



**COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO**

**POSTGRADO EN CIENCIAS FORESTALES**

**ESTRUCTURA, BIOMASA AÉREA Y PROPIEDADES  
TECNOLÓGICAS DE DOS ENCINOS EN BOSQUES  
DE IXTLÁN DE JUÁREZ, OAXACA**

**FAUSTINO RUIZ AQUINO**

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

**DOCTOR EN CIENCIAS**

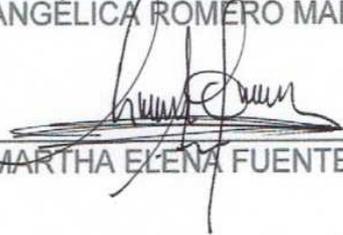
**MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO**

2014

La presente tesis titulada: **Estructura, biomasa aérea y propiedades tecnológicas de dos encinos en bosques de Ixtlán de Juárez Oaxaca**, realizada por el alumno: **Faustino Ruiz Aquino**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS  
POSTGRADO EN CIENCIAS FORESTALES

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO	 _____
	DR. JUAN IGNACIO VALDEZ HERNÁNDEZ
ASESOR	 _____
	DR. MARCOS MIGUEL GONZÁLEZ PEÑA
ASESOR	 _____
	DR. FILEMÓN MANZANO MÉNDEZ
ASESOR	 _____
	DRA. ANGÉLICA ROMERO MANZANARES
ASESOR	 _____
	DRA. MARTHA ELENA FUENTES LÓPEZ

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Octubre de 2014

# ESTRUCTURA, BIOMASA AÉREA Y PROPIEDADES TECNOLÓGICAS DE DOS ENCINOS EN BOSQUES DE IXTLÁN DE JUÁREZ, OAXACA

Faustino Ruiz Aquino, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2014

## RESUMEN GENERAL

El presente trabajo se realizó con el objetivo de caracterizar a dos especies del género *Quercus*, en su entorno natural y a su madera como principal producto, con el fin de proporcionar información detallada para eventualmente incorporarlas al aprovechamiento forestal en la comunidad de Ixtlán de Juárez, Oaxaca. Se analizaron la estructura, diversidad arbórea y biomasa aérea en tres unidades de muestreo (UM) de 50 x 50 m. Se registraron 799 individuos, pertenecientes a 11 familias y 19 especies. Con base en los índices de valor de importancia y forestal, las especies más importantes fueron *Q. laurina* y *Q. crassifolia*; el análisis de los patrones de distribución espacial de estas especies reveló que pueden coexistir y, su distribución se atribuye a estrategias de regeneración y prácticas silvícolas en la zona. Se cuantificó la biomasa aérea total en 100.15 Mg ha<sup>-1</sup> para *Q. laurina* y 129.97 Mg ha<sup>-1</sup> para *Q. crassifolia*. En el ámbito tecnológico, la anatomía de la madera de *Q. laurina* y *Q. crassifolia* presentó semejanza en el tipo de porosidad anular, forma de los poros, radios uniseriados y multiseriados, tipo de parénquima y fibras. En cuanto a la física de la madera, *Q. laurina* tuvo alta correlación entre el espesor de pared de las fibras y la densidad básica ( $r = 0.97$ ) y en *Q. crassifolia*, la correlación más alta se dio entre la contracción volumétrica y el espesor de pared de las fibras ( $r = 0.97$ ). Los ensayos mecánicos indicaron una madera de alta resistencia mecánica y al impacto. Químicamente se determinó que en la madera de estas dos especies el contenido de polímeros estructurales fue estadísticamente similar y que, en la corteza se concentran altos contenidos de suberina. También, se registró un alto poder calorífico y bajo contenido de cenizas en la madera y el carbón. Se concluye que ambas especies tienen alto potencial para ser ingresadas al pago por servicios ambientales, aprovechados con fines maderables o como dendroenergéticos y la corteza sugiere un alto potencial para la obtención de biopolímeros.

**Palabras clave:** *Distribución espacial, alometría, fibras, polisacáridos, carbono fijo.*

# STRUCTURE, AERIAL BIOMASS AND TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF TWO OAKS IN FORESTS OF IXTLÁN DE JUÁREZ, OAXACA

Faustino Ruiz Aquino, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2014

## GENERAL SUMMARY

This study was undertaken for the purpose of analyzing two species of the genus *Quercus* in their natural environment, particularly their wood as their primary product, in order to provide detailed information for the future incorporation of these species into the forest industry of the community of Ixtlán de Juárez, Oaxaca. Structure, tree diversity and aboveground biomass were analyzed in three 50 x 50 m sampling units (UM). 799 individual trees were counted, belonging to 11 families and 19 species. Based on their rate of importance and forest value index, the most important species were *Q. laurina* and *Q. crassifolia*; analysis of the spatial distribution patterns of these species revealed that they can coexist, and their distribution is attributed to regeneration strategies and forestry practice in the area. Total aboveground biomass amounted to 100.15 Mg ha<sup>-1</sup> for *Q. laurina* and 129.97 Mg ha<sup>-1</sup> for *Q. crassifolia*. From a technological standpoint, the wood anatomy of *Q. laurina* and *Q. crassifolia* presented similarities in ring type, pore shape, uniseriate and multiseriate rays, type of parenchyma and fibers. In terms of wood physics, there was a high correlation between fiber wall thickness and basic density ( $r = 0.97$ ) in *Q. laurina*, whereas in *Q. crassifolia*, the highest correlation occurred between volumetric contraction and wall thickness of the fibers ( $r = 0.97$ ). Mechanical tests indicated a wood of high mechanical and shock resistance. Chemical tests showed that in these two species structural polymer content of the wood was statistically similar and that both had high rates of suberin content in their bark. Moreover, both species were found to have a high calorific value and low ash content in their wood and charcoal. In conclusion, both species have fine commercial potential for environmental services, for harvesting for wood or wood-energy purposes, and for their bark, which has good potential for the production of biopolymers.

**Key words:** *Spatial distribution, allometry, fibers, polysaccharides, fixed carbon.*

## DEDICATORIA

*A mi hija **Karlita**, la niña hermosa surgida de un cuento de princesas, hálito divino que alegra mi existencia y da sentido a mi vida. Tu sonrisa me fortalece, tu voz dulce y apacible en todo momento me motivó para culminar esta meta.*

*Con profundo amor para mi hijo **Roberto**, el niño de corazón noble, de quien cualquier padre se sentiría orgulloso. Sentiste mucho más mi ausencia y lloramos juntos en cada despedida, me has enseñado que la madurez no se mide con los años, me siento honrado de caminar de tu mano.*

*A mi esposa **Mary**, quien sin reservas me brindó todo su apoyo pese a todas las adversidades. Albor de la familia donde nuestros triunfos se solazan, acepción de amor que me acompaña en esta travesía, es un privilegio sentir tu presencia a cada instante.*

*A mi extraordinaria familia, por alentarme en todo momento. Con cariño especial para mis sobrinos, ojalá que algún día este trabajo los motive.*

## AGRADECIMIENTOS

Al **Programa de Mejoramiento al Profesorado (PROMEP)** por el financiamiento otorgado para realizar estudios de doctorado Folio UNSIJ-001.

Al **Dr. Juan Ignacio Valdez Hernández**, quien no dudó en aceptarme como alumno y fungió como Consejero Académico, compartiendo con gusto sus conocimientos en ciencias forestales.

La dirección de los capítulos de tecnología de la madera estuvo a cargo del **Dr. Marcos Miguel González Peña**, quien financió la parte experimental y supervisó a detalle todos los procedimientos. Su ética y compromiso fueron determinantes para concluir con éxito mi formación académica.

A la **Dra. Angélica Romero Manzanares**, por su profesionalismo y atinadas observaciones en las reuniones de consejo, y durante el proceso de revisión de cada capítulo.

A mis asesores: **Dr. Filemón Manzano Méndez** y **Dra. Martha Elena Fuentes López**, por su disposición y apoyo para mejorar sustancialmente este trabajo, y también por animarme a cada instante.

A todos los profesores del Colegio de Postgraduados por compartir sus conocimientos en beneficio de mi formación, en especial al **Dr. Miguel Ángel López López** y al **Dr. Gregorio Ángeles Pérez**, por su amistad, sencillez y paciencia para responder a cada uno de mis cuestionamientos.

A la **Universidad Autónoma Chapingo (UACH)**, y a sus profesores: **M.C. Mario Fuentes Salinas**, **Dra. Amparo Borja de la Rosa**, **Ing. Gonzalo Novelo González** y **Dr. Rogelio Flores Velázquez**, por las facilidades para usar el equipo a su cargo y por compartir sin reservas su experiencia y sabiduría en el sorprendente mundo de la madera.

Al personal del laboratorio de anatomía de la madera y del aserradero de la **UACH**, por la amistad y apoyo brindado en todo momento.

A la **Ing. Úrsula Revilla González** por su valiosa ayuda en la determinación química de la corteza y la caracterización energética del carbón.

A la **Biól. Greta Hanako Rosas Saito** por su colaboración en el estudio de microscopía electrónica de barrido.

A mis colegas y compañeros de clase, ha sido un privilegio conocerlos y departir con ustedes dentro y fuera del ColPos, muchas gracias por concederme el alto honor de su amistad.

## CONTENIDO

RESUMEN GENERAL .....	iii
GENERAL SUMMARY .....	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTOS .....	vi
CONTENIDO .....	vii
INDICE DE CUADROS .....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xiii
ABREVIATURAS.....	14
CAPÍTULO I .....	17
INTRODUCCIÓN GENERAL .....	17
1.1. OBJETIVOS .....	20
1.2. REFERENCIAS.....	21
CAPITULO II .....	24
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE DOS ENCINOS Y ATRIBUTOS ECOLÓGICOS DE COMUNIDADES COHABITADAS EN LA SIERRA JUÁREZ, OAXACA .....	24
2.1. RESUMEN .....	24
2.2. ABSTRACT .....	24
2.3. INTRODUCCIÓN .....	25
2.4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	26
2.4.1. Área de estudio.....	26
2.4.2. Muestreo y medición de variables.....	26
2.4.3. Índices de importancia estructural y de diversidad .....	27
2.4.4. Distribución espacial .....	28
2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	28
2.5.1. Estratificación de alturas.....	28
2.5.2. Distribución diamétrica.....	29
2.5.3. Índices estructurales .....	30
2.5.4. Diversidad de especies.....	33
2.5.5. Distribución espacial .....	34
2.6. CONCLUSIONES .....	39
2.7. REFERENCIAS.....	39
CAPÍTULO III .....	43

ECUACIONES DE BIOMASA AÉREA PARA <i>Quercus laurina</i> y <i>Q. crassifolia</i> en OAXACA .....	43
3.1. RESUMEN .....	43
3.2. ABSTRACT .....	43
3.3. INTRODUCCIÓN .....	44
3.4. OBJETIVO .....	46
3.5. MATERIALES Y MÉTODOS .....	46
3.5.1. Área de estudio.....	46
3.5.2. Selección y derribo de árboles.....	47
3.5.3. Separación por componentes .....	48
3.5.4. Pesado y secado de muestras.....	48
3.5.5. Análisis estadístico .....	49
3.5.6. Biomasa aérea por unidad de superficie.....	50
3.5.7. Factor de expansión de biomasa .....	50
3.6. RESULTADOS.....	51
3.7. DISCUSIÓN .....	60
3.8. CONCLUSIONES .....	62
3.9. REFERENCIAS.....	63
CAPÍTULO IV .....	69
ESTRUCTURA ANATÓMICA DE LA MADERA DE DOS ENCINOS DE OAXACA ..	69
4.1. RESUMEN .....	69
4.2. ABSTRACT .....	69
4.3. INTRODUCCIÓN .....	70
4.4. MATERIALES Y MÉTODOS .....	71
4.4.1. Área de estudio y selección de los árboles.....	71
4.4.2. Caracterización macroscópica .....	72
4.4.3. Caracterización microscópica .....	72
4.4.4. Propiedades físicas.....	73
4.4.5. Análisis estadístico .....	73
4.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	73
4.5.1. Caracterización macroscópica .....	73
4.5.2. Caracterización microscópica .....	74
4.5.3. Propiedades físicas.....	82
4.5.4. Relación entre propiedades físicas y parámetros anatómicos.....	83
4.6. CONCLUSIONES .....	84

