{S_u^2}{n} \left(1 - \frac{n}{N}\right)$	(3-20)

	$S_u^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{R}x_i)^2}{n-1}$ $= \frac{\sum_{i=1}^n y_i^2 + \hat{R}^2 \sum_{i=1}^n x_i^2 - 2\hat{R} \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n-1}$	
Varianza de la Media	$S_{y\hat{R}}^2 = \frac{S_u^2}{n} \left(1 - \frac{n}{N}\right)$	(3-21)
Tamaño de muestra	$n = \frac{t_{n-1,(\alpha/2)}^2 N S_u^2}{L_{\hat{R}}^2 \mu_x^2 N + t_{n-1,(\alpha/2)}^2 S_u^2}$	(3-22)
Estimadores de Regresión		
Media	$\bar{y}_{REG} = \bar{y} + \hat{\beta}(\mu_x - \bar{x})$	(3-23)
Pendiente	$\hat{\beta} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$	(3-24)
Varianza de la Media	$S_{REG}^2 = \frac{S_{xy}^2}{n} \left(1 - \frac{n}{N}\right)$ $S_{xy}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 - \beta^2 \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-2}$	(3-25)
Tamaño de muestra	$n = \frac{t_{n-1,(\alpha/2)}^2 N S_{xy}^2}{L_{REG}^2 N + t_{n-1,(\alpha/2)}^2 S_{xy}^2}$	(3-26)

Donde:

μ_y = Media poblacional de la variable de interés (principal).

μ_x = Media poblacional de la variable auxiliar.

$L_{\hat{R}}$ = Tamaño aceptable del error de estimación de muestreo.

L_{REG} = Tamaño aceptable del error de estimación o de muestreo respecto a \bar{y}_{REG} .

Las otras variables ya han sido definidas.

3.4.5.4. *Estimadores de razón bajo estratificación*

Estos estimadores ofrecen una mejor estimación del total de la población, si el tamaño de muestra dentro de cada estrato (generalmente mayor a 30, aunque depende de la naturaleza de la población muestreada), trabajando con el apoyo de una razón ponderada; aunque es posible el uso razones por estrato, es necesario incrementar el tamaño de muestra por estrato (Sukhatme, 1956). Por esto los estimadores se basaron en la razón ponderada.

Los estimadores para este enfoque son los que se muestran en **Cuadro 23** (Kölh *et al.*, 2006; Roldan-Cortés *et al.*, 2014).

Cuadro 23. Estimadores para muestreo de razón bajo estratificación.

Razón	$\hat{R}_C = \frac{\sum_{h=1}^L W_h \bar{y}_h}{\sum_{h=1}^L W_h \bar{x}_h}$	(3-27)
Media	$\bar{y}_{\hat{R}_C} = \frac{\sum_{h=1}^L W_h \bar{y}_h}{\sum_{h=1}^L W_h \bar{x}_h} \mu_x$	(3-28)
Varianza	$S_{\bar{y}_{\hat{R}_C}}^2 = \frac{1}{N} \sum_{h=1}^L W_h \left(\frac{N_h - n_h}{n_h(N_h - 1)} \right) \times \left(\sum_{i=1}^{n_h} y_{i_h}^2 + \hat{R}_C^2 \sum_{i=1}^{n_h} x_{i_h}^2 - 2\hat{R}_C \sum_{i=1}^{n_h} x_{i_h} y_{i_h} \right)$	(3-29)
Tamaño de muestra	$S_h^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_h} (y_{h,i} - R_C x_{h,i})^2}{n_h - 1}$	(3-30)

El tamaño de muestra de estos estimadores se determinó mediante la adaptación de la fórmula de muestreo estratificado, reemplazando *ad hock* los valores de S_h^2 de la ecuación 3-30 para el caso de muestreo con estimadores de razón ponderada y valores obtenidos de dicha expresión se sustituyen en la fórmula 3-16, con el mismo criterio de amplitud basado en el inventario.

3.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.5.1. Biomasa y volumen

Los resultados para cada estimador de muestreo se observan en los cuadros subsecuentes, donde se puede observar los estimadores para el muestreo simple aleatorio y el muestreo estratificado.

Cuadro 24. Estimadores de Muestreo Simple Aleatorio (MSA) y Muestreo Estratificado (ME), para inventario de biomasa y volumen.

Estimador	B1 (Mg)	B2 (Mg)	B3 (Mg)	B4 (Mg)	B5 (Mg)	V1 (m ³)	V2 (m ³)
Media	61.677	61.399	65.464	66.722	74.718	75.565	72.005
Varianza de la Media	2.186	2.206	2.617	2.423	2.943	3.522	3.744
MSA							
Inventario	343,348	341,799	364,429	371,433	415,945	420,657	400,838
IC +95%	359,808	358,337	382,440	388,764	435,044	441,552	422,382
IC -95%	326,889	325,261	346,419	354,102	396,846	399,762	379,294
Precisión	4.79%	4.84%	4.94%	4.67%	4.59%	4.97%	5.37%
n (10%)	193	197	205	184	178	207	241

	n (5%)	701	712	739	668	650	745	853
	Media	61.643	61.369	65.404	66.690	74.675	75.524	71.961
	Varianza de la Media	1.551	1.572	1.773	1.707	2.095	2.550	2.759
ME	Inventario	343,155	341,634	364,096	371,254	415,705	420,430	400,594
	IC +95%	357,022	355,595	378,923	385,801	431,820	438,211	419,088
	IC -95%	329,288	327,673	349,269	356,706	399,590	402,650	382,100
	Precisión	4.04%	4.09%	4.07%	3.92%	3.88%	4.23%	4.62%
	n (10%)	143	146	146	135	132	157	187
	n (5%)	573	586	583	538	527	627	748

La estratificación provee una mejora en la precisión del inventario rondando el medio punto porcentual, ya sea para la estimación de biomasa o de volumen. Cabe mencionar que con la intensidad de muestreo realizada se alcanza una precisión menor al 5% para los inventarios; con excepción del inventario V2 en el MSA.

Los estimadores de Razón y Regresión emplean una variable auxiliar, que para este estudio fue el área basal (*AB*), ya que para estos bosques irregulares es la única variable que se puede conocer con mayor precisión y con un error mínimo de muestreo.