4.7. REFERENCIAS.....	85
CAPÍTULO V .....	89
PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA DE DOS ENCINOS MEXICANOS: RELACIÓN CON PROPIEDADES FÍSICAS SELECTAS.....	89
5.1. RESUMEN .....	89
5.2. ABSTRACT .....	89
5.3. INTRODUCCIÓN .....	90
5.4. MATERIALES Y MÉTODOS .....	91
5.4.1. Área de estudio, selección de árboles y aserrío .....	91
5.4.2. Propiedades físicas.....	92
5.4.3. Propiedades mecánicas.....	92
5.4.4. Análisis estadístico .....	93
5.5. RESULTADOS.....	93
5.5.1. Propiedades físicas.....	93
5.5.2. Resistencia a la flexión estática .....	94
5.5.3. Resistencia a la flexión dinámica .....	96
5.5.4. Resistencia a la compresión .....	96
5.5.5. Dureza, y resistencia al cortante, tensión perpendicular, y al rajado .....	98
5.5.6. Modelación de las propiedades .....	99
5.6. DISCUSIÓN .....	101
5.7. CONCLUSIONES .....	105
5.8. REFERENCIAS.....	105
CAPÍTULO VI .....	109
PROPIEDADES ENERGÉTICAS Y CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LA MADERA Y LA CORTEZA DE DOS ENCINOS DE OAXACA, MÉXICO.....	109
6.1. RESUMEN .....	109
6.2. ABSTRACT .....	109
6.3. INTRODUCCIÓN .....	110
6.4. MATERIALES Y MÉTODOS .....	111
6.4.1. Selección de árboles y preparación de los especímenes .....	111
6.4.2. Caracterización química de la madera.....	112
6.4.3. Caracterización química de la corteza .....	113
6.4.4. Fabricación y caracterización del carbón vegetal .....	113
6.4.5. Caracterización energética de la madera, el carbón vegetal y la corteza interna.....	113

6.4.6. Análisis estadístico .....	114
6.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	114
6.5.1. Caracterización química de madera .....	114
6.5.2. Caracterización química de la corteza.....	117
6.5.3. Compuestos inorgánicos .....	120
6.6. CONCLUSIONES .....	123
6.7. REFERENCIAS.....	123
DISCUSION GENERAL .....	129
REFERENCIAS.....	135
CONCLUSIONES GENERALES.....	139
RECOMENDACIONES .....	141

## INDICE DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 2.1. Especies arbóreas con los mayores índices de valor de importancia (IVI) e índices de valor forestal (IVF) relativos por unidad de muestreo .....	31
Cuadro 2.2. Valores de riqueza y diversidad de especies por unidad de muestreo ..	33
Cuadro 2.3. Coeficientes de semejanza florística en las tres unidades de muestreo	34
Cuadro 3.1. Diámetro y altura de <i>Quercus laurina</i> y <i>Q. crassifolia</i> , medidos en unidades de muestreo. ....	51
Cuadro 3.2. Diámetro, altura y biomasa de <i>Quercus laurina</i> y <i>Q. crassifolia</i> , utilizados para generar las ecuaciones alométricas .....	52
Cuadro 3.3. Distribución de biomasa aérea por componente.....	53
Cuadro 3.4. Modelos evaluados para biomasa aérea total de <i>Quercus laurina</i> . ....	53
Cuadro 3.5. Modelos evaluados para biomasa aérea total de <i>Quercus crassifolia</i> ..	54
Cuadro 3.6. Parámetros y estimadores de regresión de la ecuación 4 para componentes de <i>Quercus laurina</i> . ....	55
Cuadro 3.7. Parámetros y estimadores de regresión de la ecuación 4 para componentes de <i>Quercus crassifolia</i> .....	56
Cuadro 3.8. Ecuaciones generadas para especies de <i>Quercus</i> , aplicadas a datos medidos en unidades de muestreo. ....	59
Cuadro 4.1. Características anatómicas macroscópicas de la madera de <i>Q. laurina</i> y <i>Q. crassifolia</i> . ....	74
Cuadro 4.2. Dimensiones y número de células de radios de la madera de <i>Q. laurina</i> y <i>Q. crassifolia</i> . ....	75
Cuadro 4.3. Dimensiones de los vasos de la madera de <i>Q. laurina</i> y <i>Q. crassifolia</i> . ....	77
Cuadro 4.4. Dimensiones de las fibras de la madera de <i>Q. laurina</i> y <i>Q. crassifolia</i> ..	82
Cuadro 4.5. Propiedades físicas de la madera de <i>Q. laurina</i> y <i>Q. crassifolia</i> .....	83
Cuadro 4.6. Correlación entre propiedades físicas y parámetros anatómicos de la madera de <i>Q. laurina</i> y <i>Q. crassifolia</i> .....	84
Cuadro 5.1. Propiedades físicas de la madera de <i>Quercus laurina</i> y <i>Q. crassifolia</i> ..	94
Cuadro 5.3. Resistencia a la compresión axial (CA) y perpendicular al eje (CP) en condición seca (12% CH), en pequeños especímenes de madera de <i>Quercus laurina</i> y <i>Q. crassifolia</i> . ....	97
Cuadro 5.4. Dureza, y resistencia al cortante, al rajado, y a la tensión perpendicular en condición seca (12% CH), en pequeños especímenes de madera de <i>Quercus laurina</i> y <i>Q. crassifolia</i> . ....	99
Cuadro 5.5. Correlación de Pearson (r) entre las propiedades físicas y los parámetros mecánicos de la madera de <i>Quercus laurina</i> y <i>Q. crassifolia</i> . ....	100

Cuadro 5.6. Estadísticos de los modelos para predecir las propiedades mecánicas a partir de las propiedades físicas de pequeños especímenes de madera de <i>Quercus laurina</i> y <i>Q. crassifolia</i> . .....	101
Cuadro 6.1. Composición química de la madera de <i>Q. laurina</i> y <i>Q. crassifolia</i> (%). 115	
Cuadro 6.2. Composición química de la corteza de <i>Q. laurina</i> y <i>Q. crassifolia</i> . .....	117
Cuadro 6.3. Compuestos inorgánicos en madera y corteza de <i>Q. laurina</i> y <i>Q. crassifolia</i> . .....	120
Cuadro 6.4. Características energéticas en madera, la corteza y el carbón vegetal de <i>Q. laurina</i> y <i>Q. crassifolia</i> .....	122

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1. Estratificación vertical del componente arbóreo de las unidades de muestreo .....	29
Figura 2.2. Distribución diamétrica del componente arbóreo de las unidades de muestreo .....	30
Figura 2.3. Unidad de muestreo 1, distribución espacial e índice de distribución espacial A) <i>Quercus laurina</i> y B) <i>Q. crassifolia</i> .....	35
Figura 2.4. Unidad de muestreo 2, distribución espacial e índice de distribución espacial A) <i>Quercus laurina</i> y B) <i>Q. crassifolia</i> .....	36
Figura 2.5. Unidad de muestreo 3, distribución espacial e índice de distribución espacial A) <i>Quercus laurina</i> y B) <i>Q. crassifolia</i> .....	37
Figura 2.6. Distribución espacial e Índices de distribución espacial <i>Q. laurina</i> y <i>Q. crassifolia</i> : A) UM1, B) UM2 y C) UM3.....	38
Figura 3.1. Biomasa aérea total y por componentes para <i>Quercus laurina</i> , en kg de peso anhidro .....	57
Figura 3.2. Biomasa aérea total y por componentes para <i>Quercus crassifolia</i> , en kg de peso anhidro. ....	58
Figura 4.1. A) <i>Q. laurina</i> (10x), RU = radio uniseriado; RM = radio multiseriado. B) <i>Q. crassifolia</i> (4x); RA = radio agregado. C) <i>Q. laurina</i> (10x), RH = radio homogéneo. D) <i>Q. crassifolia</i> (10x), EV = elemento del vaso.....	76
Figura 4.2. <i>Q. laurina</i> A) porosidad anular (4x), PA = parénquima apotraqueal difuso. B) Ti = tílides (10x). C) EV = elemento de vaso en material disociado (10x). D) Pu = puntuaciones areoladas en elemento de vaso (40x). ....	78
Figura 4.3. <i>Q. crassifolia</i> A) porosidad anular (4x); PA = parénquima apotraqueal difuso. B) Ti = tílides (40x). C) EV = elemento de vaso; FT = fibrotraqueida; FL = fibra libriforme. D) Pu = puntuaciones areoladas en elemento de vaso.....	79
Figura 4.4. <i>Q. crassifolia</i> . Microscopio electrónico de barrido: A) Ti = tílides en elemento de vaso, corte radial. B) PPS = placa perforada simple. Microscopio de luz: C) PA = parénquima, corte radial. D) Fibra septada (FS) (40x).....	81
Figura 5.1. Ajuste del modelo de MOR en la condición seca (12% CH), de la madera de <i>Quercus laurina</i> y <i>Q. crassifolia</i> . Regresores en el modelo: MOE12%, RA, Db, CHV, St, Sr y Do (R <sup>2</sup> = 0.930).....	104
Figura 6.1. Composición de los carbohidratos en la madera y corteza, en % de los monosacáridos neutros totales; QC = <i>Q. crassifolia</i> ; QL = <i>Q. laurina</i> ; CE = corteza externa; CI = corteza interna. Las barras representan la media de 6 replicas para la madera, y de 2 réplicas para la corteza. ....	116

## ABREVIATURAS

AC	Contenido de cenizas
ARM	Ancho de radios multiseriados
ARU	Ancho de radios uniseriados
AT	Altura total
BT	Biomasa total
CA	Compresión axial
CD	Categoría diamétrica
CE	Corteza externa
CF	Carbono fijo
CH	Contenido de humedad
CHv	Contenido de humedad en verde
CI	Corteza interna
CM	Carga máxima
CME	Cuadrado medio del error
CP	Compresión perpendicular
CV	Contracción volumétrica
Db	Densidad básica
DE	Densidad energética
DF	Diámetro de la fibra
DL	Diámetro de lumen
DM <sub>g</sub>	Índice de diversidad de Margalef
Dn	Densidad normal, al 12% de contenido de humedad
DN	Diámetro normal
Do	Densidad anhidra
Dv	Densidad verde
DV	Diámetro de vaso
EE	Error estándar
ELP	Esfuerzo al límite proporcional
EM	Esfuerzo máximo

EPF	Espesor de pared de la fibra
EV	elemento de vaso
FEB	Factor de expansión de biomasa
FL	Fibra libriforme
FS	Fibra septada
FT	Fibrotraqueida
H'	Índice de Shannon-Weiner
HW	Duramen
IS <sub>s</sub>	Índice de Sorensen
IVC	Índice de valor del combustible
IVF	Índice de valor forestal
IVIR	Índice de importancia relativa
LK	Lignina Klason
LSA	Lignina soluble en ácido
LV	Longitud de los elementos de vaso
MOE	Módulo de elasticidad
MOR	Módulo de ruptura
PA	Parénquima apotraqueal difuso
PCS	Poder calorífico superior
PPS	Placa perforada simple
PSF	Punto de saturación de la fibra
Pu	Puntuaciones areoladas
QC	<i>Quercus crassifolia</i>
QL	<i>Quercus laurina</i>
<i>r</i>	Coefficiente de correlación de Pearson
<i>r</i> <sup>2</sup>	Coefficiente de determinación ajustado
RA	Relación de anisotropía
RAg	Radio agregado
RH	Radio homogéneo
RM	Radio multiseriado
RU	Radio uniseriado

$S_l$	Contracción longitudinal
$S_r$	Contracción radial
$S_t$	Contracción tangencial
SW	Albura
TCM	Trabajo a la carga máxima
Ti	Tilosis
TLP	Trabajo al límite proporcional
UM	Unidad de muestreo
VS	Contracción volumétrica
W	Trabajo total de ruptura

## CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN GENERAL

El desarrollo de nuevos productos derivados del aprovechamiento forestal, así como la inclusión de diferentes especies a la producción maderable nacional, pueden contribuir de manera eficiente a conseguir los objetivos actuales del gobierno federal mexicano, entre ellos, incrementar la producción y productividad forestal en un 100%. Este incremento contempla entre sus principales componentes, el abasto y la transformación maderable, aumentando el volumen de oferta de productos forestales certificados (PRONAFOR, 2013). Ante tal panorama, se hace necesaria la caracterización general de las especies forestales, sobre todo las que tienen potencial maderable, como es el caso de algunas especies del género *Quercus*.