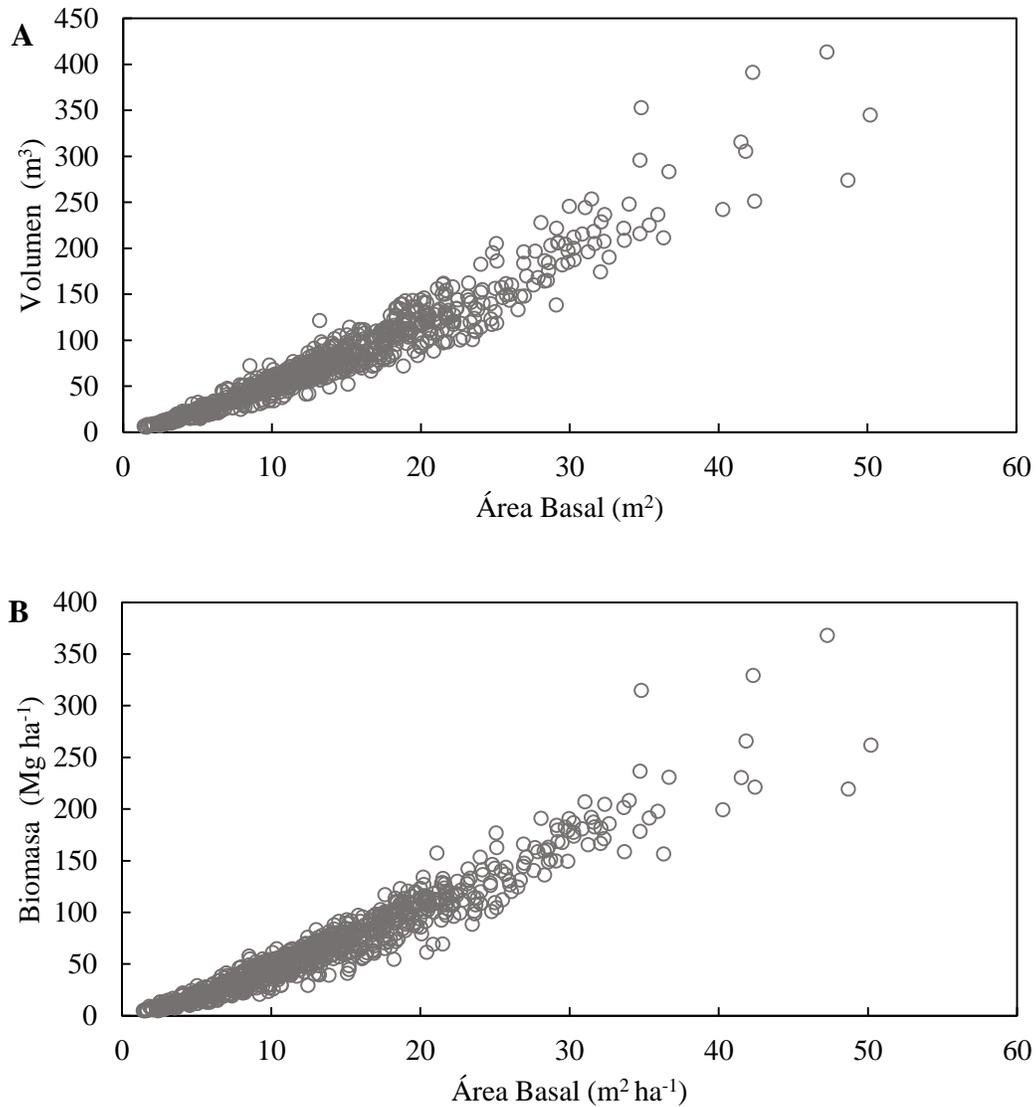


Figura 13. Relación volumen-área basal (A) y biomasa-área basal (B) por hectárea.

Para la relación volumen-área basal se presentó una correlación de 0.927, mientras que para la relación de biomasa-área basal la correlación fue de 0.928 (**Figura 13**). Con estos datos es posible afirmar que el área basal es una variable auxiliar competente para ser utilizada en la estimación de inventarios de razón y regresión.

Cuadro 25. Estimadores de Muestreo de Razón (ER) y Muestreo de Regresión (Ereg), para inventario de biomasa y volumen.

	B1 (Mg)	B2 (Mg)	B3 (Mg)	B4 (Mg)	B5 (Mg)	V1 (m³)	V2 (m³)
Media	61.670	61.39	65.456	66.714	74.709	75.555	71.995
Razón (R)	4.633	4.612	4.918	5.012	5.613	5.677	5.409
Varianza de la Media	0.162	0.187	0.262	0.150	0.166	0.360	0.612
ER							
Inventario	343,305	341,755	364,383	371,386	415,893	420,604	400,787
IC +95%	347,792	346,569	370,081	375,698	420,427	427,280	409,498
IC -95%	338,818	336,942	358,685	367,075	411,360	413,928	392,076
Precisión	1.31%	1.41%	1.56%	1.16%	1.09%	1.59%	2.17%
n (10%)	15	17	21	12	10	22	41
n (5%)	59	68	84	47	41	87	160
Media	61.690	61.412	65.477	66.736	74.734	75.580	72.018
β	5.509	5.508	5.960	5.822	6.424	6.912	6.939
Varianza de la Media	0.110	0.132	0.188	0.105	0.121	0.256	0.453
Ereg							
Inventario	343,419	341,868	364,503	371,511	416,033	420,742	400,915
IC +95%	347,113	345,918	369,328	375,123	419,906	426,369	408,406
IC -95%	339,724	337,819	359,677	367,899	412,161	415,114	393,424
Precisión	1.08%	1.18%	1.32%	0.97%	0.93%	1.34%	1.87%
n (10%)	10	12	15	8	8	16	30
n (5%)	40	49	61	33	30	62	119

En el inventario B3, la razón de biomasa-área basal muestra que existen aproximadamente 4.91 Mg de biomasa por cada m² de AB, mientras que la razón de volumen-área basal es de 5.67 m³ de Vta por cada m² de AB, teniendo como la media poblacional del AB de 13.3 m² ha⁻¹; esta AB se estimó en muestreo estratificado. Con estos datos es posible estimar de manera rápida un inventario de biomasa o volumen, para los casos en el que los datos son levantados con relascopio y número de árboles (Roldan-Cortés et al., 2014). Como se ha planteado, los estimadores de regresión tienden a ser sesgados, pero estos poseen la característica de ser precisos; incluso más que los calculados por razón cuando se tiene una muestra suficientemente grande.

Cuadro 26. Estimadores de Muestreo de Razón bajo Estratificación (ERE) para inventario de biomasa y volumen.

Estimador	B1 (Mg)	B2 (Mg)	B3 (Mg)	B4 (Mg)	B5 (Mg)	V1 (m³)	V2 (m³)
Media	61.643	61.369	65.404	66.690	74.675	75.524	71.961
Razón (R)	4.631	4.611	4.914	5.011	5.611	5.674	5.407
Varianza de la Media	0.0002	0.0002	0.0003	0.0002	0.0002	0.0004	0.0007
ERE							
Inventario	343,155	341,634	364,096	371,254	415,705	420,430	400,594
IC +95%	343,313	341,803	364,295	371,400	415,863	420,664	400,891
IC -95%	342,996	341,466	363,896	371,108	415,547	420,197	400,297
Precisión	0.05%	0.05%	0.05%	0.04%	0.04%	0.06%	0.07%
n (10%)	57	58	65	62	75	89	95
n (5%)	106	107	119	115	136	159	168

En el **Cuadro 26** se muestran los estimadores de muestro de razón bajo estratificación, con medias similares a los estimadores de muestreo razón (**Cuadro 25**), mejorando la precisión.

3.5.2. Contenido de Carbono

En el **Cuadro 27** y **Cuadro 28** se observa los datos estimados para la fracción de carbono contenido en bosques de encino mediante inventario de biomasa y estimando carbono mediante las proporciones que establece el IPCC (2006) con estimadores de muestreo para los inventarios B1, B2 y B3, que empleo modelos que fueron desarrollados en este trabajo en el capítulo 1.

Cuadro 27. Estimadores de Muestreo Simple Aleatorio (MSA) y Muestreo Estratificado (ME), para inventario de carbono almacenado.

Estimador	B1 (Mg)	B2 (Mg)	B3 (Mg)
Media	29.098*	28.967*	30.878*
Varianza de la Media	0.483	0.488	0.578
MSA			
Inventario	161,986	161,257	171,894
IC +95%	169,724	169,033	180,357
IC -95%	154,247	153,482	163,431

	Precisión	4.78%	4.82%	4.92%
	n (10%)	192	196	204
	n (5%)	696	708	734
	Media	29.081*	28.953*	30.849*
	Varianza de la Media	0.345	0.350	0.394
ME	Inventario	161,889	161,174	171,731
	IC +95%	168,428	167,757	178,719
	IC -95%	155,350	154,591	164,743
	Precisión	4.04%	4.08%	4.07%
	n (10%)	143	146	145
	n (5%)	572	585	582

Ya que el contenido de carbono se estimó mediante una proporción de la biomasa es de esperar que tenga un comportamiento similar (*Figura 14*), para el inventario de carbono también se empleó como variable auxiliar el área basal, ya que como se mencionó con anterioridad, es la única variable que se puede conocer con cierta precisión y un error mínimo de muestreo.