El género *Quercus* es el más diverso dentro de la familia Fagaceae, con cerca de 400 especies a nivel mundial (Aldrich y Cavender-Bares, 2011), de las que aproximadamente 250 se distribuyen en el continente Americano (Oh y Manos, 2008). Los registros recientes indican la distribución de 161 especies en México (Valencia, 2004), con unas 60 especies que presentan características favorables para el aprovechamiento maderable (Quintanar-Olguín, 2002). En el estado de Oaxaca se reportan 48 especies de *Quercus* (Valencia, 2004), en donde el distrito municipal con mayor riqueza es Ixtlán de Juárez, con 23 especies (Valencia y Nixon, 2004).

En el predio de Ixtlán de Juárez, Oaxaca, los bosques de pino-encino han estado bajo aprovechamiento maderable durante las últimas seis décadas (Castellanos-Bolaños *et al.*, 2008). El manejo forestal ha favorecido el aprovechamiento maderable de *Pinus* como género principal y *Quercus* como género secundario (Álvarez, & Rubio, 2013). En este bosque, los encinos *Quercus laurina* Humb. & Bonpl. y *Quercus crassifolia* Humb. & Bonpl. cohabitan con especies del género *Pinus* y otras latifoliadas como *Arbutus xalapensis* Kunth, *Clethra lanata* Michx., *Quercus corrugata* Hook., *Quercus rugosa* Masam. (Castellanos-Bolaños *et al.*, 2008, 2010).

Para el manejo sustentable de los recursos forestales, es importante comprender la dinámica de los ecosistemas que dan origen a la estructura de los bosques, y también las consecuencias del aprovechamiento de la madera (Castellanos-Bolaños *et al.*, 2010). La estructura forestal se ve influenciada por factores del sitio y por las características reproductivas de las especies que coexisten en la comunidad (Linzaga-Román *et al.*, 2011); su descripción se logra mediante el ordenamiento vertical y horizontal que presentan los árboles y que determinan la integridad y estabilidad del bosque (Cortés, 2003; Del Rio *et al.*, 2003). El ordenamiento vertical se caracteriza mediante la diferenciación de los estratos por categoría de altura, mientras que el ordenamiento horizontal se explica con el análisis de los índices de distribución espacial (Zarco-Espinosa *et al.*, 2010). Los estudios realizados sobre la estructura y diversidad arbórea, han mostrado relaciones estadísticas significativas entre la productividad forestal y la diversidad arbórea (Navar-Chaidez y González-Elizondo, 2009).

Un parámetro para medir la productividad de los bosques, es la estimación de la biomasa aérea, definida como la cantidad total de materia orgánica aérea de los árboles, que incluye: hojas, ramas, tronco y corteza (Garzuglia y Saket, 2003). Para estimar la biomasa aérea, se requieren modelos matemáticos basados en un número reducido de parámetros obtenidos de los árboles, que permitan cuantificar con precisión y confiabilidad la biomasa de las especies arbóreas (Acosta-Mireles *et al.*, 2002; Avendaño-Hernández *et al.*, 2009). La estimación precisa de biomasa requiere, por lo general, de ecuaciones exclusivas para cada especie (Wang, 2006; Rodríguez *et al.* 2012), aunque los estudios de biomasa aérea son escasos para latifoliadas de clima templado, particularmente en México.

En los bosques de pino-encino de Ixtlán de Juárez, Oaxaca, el producto forestal más intensamente aprovechado es la madera de coníferas (STF, 2008). Pero dada la necesidad de un aprovechamiento integral de las especies forestales y con el objetivo de integrar a los encinos a la cadena productiva, se hace necesaria la caracterización tecnológica de la madera de encino, tomando en consideración las propiedades anatómicas, químicas y físico-mecánicas de la misma. La composición de la madera influye en su comportamiento físico; por ejemplo, a mayor cantidad de

celulosa mayor densidad básica, debido a la estructura más uniforme y mayor peso molecular que el de las hemicelulosas (Moya-Roque y Arce-Ledesma, 2006); también, la densidad básica se ve influenciada por la cantidad de extractivos, lo que se refleja indirectamente en las propiedades mecánicas de la madera (Bodig y Jayne, 1982; Ávila y Herrera, 2012). Además, es importante caracterizar químicamente la corteza de los encinos, pues representa un porcentaje importante de la biomasa aérea total de especies forestales (Miranda *et al.*, 2013). A diferencia de la madera la corteza contiene polifenoles y suberina, debido al porcentaje elevado de extractivos y menor cantidad de polisacáridos (Fengel y Wegener, 2003). Aunado a lo anterior, para aprovechar de manera eficiente los recursos forestales maderables, y utilizar las ramas que se producen de la extracción de madera o árboles con fustes no aptos para el aserrío, es importante realizar estudios sobre el potencial energético de la madera y el carbón de estas especies, para analizar la forma de optimizar su uso e incrementar su rendimiento.

El fundamento para la caracterización tecnológica de *Q. laurina* y *Q. crassifolia*, se basa en las existencias de estas especies en el bosque, su distribución espacial, dominio estructural y las características de sus fustes, con la finalidad de analizar la conveniencia de incluir a estas especies en tres rubros económicos: en la industria del aserrío, para el sector de dendroenergéticos, o considerar su participación en el pago por servicios ambientales.

La presente tesis está conformada por un compendio de artículos originales, derivados de objetivos específicos, desarrollados teórica y metodológicamente, con base en el contenido explícito en esta presentación. Los documentos se intitulan:

- 1) Distribución espacial de dos encinos y atributos ecológicos de comunidades cohabitadas en la Sierra Juárez, Oaxaca.
- 2) Ecuaciones de biomasa aérea para *Q. laurina* y *Q. crassifolia* en Oaxaca.
- 3) Estructura anatómica de la madera de dos encinos de Oaxaca.
- 4) Propiedades mecánicas de la madera de dos encinos mexicanos: relación con propiedades físicas selectas.

- 5) Propiedades energéticas y caracterización química de la madera y la corteza de dos encinos de Oaxaca, México.

## 1.1. OBJETIVOS

### a) Objetivo general

Analizar la estructura, diversidad arbórea, productividad con base en la biomasa aérea, y las propiedades tecnológicas de la madera de *Q. laurina* y *Q. crassifolia*, del bosque de Ixtlán de Juárez, Oaxaca.

### b) Objetivos específicos

- Describir la estructura vertical y horizontal de la vegetación arbórea, así como la riqueza y diversidad de especies del bosque de pino-encino de Ixtlán de Juárez, Oaxaca.
- Desarrollar modelos matemáticos para estimar la biomasa aérea total y por componentes para *Q. laurina* y *Q. crassifolia*.
- Determinar las características anatómicas de la madera de *Q. laurina* y *Q. crassifolia*, y evaluar la influencia de la estructura anatómica en las propiedades físicas de la madera.
- Caracterizar las propiedades mecánicas de la madera y estimar la influencia de las propiedades físicas sobre las propiedades mecánicas de la madera de encinos.
- Analizar la composición química, de la albura, el duramen y la corteza de *Q. laurina* y *Q. crassifolia* y determinar las características energéticas de la madera y el carbón vegetal de dos especies de encinos.

## 1.2. REFERENCIAS

- 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.
- Aldrich, P. R. y J. Cavender B. 2011. *Quercus*. In: C. Kole, ed. *Wild Crop Relatives: Genomic and Breeding Resources, Forest Trees*. Springer Berlin Heidelberg 89-129.
- Álvarez, S. y A. Rubio. 2013. Línea base de carbono en bosque mixto de pino-encino de la Sierra Juárez (Oaxaca, México). Aplicación del modelo CO2FIX V. 3.2. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 19(1): 125-137.
- Avendaño-Hernández, D. M., M. Acosta-Mireles, F. Carrillo-Anzures y J. D. Etchevers-Barra. 2009. Estimación de biomasa y carbono en un bosque de *Abies religiosa*. *Fitotecnia Mexicana* 32(3): 233-238
- Ávila, L. E. y M. A. Herrera. 2012. Efecto de los extraíbles en tres propiedades físicas de la madera de *Enterolobium cyclocarpum* procedente de Michoacán, México. *Bosque* 33(2): 227-232.
- Bodig, J. y B. A. Jayne. 1982. *Mechanics of wood and wood composites*. Van Nostran-Reinhold Company, New York.
- Castellanos-Bolaños, J. F., E. J. Treviño-Garza, O. A. Aguirre-Calderón, J. Jiménez-Pérez, M. Musalem-Santiago y R. López-Aguillón. 2008. Estructura de bosques de pino pátula bajo manejo en Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México. *Madera y Bosques* 14(2): 51-63.
- Castellanos-Bolaños, J. F., E. J. Treviño-Garza, O. A. Aguirre-Calderón, J. Jiménez-Pérez y A. Velázquez-Martínez. 2010. Diversidad arbórea y estructura espacial de bosques de pino-encino en Ixtlán de Juárez, Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 1(2): 39-52.

- Cortés, S. P. 2003. Estructura de la vegetación arbórea y arbustiva en el costado oriental de la serranía de Chía (Cundinamarca, Colombia). *Caldasia* 25(1): 119–137.
- Del Río, M., G. Montero, F. Montes y I. Cañellas. 2003. Revisión: Índices de diversidad estructural en masas forestales. *Investigación Agraria. Sistemas y Recursos Forestales* 12(1): 159–176.
- Fengel, D. y G. Wegener. 2003. *Wood: Chemistry, ultrastructure, reactions*. Verlag Kessel, Germany.
- Garzuglia, M. y M. Saket. 2003. Wood volume and woody biomass: review of FRA 2000 estimates. *Forest Resources Assessment WP 68*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy. 30 p.
- Linzaga-Román, B. E., G. Ángeles-Pérez, C. Catalán-Heverástico y P. Hernández de la Rosa. 2011. Estructura espacial de *Pachycereus weberi* (Coul.) Backeb. en la Cañada del Zopilote, Guerrero. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 17(2): 189–198.
- Miranda, I., J. Gominho, I. Mirra y H. Pereira. 2013. Fractioning and chemical characterization of barks of *Betula pendula* and *Eucalyptus globulus*. *Industrial Crops and Products* 41: 299-305.
- Moya-Roque, R. y V. Arce-Ledesma. 2006. Estudio del efecto del espaciamiento sobre el peso específico básico y contracciones en plantaciones de teca (*Tectona grandis* Lf) de 10 años en Guanacaste, Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú* 3(7): 1-11.
- Návar-Cháidez, J. D. J. y S. González-Elizondo. 2009. Diversidad, estructura y productividad de bosques templados de Durango, México. *Polibotánica* (27): 71-87.
- Oh, S. H. y P. S. Manos. 2008. Molecular phylogenetics and cupule evolution in Fagaceae as inferred from nuclear CRABS CLAW sequences. *Taxon* 57(2): 434-451.
- PRONAFOR, (Programa Nacional Forestal). 2013. Incremento a la Producción y Productividad Forestal 2013-2018. Comisión Nacional Forestal. México. 47 p.

- Quintanar-Olguin, J. (Ed). 2002. Características, propiedades y procesos de transformación de la madera de los encinos de México. INIFAP-CIRCE. C. E. San Martinito, Tlahuapan, Puebla. México. Libro técnico No. 2. 194 p.
- Rodríguez-Ortíz, G., H. M. De los Santos-Posadas, V. A. González Hernández, A. Aldrete, A. Gómez-Guerrero y A. M. Fierros-González. 2012. Modelos de biomasa aérea y foliar en una plantación de rápido crecimiento en Oaxaca. *Madera y Bosques* 18(1): 25-41.
- Servicios Técnicos Forestales (STF). 2008. Estudio sobre el aprovechamiento del encino Ixtlán de Juárez, Oaxaca México. Editorial y Ciudad de publicación
- Valencia, A. y K. C. Nixon. 2004. Encinos. In: García-Mendoza A. J., Ordóñez M. J., M. Briones-Salas (eds). Biodiversidad de Oaxaca. Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza and WWF, México DF. 219-225.
- Valencia, A., S. 2004. Diversidad del género *Quercus* (Fagaceae) en México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 75: 33-53.
- Wang, C. 2006. Biomass allometric equations for 10 co-occurring tree species in Chinese temperate forests. *Forest Ecology and Management* 222: 9-16.
- Zarco-Espinosa, V. M., J.I. Valdez-Hernández, G. Ángeles-Pérez y O. Castillo-Acosta. 2010. Estructura y diversidad de la vegetación arbórea del parque estatal Agua Blanca, Macuspana, Tabasco. *Universidad y Ciencia Trópico Húmedo* 26(1): 1–17.