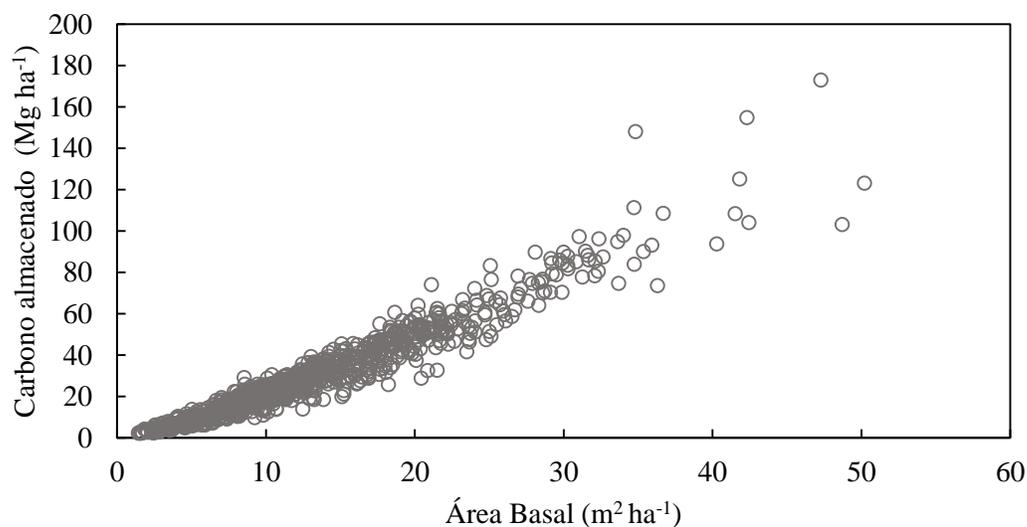


Figura 14. Relación carbono-área basal.

Esta relación de carbono almacenado (B3) y área basal presentó una correlación de 0.928, similar a la correlación biomasa-área basal, variando muy ligeramente.

Cuadro 28. Estimadores de Muestreo de Razón (ER) y Muestreo de Regresión (Ereg), para inventario de contenido de carbono.

	Estimador	B1 (Mg)	B2 (Mg)	B3 (Mg)
	Media	29.095*	28.964*	30.874*
	Razón (R)	2.186	2.176	2.320
	Varianza de la Media	0.036	0.041	0.057
ER	Inventario	161,965	161,237	171,872
	IC +95%	164,073	163,498	174,534
	IC -95%	159,857	158,976	169,211
	Precisión	1.30%	1.40%	1.55%
	n (10%)	15	17	21
	n (5%)	58	68	82
	Media	29.094	28.963	30.874
	B	2.589	2.588	2.801
	Varianza de la Media	0.025	0.030	0.041
Ereg	Inventario	162,019	161,291	171,929
	IC +95%	163,772	163,208	174,193
	IC -95%	160,267	159,373	169,664
	Precisión	1.08%	1.19%	1.32%
	n (10%)	10	12	15
	n (5%)	41	49	60

La razón de contenido de carbono del inventario B3 y AB muestra que existen 2.32 Mg de carbono almacenado por cada m² de AB, una media de AB por hectárea de 13.3 m² esta AB estimado en muestreo estratificado. Es evidente que al igual que en la estimación de biomasa y volumen, los estimadores de razón y regresión son los que presentaron mejores estimadores de muestreo, mejorando la precisión y el número de unidades muestrales con una precisión del 5%.

Cuadro 29. Estimadores de Muestreo de Razón bajo Estratificación (ERE) para inventario de contenido de carbono.