## CAPITULO II

### DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE DOS ENCINOS Y ATRIBUTOS ECOLÓGICOS DE COMUNIDADES COHABITADAS EN LA SIERRA JUÁREZ, OAXACA<sup>1</sup>

#### 2.1. RESUMEN

Se analizó la estructura y diversidad del bosque de pino-encino en Ixtlán de Juárez, Oaxaca, usando tres unidades de muestreo (UM) de 50 x 50 m. Se registraron las variables dasométricas de los individuos con un diámetro normal (DN)  $\geq 2.5$  cm, ubicándolos por coordenadas cartesianas para determinar su distribución espacial. También se calcularon dos índices de importancia estructural, el índice de valor de importancia relativo (IVIR) y el índice de valor forestal (IVF), y tres índices de diversidad. Se registraron 799 individuos, pertenecientes a 11 familias y 19 especies; la familia más abundante fue Fagaceae (628 individuos, cuatro especies). En la UM1, la especie más importante fue *Q. crassifolia* (IVIR = 53; IVF = 57), que presentó distribución espacial aleatoria. Los valores más altos del IVIR e IVF en la UM2, fueron para *Quercus laurina* (IVIR = 48, IVF = 63). En la UM3 la especie más importante fue *Q. crassifolia* (IVIR = 49, IVF = 62).

Se concluye que el patrón agregado de las especies individuales se atribuye a estrategias de regeneración y prácticas silvícolas en la zona, y ambas especies pueden coexistir en un mismo lugar, modificando su importancia estructural y su patrón de distribución horizontal.

**Palabras clave:** *Quercus laurina*, *Quercus crassifolia*, diversidad de especies.

#### 2.2. ABSTRACT

The structure and diversity of pine-oak forest in Ixtlán de Juárez, Oaxaca, was analyzed using three sampling units (UM) of 50 x 50 m. Dasometric variables of the individuals with a normal diameter (DN)  $\geq 2.5$  cm were recorded, placing cartesian coordinates to determine their spatial distribution. Two indices of structural importance, the value index of relative importance (IVIR) and the forest value index

---

<sup>1</sup> Artículo en revisión en la Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente. Se presentaron avances en el XI Congreso Mexicano sobre Recursos Forestales, 2013.

(IVF), and three diversity indices were also calculated. 799 individuals were recorded, belonging to 11 families and 19 species; the most abundant family was Fagaceae (628 individuals, four species). In UM1, the most important species was *Q. crassifolia* (IVIR = 53; IVF = 57), which exhibited random spatial distribution. The highest values of IVIR and IVF in UM2 were for *Quercus laurina* (IVIR = 48, IVF = 63). In UM3 the most important species was *Q. crassifolia* (IVIR = 49, IVF = 62).

We conclude that the aggregate pattern of individual species is due to regeneration strategies and silvicultural practices in the area, and that both species can coexist in the same place, with changes in their structural importance and horizontal distribution patterns.

**Keywords:** *Quercus laurina*, *Quercus crassifolia*, species diversity, structural indices.

### 2.3. INTRODUCCIÓN

El bosque de pino-encino de la comunidad de Ixtlán de Juárez Oaxaca, ha estado bajo aprovechamiento maderable durante las últimas seis décadas (Castellanos-Bolaños *et al.*, 2008), y ha sido manejado con la finalidad de favorecer el aprovechamiento forestal de *Pinus* como género principal y *Quercus* como género secundario (Álvarez y Rubio, 2013). Al principio del aprovechamiento, en los años 1940's, se aplicaron cortas selectivas, y a partir de 1993 se instauró el método de árboles padres para el manejo del bosque (Técnica Informática Aplicada, S. A. [TIASA], 1993); este último sistema de aprovechamiento ha originado un cambio en la estructura y composición de especies del bosque, a favor del aumento de las poblaciones de *Quercus spp.* (Servicios Técnicos Forestales [STF], 2008).

La estructura original del bosque es el resultado de la dinámica de los ecosistemas, y se ve modificada por factores de sitio y las características reproductivas de las especies que coexisten en la comunidad (Linzaga-Román, *et al.*, 2011); su caracterización se logra mediante el ordenamiento vertical y horizontal (Cortés, 2003). El ordenamiento vertical se caracteriza mediante la diferenciación de los estratos por categoría de altura, mientras que el ordenamiento horizontal se explica con el análisis de los índices de distribución espacial (Zarco-Espinosa *et al.*,

2010); en ambos casos, los análisis son útiles para conocer los factores a los que han estado expuestos los individuos de una comunidad, ya sean físico-ambientales (clima, suelo, relieve, geología) y/o bióticos (dispersores, depredadores, competidores).

El presente estudio se realizó en un bosque de pino-encino de la comunidad de Ixtlán de Juárez Oaxaca, con los objetivos de describir la estructura vertical y horizontal de la vegetación arbórea, así como la riqueza y diversidad de especies. Debido a la importancia económica de la madera de especies de *Quercus* para la producción de leña y carbón en la región, y como parte de un estudio más amplio para su caracterización tecnológica, se analizaron los patrones de distribución espacial de *Q. laurina* Humb. & Bonpl. y *Q. crassifolia* Humb. & Bonpl.

## 2.4. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.4.1. Área de estudio

Ixtlán de Juárez, Oaxaca, se ubica a 170 18' 16" y 170 34' 00" LN; 960 31' 38" y 960 20' 00" LO (Castellanos-Bolaños *et al.*, 2008). Presenta una temperatura media anual de 20°C y una precipitación de 800 a 1200 mm al año (Aquino-Vásquez *et al.*, 2012). El clima es C (m)(w'')b(i')g, templado húmedo con lluvias en verano (García, 1987). El bosque de pino-encino se desarrolla sobre un suelo acrisol húmico (Ah), de textura media limosa, con una capa muy rica de materia orgánica en la superficie (Rainforest Alliance, 2006). Destacan como especies dominantes, *Pinus patula* Schltl. & Cham., *P. oaxacana* Mirov., *P. pseudostrobus* Lindl., *Q. crassifolia*, *Q. rugosa* Masam., *Alnus acuminata arguta* (Schltl.) Furlow y *Arbutus xalapensis* Kunth (Ruiz-Aquino *et al.*, 2014).

### 2.4.2. Muestreo y medición de variables

Se establecieron tres unidades de muestreo (UM) de 50 x 50 m (2500 m<sup>2</sup>), compensadas por la pendiente del terreno. Cada UM se dividió en 25 cuadros de 10 x 10 m conforme a Zarco *et al.* (2010). Se identificó taxonómicamente cada individuo

del componente arbóreo con DAP  $\geq 2.5$  cm, registrándose el diámetro normal ( $DN$ , cm) medido con cinta diamétrica, la altura total ( $AT$ , m) medida con una pistola tipo Haga, y el diámetro de copa (m) medido con cinta métrica en la dirección N-S y E-O. También se registró la ubicación de los individuos de *Quercus laurina* y *Q. crassifolia* mediante sus coordenadas ( $x$ ,  $y$ ) en un plano cartesiano, tomando como el origen (0, 0) la parte inferior izquierda respecto a la pendiente de cada UM. Con los datos de  $AT$  se determinó la estratificación de alturas del componente arbóreo y con el  $DN$  la distribución diamétrica.

### 2.4.3. Índices de importancia estructural y de diversidad

La dominancia de especies en el plano horizontal se determinó mediante el Índice de Valor de Importancia Relativo (IVIR), que para ser calculado toma la suma de la densidad relativa respecto al número de árboles, la dominancia relativa a través del área basal y la frecuencia relativa por medio de la presencia de las especies en las UM (Curtis & McIntosh, 1951). La estructura bidimensional de la vegetación se evaluó mediante el Índice de Valor Forestal (IVF), que en su cálculo considera la suma del diámetro relativo, altura relativa y la cobertura relativa (Corella-Justavino *et al.*, 2001). Para conocer la diversidad en cada UM, se utilizó el índice de Shannon-Weiner  $H' = -\sum p_i \cdot \ln(p_i)$ , donde  $p_i$  es la abundancia proporcional de la especie  $i$ , lo que involucra la proporción o abundancia relativa de cada especie en la población (Krebs, 1989; Moreno, 2001). Para determinar si existe diferencia significativa en la diversidad de especies entre las UM, se empleó el método de Hutcheson (Hutcheson, 1970), que para ser calculado toma como base  $H'$  (Villavicencio-Enríquez y Valdez-Hernández, 2003). El Índice de diversidad de Margalef  $DM_g = (S-1)/(\ln N)$  ( $S$  = número de especies,  $N$  = número total de individuos) fue usado para determinar la diversidad alfa (Magurran, 1988) y, para determinar qué tan semejantes fueron las UM se calculó Índice de Sorensen ( $IS_s$ ), basado en la presencia ausencia de especies (Vázquez-Negrín *et al.*, 2011), con base en  $IS_s(\%) = [2C/(A+B)] \cdot 100$ , donde  $C$  = número de especies comunes en ambas

comunidades,  $A$  = número total de especies presentes en la comunidad  $A$ , y  $B$  = número total de especies presentes en la comunidad  $B$  (Badii *et al.*, 2008).

#### 2.4.4. Distribución espacial

El análisis de la distribución espacial de los individuos de *Quercus laurina* y *Q. crassifolia* se realizó con la ubicación de las especies respecto a sus coordenadas ( $x$ ,  $y$ ), mediante la función  $K(t)$  de Ripley (Ripley, 1977), definida como:

$$K(t) = n^{-2} |A| \sum_{i \neq j} W_{ij}^{-1} I_t(u_{ij})$$

Donde:  $n$  = número de individuos en la unidad de muestreo  $A$  (UM  $A$ ),  $|A|$  = área de la UM  $A$ ,  $u_{ij}$  = distancia entre el  $i$ -ésimo y  $j$ -ésimo individuo en la UM  $A$ ,  $I_t(u) = 1$  si  $u \leq t$  y 0 si no lo es,  $W_{ij}$  = proporción de la circunferencia de un círculo con centro en UM  $A$ , y la sumatoria de todos los pares de individuos no mayor que  $t$ . Se utilizó la transformación de la raíz cuadrada de la función  $K(t)$  de Ripley, determinando con simulaciones de Monte Carlo la significancia estadística de la función  $L(t)$  (Besag, 1977):

$$L(t) = \sqrt{\frac{K(t)}{\pi}} - t$$

Donde:  $K(t)$  = función de Ripley,  $t$  = distancia entre dos árboles

## 2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 2.5.1. Estratificación de alturas

El componente arbóreo del bosque de pino-encino de Ixtlán, alcanzó una media de 13.8 m de altura, con pocos individuos superando los 28.0 m de altura. Se identificaron dos estratos verticales: el inferior ( $\leq 10$  m) y el superior ( $> 10$  m) (Figura 2.1). En el estrato inferior se concentra el 34.3% del total de individuos, y el restante 65.7% en el estrato superior. Castellanos-Bolaños *et al.* (2008) indicaron que en el mismo bosque mixto de pino-encino domina un estrato superior de *Pinus spp.*, pero dado que en este estudio las UM se establecieron en rodales de encino, el estrato superior estuvo fisonómicamente determinado por *Q. laurina* y *Q. crassifolia*.

Sánchez-Rodríguez *et al.* (2008) refieren que la estratificación del bosque está en función de las especies más importantes de cada localidad (dominio de encinos en este caso), y que el mayor número de individuos se concentra en las dos primeras clases de altura, como se representa en la Figura 2.1. De hecho, el tamaño del arbolado tiene una explicación fenotípica, ya que de acuerdo con la descripción de los taxa de encinos (Oaks of the world: <http://oaks.of.the.world.free.fr/index.htm>), la alometría registrada para los encinos de Ixtlán, corresponde con el área de simpatria (Sierra Madre del Sur en México y Guatemala) de las dos especies de interés: *Q. laurina* ocurre con una altura promedio de 19.3 m y diámetro de 14.4 cm, mientras que *Q. crassifolia* con 15.3 m y 22.9 cm en altura y diámetro promedio, respectivamente.

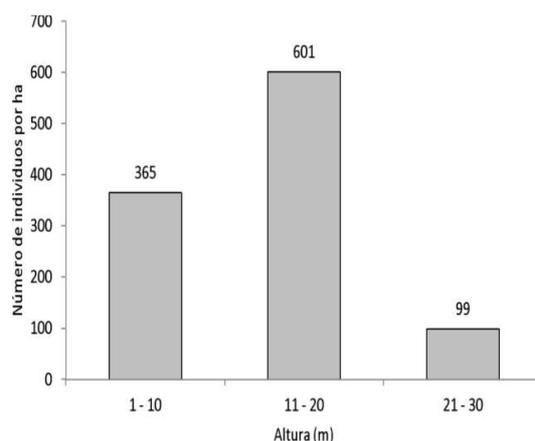


Figura 2.1. Estratificación vertical del componente arbóreo de las unidades de muestreo

### 2.5.2. Distribución diamétrica

El 63% de los individuos muestreados en las tres UM presentaron diámetros comprendidos en las primeras cuatro categorías diamétricas ( $DN \leq 22.5$  cm); la distribución es sesgada (Figura 2.2) y, como se esperaba de un bosque natural, conforme el diámetro del fuste aumenta, el número de individuos disminuye, ya que las especies presentan una buena reproducción, y un establecimiento e incorporación natural en la masa continuos (Bongers *et al.*, 1988).

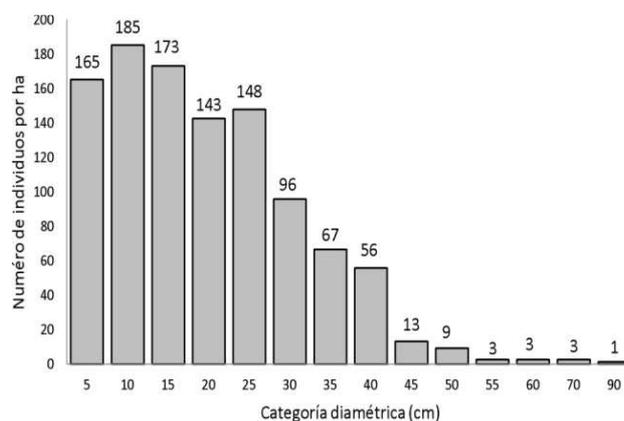


Figura 2.2. Distribución diamétrica del componente arbóreo de las unidades de muestreo

### 2.5.3. Índices estructurales

Se registraron un total de 799 individuos pertenecientes a 19 especies y 11 familias; la familia más abundante fue Fagaceae (628 individuos en cuatro especies). En la UM1 se tuvo una densidad total de 1096 árboles  $\text{ha}^{-1}$ , de los cuales *Q. crassifolia* tuvo 60.9% (668 árboles- $\text{ha}^{-1}$ ), seguido de *Q. laurina* con 30.3% (332 árboles- $\text{ha}^{-1}$ ). También se registró un área basal total de 42.3  $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$ , donde la dominancia relativa fue de 58.4% para *Q. crassifolia* y de 25.8% para *Q. laurina*.

En la UM2 la densidad total fue de 1208 árboles  $\text{ha}^{-1}$ , donde *Q. laurina* obtuvo 57.0% (688 árboles- $\text{ha}^{-1}$ ) y *Q. crassifolia* el 9.9% (120 árboles- $\text{ha}^{-1}$ ). Se registró un área basal total de 39.7  $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$ , con 61.9% de dominancia relativa para *Q. laurina* y de 7.1% para *Q. crassifolia*. En la UM3 la densidad total fue de 892 árboles- $\text{ha}^{-1}$ , de los cuales *Q. crassifolia* tuvo 52.5% (468 árboles- $\text{ha}^{-1}$ ), seguido de *Q. laurina* con 25.6% (228 árboles- $\text{ha}^{-1}$ ). Aquí se registró un área basal total de 49.4  $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$ , y la dominancia relativa fue 67.3% para *Q. crassifolia* y 23.8% para *Q. laurina*. En el cuadro 2.1 se muestra el IVI relativizado de las tres UM, así como el IVF por especie.

Cuadro 2.1. Especies arbóreas con los mayores índices de valor de importancia (IVI) e índices de valor forestal (IVF) relativos por unidad de muestreo

No.	Especies	IVI	IVF
UNIDAD DE MUESTREO 1			
1	<i>Quercus crassifolia</i> Humb. & Bonpl.	52.80	56.56
2	<i>Quercus laurina</i> Humb. & Bonpl.	30.15	30.27
3	<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl.	7.85	7.39
4	<i>Prunus serotina</i> Ehrh	2.50	1.56
5	<i>Pinus patula</i> Schldtl. & Cham.	2.48	3.09
6	<i>Alnus acuminata arguta</i> (Schldtl.) Furlow	1.94	0.30
7	<i>Arbutus xalapensis</i> Kunth	1.53	0.58
8	<i>Quercus rugosa</i> Née	0.75	0.26
UNIDAD DE MUESTREO 2			
1	<i>Quercus laurina</i>	47.68	62.54
2	<i>Alnus acuminata arguta</i>	12.17	8.33
3	<i>Pinus pseudostrobus</i>	11.74	11.92
4	<i>Quercus crassifolia</i>	10.25	7.61
5	<i>Ternstroemia lineata subsp. lineata</i>	4.61	1.36
6	<i>Prunus serotina</i>	4.06	2.06
7	<i>Litsea glaucescens</i> Kunth	3.80	2.02
8	<i>Persea americana</i> Mill.	2.75	2.76
UNIDAD DE MUESTREO 3			
1	<i>Quercus crassifolia</i>	49.34	61.89
2	<i>Quercus laurina</i>	25.00	26.56
3	<i>Pinus patula</i>	7.49	4.93
4	<i>Alnus acuminata arguta</i>	7.09	2.00
5	<i>Viburnum microcarpum</i> Schldtl. & Cham.	3.49	1.34
6	<i>Clethra mexicana</i> A. DC.	2.76	1.85
7	<i>Cestrum aurantiacum</i> Lindl.	1.90	0.47
8	<i>Litsea glaucescens</i>	0.59	0.37

En las UM 1 y 3, destaca *Q. crassifolia* como la especie más importante en el IVIR como en el IVF, seguida de *Q. laurina*, que es la especie más importante en la UM2, lo que significa, en general para estas UM, el dominio estructural de *Quercus*. En las tres unidades de muestreo, el género *Quercus* ocupa del 57.9 al 82.9% de importancia estructural con respecto al IVIR, mientras que las especies restantes, aún cuando son más numerosas, solo representan entre el 17.1 y 42.1%, lo que indica una menor cantidad y/o dimensiones menores de los árboles. *Alnus acuminata* ocupó el segundo lugar en el IVI en la UM2, pero el segundo lugar en el IVF es para

*P. pseudostrobus*. Esto era de esperarse, en vista de que *P. pseudostrobus* alcanza alturas mayores que *A. acuminata*, y considerando que el IVF incluye las variables en ambas dimensiones (horizontal y vertical).

En la Sierra de Coahuila, Encina-Domínguez *et al.* (2009), determinaron que los mayores IVI's corresponden a *Quercus greggii* Trel. (41.3) y *Q. mexicana* Humb. & Bonpl. (18.7). La densidad fue de 1480 árboles ha<sup>-1</sup> con área basal de 9.00 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> para *Q. greggii*, y de 284 árboles ha<sup>-1</sup> con 5.68 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> para *Q. mexicana*. En el presente estudio se encontró una densidad menor a la reportada para *Q. greggii*, con 416 árboles ha<sup>-1</sup> para *Q. laurina* y 419 árboles ha<sup>-1</sup> para *Q. crassifolia*. Sin embargo, el promedio de área basal de las tres UM fue mayor, 15.7 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> y 20.2 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> para *Q. laurina* y *Q. crassifolia*, respectivamente. Lo anterior es un indicador de condiciones ambientales favorables para el crecimiento del encino en Ixtlán de Juárez, con una precipitación entre 800 y 1200 mm al año contra 498 mm de la Sierra de Coahuila, un clima templado húmedo en el sur contra un clima predominante seco hacia el norte, y un suelo acrisol húmico en Oaxaca, comparado con litosoles y rendzinas (pedregosos y someros) en Coahuila. Condiciones físicas más benevolentes en Ixtlán Oaxaca comparado con la sierra de Coahuila, explicarían la presencia de diámetros mayores en *Q. laurina* y *Q. crassifolia*. Unas condiciones ambientales similares a las del presente estudio son las que reportan Zacarias-Eslava *et al.* (2011) en el bosque de encino-pino del Cerro el Águila, Michoacán, México, donde la especie con mayor IVI fue *Q. laurina* (21.8); sin embargo, la densidad (141 árboles ha<sup>-1</sup>) y el área basal (17.31 m<sup>2</sup>) son menores a las referidas aquí para *Q. crassifolia*. En el mismo sentido, Rubio-Licona *et al.* (2010) reportan para el bosque de encino-pino en Villa del Carbón, Estado de México, un IVI de 62.4% para *Q. crassifolia*, indicando que este bosque se encuentra bien conservado, con una distribución regular de las especies y una buena incorporación de individuos jóvenes a la comunidad.

#### 2.5.4. Diversidad de especies

La diversidad de Shannon ( $H'$ ) fue significativamente diferente ( $p \leq 0.05$ ) entre la UM1 ( $H' = 1.02$ ) y la UM2 ( $H' = 1.51$ ), así como entre la UM1 ( $H' = 1.02$ ) y la UM3 ( $H' = 1.43$ ), mientras que no existieron tales diferencias entre las UM 2 y 3 ( $p > 0.05$ ) (Cuadro 2.2).

Cuadro 2.2. Valores de riqueza y diversidad de especies por unidad de muestreo

	UM 1	UM 2	UM 3
Especies (Individuos)	8 (274)	13 (302)	12 (223)
Equidad	0.49	0.73	0.69
Índice de Margalef	1.25	2.1	2.03
Índice de Simpson	2.16	2.8	2.88
Índice de Shannon	1.02 <sup>a</sup>	1.51 <sup>bc</sup>	1.43 <sup>c</sup>

Letras diferentes indican diferencias significativas ( $P < 0.05$ )

Los índices para estimar la diversidad coinciden en que la UM1 presenta los valores más bajos de las 3 UM, lo que indica una menor diversidad de especies. Según Tárrega *et al.* (2006), las diferencias entre sitios de muestreo se deben a la composición del sotobosque, o a la capacidad de supervivencia y recuperación de las especies ante un disturbio. La equidad, evaluada con base en el Índice de Shannon, fue mayor para la UM2, lo que indica una abundancia proporcional entre especies, y menor para la UM1, valor que indica la dominancia de pocas especies. Empleando el índice de Sorensen, se encontró una mayor semejanza en la entre las UM1 y UM2, que entre la UM1 y UM3 (Cuadro 2.3); los valores bajos de semejanza indican que ha habido un alto recambio de especies (Zacaría-Eslava *et al.*, 2011).

Cuadro 2.3. Coeficientes de semejanza florística en las tres unidades de muestreo

Unidades comparadas		Especies en UM A	Especies en UM B	Especies compartidas C	Índice de Sorensen
UM A	UM B				
1	2	8	13	7	67
1	3	8	12	5	50
2	3	13	12	7	56

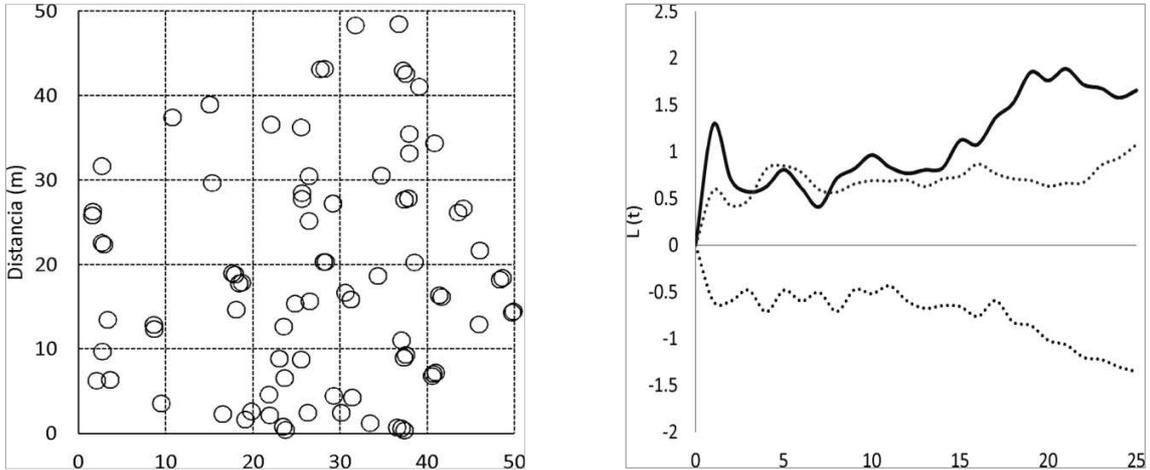
### 2.5.5. Distribución espacial

En la tres UM analizadas, *Q. laurina* y *Q. crassifolia* alternan sus patrones de distribución entre aleatorio y agregado. En la UM1, los árboles de *Q. laurina* presentaron un patrón de distribución agregado (Figura 2.3A), excepto entre los 4 y 8 m a partir del origen, donde destaca el patrón aleatorio.