	Estimador	B1 (Mg)	B2 (Mg)	B3 (Mg)
	Media	29.081	28.953	30.849
ERE	Razón (R)	2.185	2.175	2.318
	Varianza de la Media	0.00004	0.00005	0.00007

Inventario	161,889	161,174	171,731
IC +95%	161,961	161,252	171,822
IC -95%	161,816	161,096	171,640
Precisión	0.04%	0.05%	0.05%
n (10%)	14	14	15
n (5%)	27	27	30

Los estimadores de muestreo bajo estratificación para el inventario de contenido de carbono (**Cuadro 29**) mejoran la precisión, además mejora el esfuerzo de muestreo que se realizará para una precisión del 5%. El inventario estimado varió marginalmente respecto al muestreo de razón y regresión (**Cuadro 28**).

3.6. CONCLUSIONES

La aplicación del modelo correcto para determinar biomasa individual y volumen es de gran importancia para obtener estimaciones precisas.

Para este ecosistema en particular, la biomasa almacenada es un reflejo proporcional al volumen, por lo que no se pudo descartar la posibilidad de contar en trabajos posteriores con factores de expansión que representen a la biomasa con una buena precisión.

El empleo de variables auxiliares optimiza los estimadores del muestreo derivando, en menores costos en los esfuerzos del levantamiento de unidades de muestreo.

La biomasa almacenada mediante el inventario B3 en área de estudio es de 364,096 Mg (± 199.5): Esta biomasa se estimó con modelos específicos (para cada especie) aditivos; donde la sumatoria de cada componente estructural (fuste, ramas y follaje) es la biomasa total del árbol, por lo que el contenido de carbono almacenado para este inventario es de 171,731 Mg (± 91.4). Los inventarios estimados con modelos desarrollados para otras regiones, pero para el mismo género tendió a sobre estimar la biomasa almacenada. Por lo que con estos resultados obtenidos en este trabajo se puede afirmar que el empleo de modelos locales o regionales mejoran las estimaciones de cualquier recurso que se evalúe (biomasa, carbono o volumen). La biomasa estimada con los modelos

específicos (B3) fue ligeramente mayor a los inventarios B1 y B2, quizá debido la mayor precisión de los modelos específicos.

El volumen estimado para el área de estudio con los modelos generados para la región (Capítulo 2) varió en 4.95% con respecto al volumen estimado con los modelos desarrollados para el estado de Guanajuato en 1976, aunque cuando se evaluaron estos modelos no se observaron diferencias estadísticas significativas entre estos (Capítulo 2).

La diferencia que existe entre las estimaciones de los inventarios de biomasa y de volumen radica principalmente en las características de los modelos que se emplearon para cada inventario con el respectivo error que cada uno de estos conlleva.

3.7. LITERATURA CITADA

- Acosta-Mireles, M., J. Vargas-Hernandez, A. Velásquez-Martínez y J. D. Etchevers-Barra. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia* 6:725-736.
- Bell, J., F. 1998. Basic truths for planning and executing an inventory. *In: Integrated tools or natural resources inventories in the 21st century*. 1998: August 16-20, Forest Service. Boise. United States of America. pp. 14-19.
- Cabrera-Andrade A., J. M. Cabrear-Landeros e I. Cabrera-Landeros. 2014. Refrendo de la autorización de aprovechamiento de recursos forestales maderables “Industrial Santa Fé S. de R. L.”. Consultores en Manejo Forestal Sustentable S. C. Guanajuato, México. 151 p.
- Cochran, W. G. 1977. *Sampling techniques*. Third edition. John Wiley & Sons. New York, NY, USA. 428 p.
- Dixon, R. K., S. Brown, R. A. Houghton, A. M. Solomon, M. C. Trexler and J. Wisniewski. 1994. *Science* 23:185-190
- Domke, G.M., C. M. Oswalt, C. W. Woodall and J. A. Turner. 2013. Estimation of Merchantable Bole Volume and Biomass above Sawlog Top in the National Forest Inventory of the United States. *Journal of Forestry* 111(6):383–387. doi: 10.5849/jof.13-042
- Hoover, C. M., M. J. Duce and R. A. Colter and Mariko Yamasaki. 2018. Evaluation of alternative approaches for landscape-scale biomass estimation in a mixed-species northern forest. *Forest Ecology and Management* 409 (2018) 552–563.

- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2008. Conjunto de datos vectoriales escala 1: 1000000. Unidades climáticas. <http://www.beta.inegi.org.mx/temas/mapas/climatologia/> (Consulta: septiembre de 2017)
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2014. Conjunto de datos vectorial edafológico escala 1: 250000 Serie II (Continuo Nacional). http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/edafologia/vectorial_serieii.aspx. (Consulta: septiembre de 2017)
- IPCC (International Plant Protection Convention). 2006. National Greenhouse Gas Inventories Programme. 2006 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Institute for Global Environmental Strategies (IGES): Hayama, Kanagawa, Japan.
- Johnson, W. E. 2000. Forest sampling desk reference. CRC Press LLC. United State of Ameica. 985 p.
- Köhl, M., S. S. Magnussen and M. Marcheti. 2006. Sampling methods, remote sensing and GIS multi resource forest inventory. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York. 373 p.
- Návar, J. 2009. Allometric equations for tree species and carbon stocks for forests of northwestern Mexico. *Forest Ecology and Management* 257: 427-434.
- Návar-Cháidez, J. J. 2010. Alometría para biomasa en especies arbóreas del noroeste de México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 12 (2010): 507-519
- NOM-152-SEMARNAT-2006. Lineamientos, criterios y especificaciones de los contenidos de los programas de manejo forestal para el aprovechamiento de recursos forestales maderables en bosques, selvas y vegetación de zonas áridas. México. 24p.
- Pearson, T. R. H., S. L. Brown and R. A. Birdsey. 2007. Measurement Guidelines for the Sequestration of Forest Carbon. Forest Service – USDA. Delawer, OH. 42p.
- Picard, N., E. Rutishauser, P. Ploton, A. Ngomanda and M. Henry. 2015. Should tree biomass allometry be restricted to power models?. *Forest Ecology and Management* 353 156–163
- Roldán-Cortés, M. A., H. M. De los Santos-Posadas, H. Ramírez-Maldonado, J. R. Valdez-Lazalde, G. Ángeles-Pérez y A. Velázquez-Martínez. 2014. Estimadores de muestreo para inventario de plantaciones forestales comerciales de eucalipto en el sureste mexicano. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 5 (26) 38-57. doi: 10.29298/rmcf.v5i26.289

- Schreuder, H. T., R. Ernst and H. Ramírez-Maldonado. 2004. Statistical techniques for sampling and monitoring natural resources. USDA-Forest Service, Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-126. Rocky Mountain Research Station. 111 p.
- Sukhatme P., V. 1956. Teoría de encuestas por muestreo con aplicaciones. Secretaría de Economía. Dirección General de Estadística. Departamento de Muestreo. Fondo de Cultura Económica. México, D.F., México. 495 p.
- Secretaría de Agricultura Ganadería (SAG). 1976. Inventario forestal del estado de Guanajuato. Subsecretaría Forestal y de la Fauna. Dirección General del Inventario Forestal. Núm. 36. México, D. F., México. 56 p.
- Sileshi, G. W. 2014. A critical of forest biomass estimation models, common mistakes and corrective measures. *Forest Ecology and Management* 329: 237-254.
- Sun, Y., L. Meng, L. Tian, G. Li and O. J. Sun. 2016. Assessing current stocks and future sequestration potential of forest biomass carbon in Daqing Mountain Nature Reserve of Inner Mongolia, China. *Journal of Forest Research* 27(4):931–938. doi 10.1007/s11676-016-0214-5
- Tillé, Y. 2005. Teoría de muestreo. Universidad de Neuchatel. Neuchatel, Suiza. p 80.
- Tompson, S. K. 2002, *Sampling*. Willey Series in Probability and Statistics. Pennsylvania State university. A Willey-Interscience Publication. Second Edition. U. S. A. 367p.
- Vargas-Larreta, B., C. A. López-Sánchez, J. J. Corral-Rivas, J. O. López-Martínez, C. G. Aguirre-Calderón and J. G. Álvarez-González. 2017. Allometric Equations for Estimating Biomass and Carbon Stocks in the Temperate Forests of North-Western Mexico. *Forests* 8, 269. doi:10.3390/f8080269
- Wang, X., S. Wang and L. Dai. 2018. Estimating and mapping forest biomass in northeast China using joint forest resources inventory and remote sensing data. *Journal of Forest Research* 29(3):797–811. doi.org/10.1007/s11676-017-0504-6
- Yemshanov, D., D. W. McKenney and J. H. Pedlar. 2012. Mapping forest composition from the Canadian National Forest Inventory and land cover classification maps. *Environ Monit Assess* 184:4655–4669.
- Zhang, X., Q.V. Co, C. Xiang, A. Duan and J. Zhang. 2017. Predicting total and component biomass of Chinese fir using a forecast combination method. *iForest* 10: 687-691. doi: 10.3832/ifor2243-010