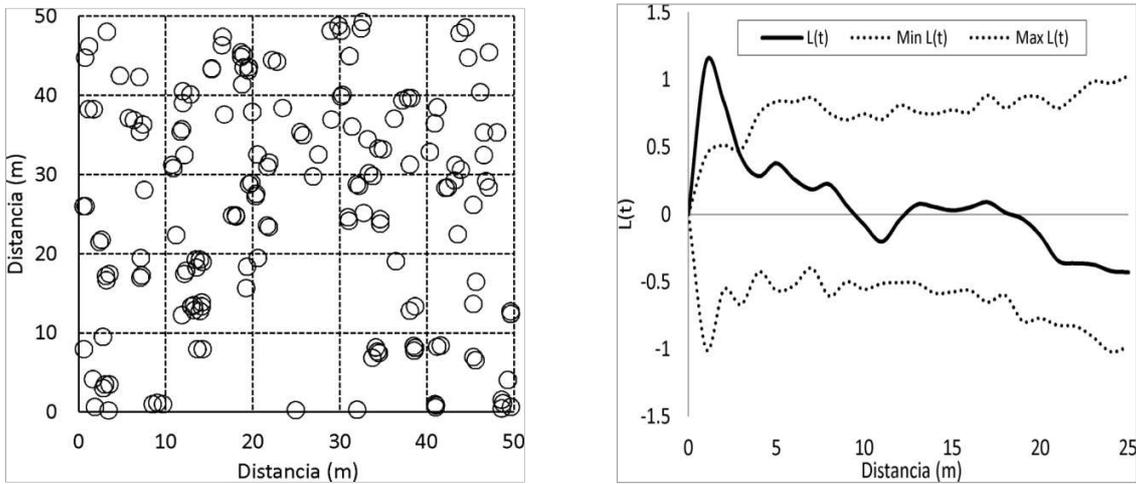
En contraste, *Q. crassifolia* mostró un patrón de distribución espacial aleatorio en la UM1 (Figura 2.3B), donde la mayoría de los espacios se encuentran ocupados por árboles de *Q. crassifolia*, menos en distancias entre 0 a 3 m, donde se presenta agregación. En la UM2, *Q. laurina* presentó un patrón aleatorio (Figura 2.4A), aquí se registró el menor número de árboles de *Q. crassifolia* (30 árboles), determinándose distribución agregada en distancias menores a 12 m, aleatoria entre 11.5 y 14 m, así como en distancias mayores a 19 m y una distribución regular entre distancias de 14 y 19 m (Figura 2.4B).

En la UM3, los dos encinos presentaron patrones casi similares a la UM2, con *Q. laurina* presentando un patrón agregado (Figura 2.5A), y *Q. crassifolia* uno tendiente a aleatorio (Figura 2.5B). En las UM donde *Q. crassifolia* tuvo el mayor IVI (UM1 y UM3), la especie presentó un patrón de distribución aleatorio. Algo similar sucedió en la UM2, donde *Q. laurina* obtuvo el mayor IVI, y su patrón de distribución también resultó aleatorio. Por el contrario, en la UM 1 y 3, las especies que ocupan el segundo valor de importancia mostraron patrones agregados, lo que indica que en la localidad donde se realizó este estudio, el patrón agregado está relacionado con una densidad arbórea menor, y probablemente con la posición de especie

jerárquicamente subordinada a la especie dominante, ocupando los espacios que esta deja libres.



A) *Quercus laurina* UM1

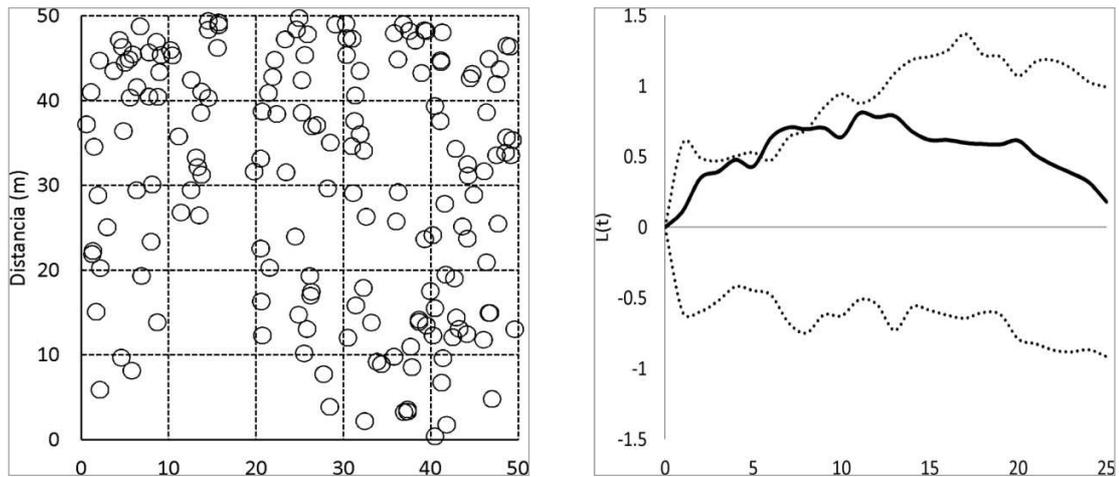


B) *Quercus crassifolia* UM1

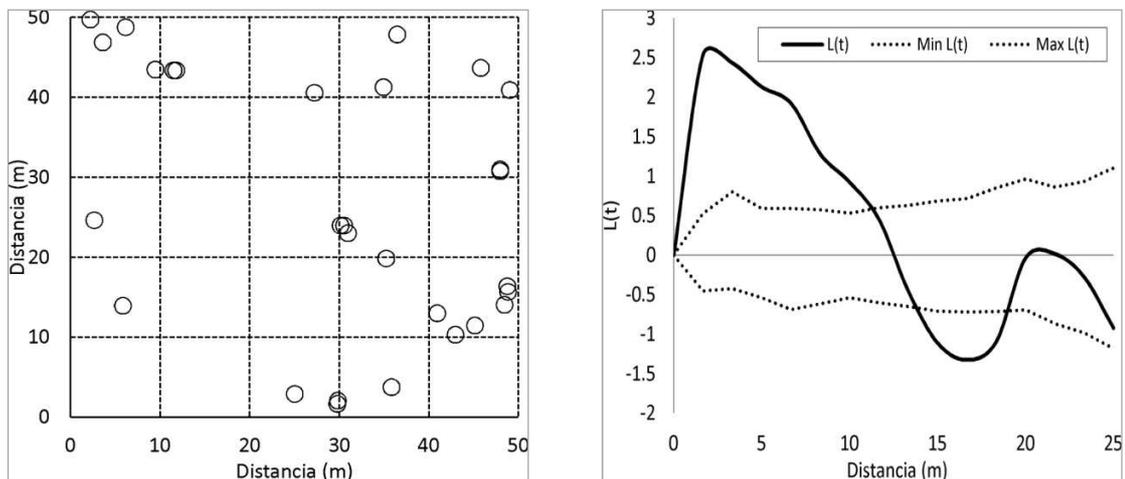
Figura 2.3. Unidad de muestreo 1, distribución espacial e índice de distribución espacial A) *Quercus laurina* y B) *Q. crassifolia*.

El patrón agregado se debe a condiciones topográficas específicas o a un terreno heterogéneo (Condés y Martínez, 1998; Linzaga-Román *et al.*, 2011), ocasionando una alta variación en la distribución de la luz y nutrientes en el suelo. Sin embargo,

al analizar la distribución espacial de ambas especies en cada UM en el presente estudio, se encontraron patrones de distribución aleatorios (Figura 2.6), lo que indica que, la distribución espacial de cada especie se debe a las relaciones de asociación entre individuos, a las diferentes estrategias de regeneración y dispersión de las especies, y a las prácticas silvícolas en el lugar, más que a las condiciones topográficas o a las características del suelo (Martínez-Ramos, 1994; Del Río *et al.*, 2003).



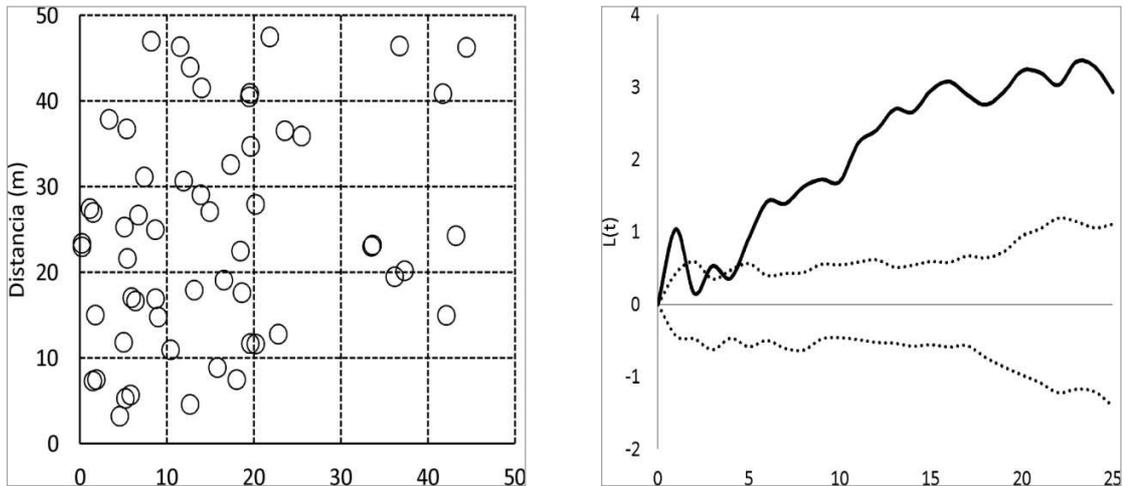
A) *Quercus laurina* UM2



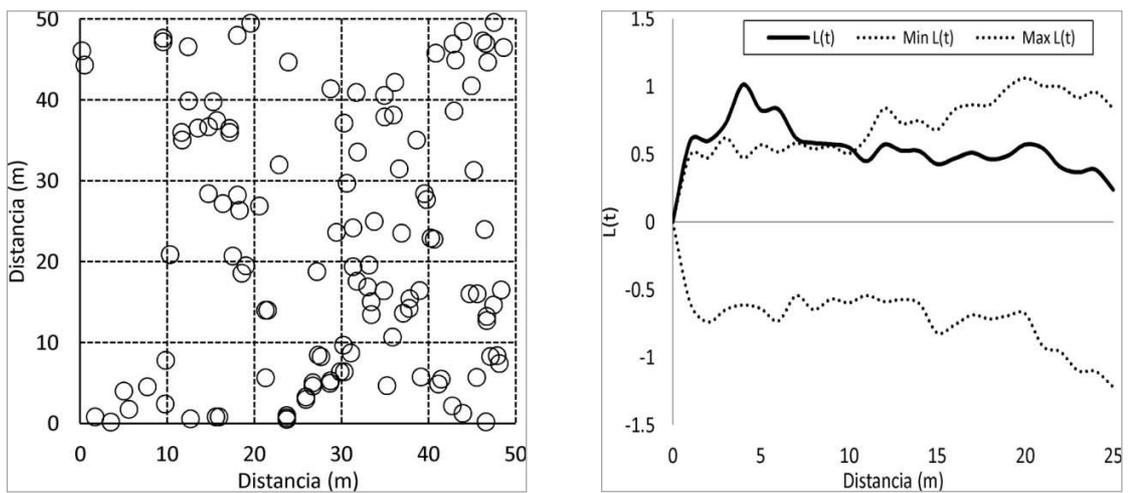
B) *Quercus crassifolia* UM2

Figura 2.4. Unidad de muestreo 2, distribución espacial e índice de distribución espacial A) *Quercus laurina* y B) *Q. crassifolia*.

Finalmente, también es posible que se generen condiciones para la dominancia de alguna especie, cuando un ciclo semillero coincide con la liberación de espacio ante cualquier disturbio (Márquez-Linares *et al.*, 1999).