CONCLUSIONES GENERALES

Los modelos son una representación de la realidad, que intentan simplificar la enorme cantidad de interacciones que ocurren en el mundo real. Estos modelos son herramientas importantes que nos ayudan a diversos fines, como estimar las existencias de recursos en un punto del tiempo, o bien proyectar su existencia en el futuro con un error medible.

México no cuenta con suficientes modelos alométricos locales que determinen biomasa y volumen. Con este trabajo se presentan modelos específicos para determinar biomasa y volumen de seis especies de encino, así como sus modelos generales de biomasa y volumen respectivos para la región de la sierra de Santa Rosa, Guanajuato.

Estos modelos permiten, a nivel local, reducir la incertidumbre asociada al estimar biomasa y carbono en masas arboladas en pie. Se presenta además diferentes estructuras para las necesidades específicas del usuario. De esta forma es posible determinar la biomasa de cada componente estructural, así como modelos multiespecie aditivos (grupos) y generales.

Para volumen se actualiza el modelo propuesto en 1976. Si bien, en el Capítulo 2 se demostró que no existieron diferencias estadísticas en las estimaciones de volumen entre el modelo generado en 1976 y el modelo propuesto en este trabajo la principal aportación del modelo propuesto es que permite una participación eficiente de los componentes del volumen y muestra las relaciones geométricas específicas de cada especie.

También se estimó la biomasa y carbono almacenado (CC) en los bosques, donde se desarrolló este trabajo, a fin de validar la compatibilidad de los modelos con datos provenientes de inventarios forestales operativos. Mediante estimadores de inventario se determinó que estos bosques almacenan en promedio $30.8 \text{ Mg C ha}^{-1} (\pm 0.02)$, mientras que la biomasa promedio es de $65.4 \text{ Mg ha}^{-1} (\pm 0.03)$ y en volumen promedio de $75.5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} (\pm 0.04)$ (*Vta*).

Estos modelos serán de utilidad para la región y el estado, ya sea para trabajos de investigación posteriores, para la actividad forestal de particulares, cubriendo el déficit de modelos para la región. Los modelos locales y regionales para la evaluación de recursos naturales (Biomasa, Volumen y CC) deben estar bajo constante evolución y validación, principalmente para bosques que se encuentra bajo manejo, donde uno de los supuestos es el mejoramiento de la masa forestal y sus productos.

La gestión de bosques de la Sierra de Santa Rosa involucra diferentes actividades como: la cosecha, transformación (industria) y repoblación. Estas actividades influyen directamente en los sumideros de C existentes. Con la adecuada y enfocada gestión de los bosques de zona se puede tener cierto grado de control y determinar en qué y dónde se pueden mantener los almacenes de C.

Finalmente es recomendable ampliar el espectro de modelos para las especies faltantes de la región, siendo necesario el desarrollo de otros trabajos de investigación complementarios como los relacionaos a densidad de la madera, gravedad específica, incremento de la masa en la región, por mencionar algunos.