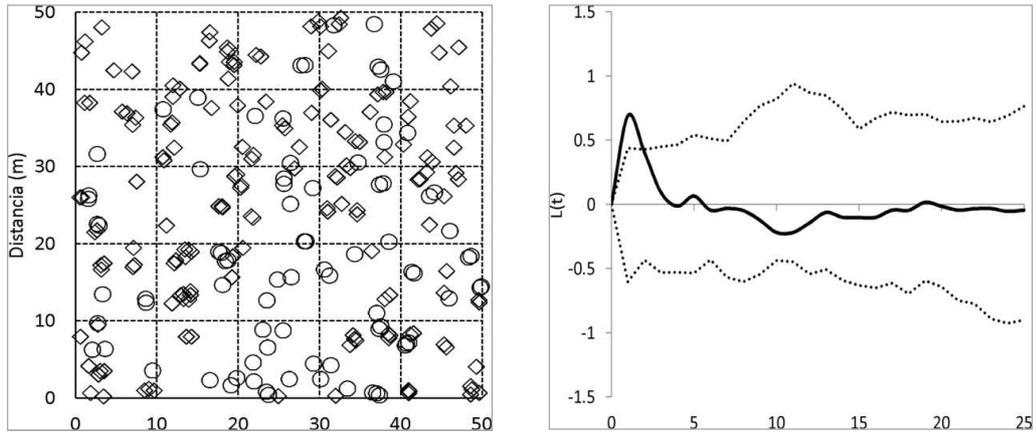


A) *Quercus laurina* UM3

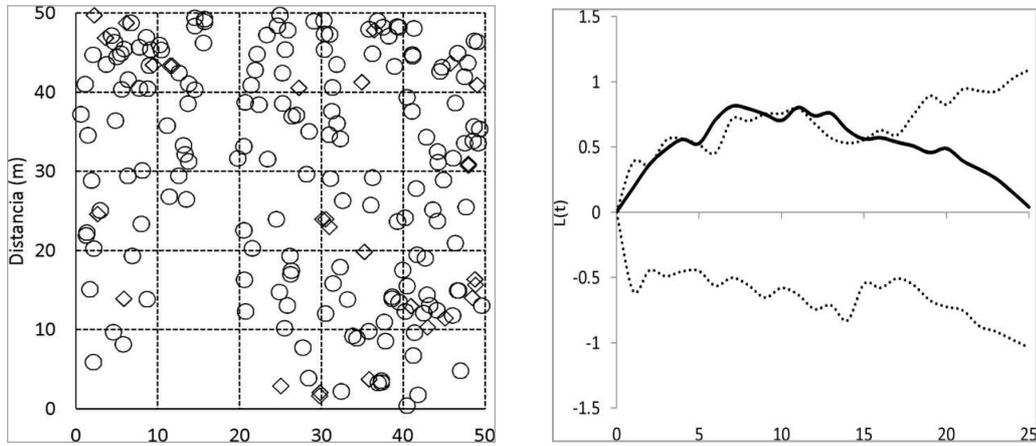


B) *Quercus crassifolia* UM3

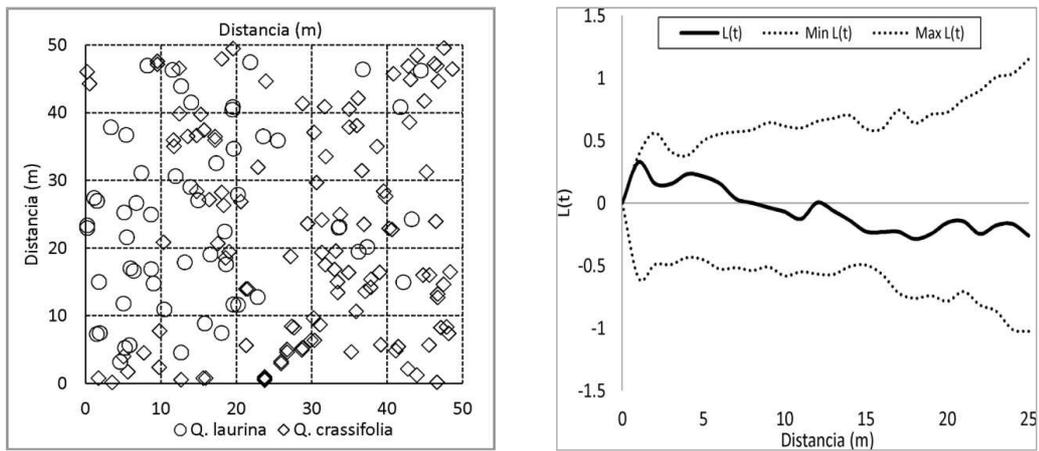
Figura 2.5. Unidad de muestreo 3, distribución espacial e índice de distribución espacial A) *Quercus laurina* y B) *Q. crassifolia*.



A) UM1



B) UM2



C) UM3

Figura 2.6. Distribución espacial e Índices de distribución espacial *Q. laurina* y *Q. crassifolia*: A) UM1, B) UM2 y C) UM3.

## 2.6. CONCLUSIONES

Con base en los índices de valor de importancia (IVI) y de valor forestal (IVF), se encontró una mayor dominancia de especies del género *Quercus* (*Q. crassifolia* y *Q. laurina*) en las tres unidades de muestreo (UM). La densidad arbórea fue mayor en la UM2, donde se encontró la mayor diversidad de especies. Sin embargo, fue en la UM3 donde se encontró el área basal mayor.

En la diversidad de especies, se encontraron diferencias estadísticas significativas ( $p \leq 0.05$ ), entre la UM1 y UM2, y UM1 y UM3. La UM1 presentó los menores valores de diversidad respecto a los índices evaluados (Shannon y Simpson).

Los patrones de distribución espacial fueron aleatorios para las especies con el mayor IVI en cada UM. El análisis de la distribución espacial de las dos especies en conjunto, reveló una distribución aleatoria en prácticamente todas las distancias analizadas. El patrón agregado de las especies individuales se atribuye entonces a estrategias de regeneración y prácticas silvícolas en la zona, concluyendo que ambas especies pueden coexistir en un mismo lugar, modificando su importancia estructural y su patrón de distribución horizontal.

## 2.7. REFERENCIAS

- Álvarez, S., y Rubio, A. (2013). Línea base de carbono en bosque mixto de pino-encino de la Sierra Juárez (Oaxaca, México). Aplicación del modelo CO2FIX V. 3.2. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 19(1): 125–137.
- Aquino-Vásquez, C., Ruiz-Aquino, F., y Fuente-Carrasco, M. E. (2012). Caracterización del patrimonio natural de la comunidad de Ixtlán de Juárez: una aproximación desde el espacio territorial. In M. E. Fuente-Carrasco, F. Ruiz-Aquino, & C. Aquino-Vásquez (Eds). *Conocimiento indígena contemporáneo y patrimonio biocultural en la Sierra Juárez de Oaxaca:*

- Aportaciones empíricas y analíticas hacia la sustentabilidad.* (pp. 35–59). México: Universidad de la Sierra Juárez.
- Badii, M. H., Landeros, J., y Cerna, E. (2008). Patrones de asociación de especies y sustentabilidad. *Revista Daena (International Journal of Good Conscience)*, 3(1), 632–660.
- Besag, J. (1977). Contribution to the discussion on Dr. Ripley's paper. *Journal of the Royal Statistical Society*, 39, 193–195.
- Bongers, F., Popma, J., Del Castillo, J. M., y Carabias, J. (1988). Structure and floristic composition of the lowland rain forest of Los Tuxtlas, Mexico. *Vegetatio*, 74(1), 55–80.
- Castellanos-Bolaños, J. F., Treviño-Garza, E. J., Aguirre-Calderón, O. A. Jiménez-Pérez, J., Musalem-Santiago, M., y López-Aguillón, R. (2008). Estructura de bosques de pino pátula bajo manejo en Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México. *Madera y Bosques*, 14(2), 51–63.
- Condés, S. y Martínez, M. (1998). Comparación entre los índices de distribución espacial de árboles más usados en el ámbito forestal. *Investigación Agraria. Sistemas y Recursos Forestales*, 7(1/2), 173–187.
- Corella-Justavino, F., Valdez-Hernández, J. I., Cetina-Alcalá, V. M., González-Cossio, F. V., Trinidad-Santos, A. y Aguirre-Rivera, J. R. (2001). Estructura forestal de un bosque de mangles en el noreste del estado de Tabasco, México. *Ciencia Forestal en México*, 26(90), 73–102.
- Cortés, S. P. 2003. Estructura de la vegetación arbórea y arbustiva en el costado oriental de la serranía de Chía (Cundinamarca, Colombia). *Caldasia* 25(1): 119–37.
- Curtis, J. T. y McIntosh, R. P (1951). An upland forest continuum in the pariré-forest border region of Wisconsin. *Ecology*, 32, 476–496.
- Del Río, M., Montero, G., Montes, F., y Cañellas, I. (2003). Revisión: Índices de diversidad estructural en masas forestales. *Investigación Agraria. Sistemas y Recursos Forestales*, 12(1), 159–176.
- Encina-Domínguez, J. A., Zárate-Lupercio, A., Estrada-Castillón, E., Valdés-Reyna, J., y Villarreal-Quintanilla, J. (2009). Composición y aspectos estructurales de

- los bosques de encino de la sierra de Zapalinamé, Coahuila, México. *Acta Botánica Mexicana*, 86, 71–108.
- García, E. (1987). *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana)*. Instituto de Geografía. México: UNAM.
- Hutcheson, K. (1970). A test for comparing diversities based on Shannon formula. *Journal of theoretical Biology*, 29, 151–154.
- Krebs, C.J. (1989). Species diversity measures. In: Krebs C.J. (Ed). *Ecological Methodology*. (pp. 328–370). Uharper Collins Publishers, Inc.
- Linzaga-Román, B. E., Ángeles-Pérez, G., Catalán-Heverástico, C., y Hernández de la Rosa, P. (2011). Estructura espacial de *Pachycereus weberi* (Coul.) Backeb. en la Cañada del Zopilote, Guerrero. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 17(2), 189–198.
- Magurran, A. E. (1988). *Ecological diversity and its measurement*. Princeton, N. J.: Princeton University Press.
- Márquez-Linares, M. A., González-Elizondo, S., y Alvarez-Zagoya, R. (1999). Componentes de la diversidad arbórea en bosques de pino encino de Durango, Méx. *Madera y Bosques*, 5(2), 67–77.
- Martínez-Ramos, M. (1994). Regeneración natural y diversidad de especies arbóreas en selvas húmedas. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 54, 179–224.
- Moreno, C. E. 2001. Métodos para medir la biodiversidad. *M & T. Manuales y Tesis SEA*, 1, Zaragoza, España, 84 p.
- Rainforest Alliance. 2006. *Resumen Público de Certificación de la Comunidad de Ixtlán de Juárez Oaxaca*. Consejo de Manejo Forestal y de SmartWood. New York, USA.
- Ripley, B. D. 1977. Modelling spatial patterns (with discussion). *Journal of the Royal Statistical Society*, 39, 172–212.
- Rubio-Licon, L. E., Romero-Rangel, S., y Rojas-Zenteno, E. C. (2011). Estructura y composición florística de dos comunidades con presencia de *Quercus* (Fagaceae) en el Estado de México. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 17(1), 77–90.

- Ruiz-Aquino, F., J. I. 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 (En prensa)*.
- Sánchez-Rodríguez, E. V., López-Mata, L., García-Moya, E., y Cuevas-Guzmán, R. (2003). Estructura, composición florística y diversidad de especies leñosas de un bosque mesófilo de montaña en la Sierra de Manantlán, Jalisco. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 73, 17–34.
- Servicios Técnicos Forestales (STF). 2008. *Estudio sobre el aprovechamiento del encino Ixtlán de Juárez, Oaxaca México*.
- Tárrega, R., Calvo, L., Marcos, E., y Taboada, A. (2006). Forest structure and understory diversity in *Quercus pyrenaica* communities with different human uses and disturbances. *Forest Ecology and Management*, 227(1), 50–58. DOI:10.1016/j.foreco.2006.02.008.
- Técnica Informática Aplicada, S. A. (TIASA). 1993. *Programa de Manejo Forestal de Ixtlán de Juárez, Oaxaca México*.
- Vázquez-Negrín, I., Castillo-Acosta, O., Valdez-Hernández, J. I., Zavala-Cruz, J., y Martínez-Sánchez, J. L. (2011). Estructura y composición florística de la selva alta perennifolia en el ejido Niños Héroe Tenosique, Tabasco, México. *Polibotánica*, 32, 41–61.
- Villavicencio-Enríquez, L., y Valdez-Hernández, J. I. (2003). Análisis de la estructura arbórea del sistema agroforestal rusticano de café en San Miguel, Veracruz, México. *Agrociencia*, 37(4), 413–423.
- Zacarías-Eslava, L. E., Cornejo-Tenorio, G., Cortés-Flores, J., González-Castañeda, N., y Ibarra-Manríquez, G. (2011). Composición, estructura y diversidad del cerro El Águila, Michoacán, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 82(3), 854–869.
- Zarco-Espinosa, V. M., Valdez-Hernández, J.I., Ángeles-Pérez, G., y Castillo-Acosta, O. (2010). Estructura y diversidad de la vegetación arbórea del parque estatal Agua Blanca, Macuspana, Tabasco. *Universidad y Ciencia Trópico Húmedo*, 26(1), 1–17.

## CAPÍTULO III

### ECUACIONES DE BIOMASA AÉREA PARA *Quercus laurina* y *Q. crassifolia* en OAXACA<sup>2</sup>

#### 3.1. RESUMEN

La estimación de la biomasa arbórea es un medio para determinar los montos existentes de carbono orgánico en cada uno de los componentes del árbol. Los estudios sobre biomasa aérea para especies del género *Quercus* son escasos en México, aun cuando el país es considerado un centro de distribución. El objetivo del presente trabajo fue generar ecuaciones alométricas para estimar la biomasa aérea de árboles de *Quercus laurina* Humb. & Bonpl. y *Q. crassifolia* Humb. & Bonpl., en un bosque de la comunidad de Ixtlán de Juárez, Oaxaca. Se muestrearon 16 árboles por cada especie, distribuidos en seis categorías diamétricas y se determinó la biomasa en fuste con corteza, ramas y follaje. Se evaluaron diferentes modelos de regresión con base en la bondad de ajuste y validez de sus indicadores estadísticos. Se eligió la ecuación exponencial de la forma  $Biomasa = e^{[-\beta_0 + \beta_1 \ln(DN^2 \times AT)]}$ , para calcular la biomasa (kg) en función al diámetro normal ( $DN$ , cm) y altura total ( $AT$ , m) de los árboles. La biomasa aérea total se estimó en 100.15 Mg ha<sup>-1</sup> para *Q. laurina* y 129.97 Mg ha<sup>-1</sup> para *Q. crassifolia*. La distribución proporcional de biomasa por compartimento de *Q. laurina* fue 82.9, 14.9 y 2.2% para fustes, ramas y follaje, respectivamente, mientras que para *Q. crassifolia* la distribución fue 82.3, 16.0 y 1.7% en el mismo orden.

**Palabras clave:** Categorías diamétricas, fuste, ramas, follaje, diámetro normal.

#### 3.2. ABSTRACT

Estimating tree biomass is a means to determine the existing amounts of organic carbon in each of the tree components, studies of biomass for *Quercus* species are

---

<sup>2</sup> Artículo publicado en la Revista Madera y Bosques 20(2): 33-48. Se presentaron avances en el IV Congreso Mexicano de Ecología 2013.

scarce in Mexico, even though the country is considered a distribution center. The aim of this study was to generate allometric equations for estimating aboveground biomass of trees *Quercus laurina* Humb. & Bonpl. and *Q. crassifolia* Humb. & Bonpl., in a forest community of Ixtlan de Juarez, Oaxaca. Were sampled 16 trees per species, distributed in six diameter categories and biomass was determined in stem bark, branches and foliage that were sampled. Different regression models were evaluated based on fitness and validity of their statistical indicators. An exponential equation was chosen in the form of  $Biomasa = e^{[-\beta_0 + \beta_1 \ln(DN^2 \times AT)]}$ , to calculate the biomass (kg) within a normal diameter ( $DN$ , cm) and total height ( $AT$ , m) of the trees. The total aboveground biomass was estimated at 100.15 Mg ha<sup>-1</sup> for *Q. laurina* and 129.97 Mg ha<sup>-1</sup> for *Q. crassifolia*. The proportional distribution of biomass per compartment was 82.9, 14.9 and 2.2% for stems, branches and foliage, respectively, while for *Q. crassifolia* the distribution was 82.3, 16.0 and 1.7% in the same order.

**Keywords:** *diametric categories, stem, branches, foliage, normal diameter.*

### 3.3. INTRODUCCIÓN

La estimación de la biomasa es un medio para cuantificar la cantidad de CO<sub>2</sub> que puede ser liberado a la atmosfera, o extraído y fijado en los bosques (Clark y Clark, 2000; Navar, 2009). Sirve como parámetro para la planificación del aprovechamiento maderable al determinar la productividad de los bosques (Kauffman *et al.*, 2009). Además, es la base para el estudio de elementos biogeoquímicos como el nitrógeno (Basuki *et al.*, 2009; Navar-Chaidez, 2010), y también es un indicador de la cantidad de materia prima disponible para combustible, como una fuente renovable de energía (Gómez-García *et al.*, 2013).

La cantidad total de materia orgánica aérea presente en los árboles, incluye hojas, ramas, tronco y corteza, y su conjunto se define como biomasa aérea (Garzuglia y Saket, 2003); su valoración en cualquier componente del ecosistema requiere la aplicación de métodos directos o indirectos (Brown *et al.*, 1989; Vásquez y Arellano, 2012). La estimación de biomasa por el método directo es el más comúnmente

usado (Díaz-Franco, 2007); el procedimiento consiste en cortar el árbol y pesar directamente cada componente; sin embargo, su utilización en ecosistemas forestales está condicionada por los altos costos que representa.

Para estimar la acumulación de la biomasa se requiere de modelos matemáticos simples basados en un número reducido de parámetros obtenidos de los árboles, que permitan estimar con precisión y confiabilidad la biomasa de las especies arbóreas. (Acosta-Mireles *et al.*, 2002; Avendaño-Hernández *et al.*, 2009). En particular, las ecuaciones alométricas son importantes para cuantificar el almacenamiento de biomasa y carbono en ecosistemas terrestres (Litton y Kauffman, 2008).

En México, los estudios para la estimación de biomasa del género *Quercus* generalmente han agrupado a las especies. Por ejemplo, cinco especies de la meseta central de Chiapas (Ayala-López *et al.* 2001), dos especies de la Sierra Madre Oriental en Nuevo León (Rodríguez-Laguna *et al.*, 2007), tres especies del sureste de Nuevo León (Domínguez-Cabrera *et al.*, 2009) y dos especies de la Sierra Madre Occidental en Durango (Silva-Arredondo y Navar-Cháidez, 2010); también se han generado ecuaciones específicas para algunas especies de encinos como *Q. peduncularis* Née. de Oaxaca (Acosta-Mireles *et al.*, 2002), *Q. sideroxila* Humb. & Bonpl. de Durango (Merlin-Bermudez y Navar-Chaidez, 2005), *Q. rysophylla* Weath., *Q. xalapensis* Humb. & Bonpl. y *Q. germana* Schldl. & Cham. de Tamaulipas (Rodríguez-Laguna *et al.*, 2009), y *Q. magnoliaefolia* Née de la Sierra de Huautla, Morelos (Gómez-Díaz *et al.*, 2011).

Navar-Chaidez (2010) al evaluar la importancia de las ecuaciones alométricas a nivel de especie para cada sitio específico, encontró una mejoría del 5% en el coeficiente de determinación y del 20% en el error estándar. En el mismo sentido, Cairns *et al.* (2000) y Ferry *et al.*, (2008) indican que la acumulación de biomasa aérea depende de variables como el clima, el suelo y las especies arbóreas, entre otras. También, Acosta-Mireles *et al.* (2002) al comparar las ecuaciones alométricas de seis especies arbóreas de Oaxaca, determinaron que a pesar de que las especies presentaban similitud en el patrón de crecimiento y arquitectura de copa, no fue

posible ajustarlas a la misma ecuación alométrica. Lo anterior confirma el señalamiento de Wang (2006) y Rodríguez *et al.* (2012), que la estimación precisa de biomasa requiere, por lo general, ecuaciones particulares para cada especie.

Las especies *Q. laurina* y *Q. crassifolia* (encinos rojos) pertenecen a la sección Lobatae (Pérez-Olvera y Dávalos-Sotelo, 2008) y tienen amplia distribución, ocurre en 15 estados de México (Valencia, 2004). *Quercus crassifolia* es una especie que tiene grandes posibilidades de ser utilizada industrialmente debido a la calidad de su madera en términos de su respuesta en operaciones de torneado, taladrado, moldurado y lijado (Flores-Velázquez *et al.*, 2013), además del potencial ornamental y su utilidad en la recuperación de suelos degradados (Rubio-Licona *et al.*, 2011). Por otro lado, *Q. laurina* presenta fustes bien conformados y madera con excelentes características tecnológicas (Flores-Velázquez *et al.*, 2007; Flores Velázquez *et al.*, 2013). Además de la importancia mencionada, el presente estudio serviría como parámetro para estimar la productividad del bosque de encinos de Ixtlán de Juárez, Oaxaca; permitiría cuantificar la biomasa aérea que acumulan *Q. laurina* y *Q. crassifolia*, como una alternativa para el pago por servicios ambientales al ingresarlas al mercado del carbono; y también, sería útil para determinar el potencial de estas especies como una fuente de energía limpia al fijar el CO<sub>2</sub> durante los procesos fotosintéticos y utilizarlas en la producción de combustibles renovables.

### **3.4. OBJETIVO**

Generar ecuaciones alométricas que permitan estimar la biomasa aérea total y su distribución en tres principales componentes (fuste, ramas, follaje) para árboles de *Q. laurina* y *Q. crassifolia* en un bosque de pino-encino de Ixtlán de Juárez, Oaxaca.

### **3.5. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.5.1. Área de estudio**

El estudio se realizó en un bosque de pino-encino de la comunidad de Ixtlán de Juárez, Oaxaca, localizado entre las coordenadas geográficas: 17°18'16" y 17°30'00" N; 96°31'38" y 96°22'00" O (Castellanos-Bolaños *et al.*, 2010). Según la clasificación

de Köppen modificado por García (1987), el clima del bosque de pino-encino es C (m)(w'')b(i')g, templado húmedo con lluvias en verano. La temperatura promedio anual es de 20°C y la precipitación pluvial varía de 800 a 1200 mm al año (Aquino-Vásquez *et al.*, 2012). El tipo de suelo más común en el área de estudio es el Acrisol húmico (Ah) con textura media limosa, caracterizada por presentar en la superficie una capa muy rica de materia orgánica de color oscuro (Rainforest Alliance, 2006).

En los bosques de pino encino de Ixtlán de Juárez, Oaxaca, *Q. laurina* y *Q. crassifolia* se encuentran cohabitando con especies del género *Pinus* así como especies latifoliadas: *Arbutus xalapensis* Kunth, *Alnus acuminata arguta* (Schltdl.) Furlow, *Prunus serotina* Ehrn., *Fraxinus uhdei* (Wenzig) Lingelsheim y *Litsea glaucescens* Kunth, entre otras (Aquino-Vásquez *et al.*, 2012). Las especies de encino predominantes sobre este tipo de vegetación son *Q. crassifolia*, *Q. laurina*, *Q. obtusata* Humb. & Bonpl., *Q. oleoides* Schltdl. & Cham. y *Q. conspersa* Benth.

Los árboles muestreados se obtuvieron de dos rodales con exposición suroeste y con dominancia de especies del género *Quercus*. El primer rodal (17°21'22" N y 96°27'42" O) está situado en un terreno con pendiente del 40% a una altitud de 2707 m y la especie dominante es *Q. laurina*. El segundo rodal (17°21'08" N y 96°27'31" O) está situado en un terreno con pendiente del 20% a una altitud de 2631 m y la especie dominante es *Q. crassifolia*.

### 3.5.2. Selección y derribo de árboles

En los dos rodales dominados por *Quercus*, se establecieron tres unidades de muestreo de 50 x 50 m cada una. Se midió el diámetro normal (*DN*, cm) y la altura total (*AT*, m) de todos los individuos de *Q. laurina* y *Q. crassifolia* con *DN* ≥ 2.5 cm, con la finalidad de clasificar a los árboles por categorías diamétricas (CD) y muestrear la mayor cantidad disponible. Para *Q. laurina* la máxima CD encontrada fue de 30 cm y para *Q. crassifolia* de 35 cm. Sin embargo, en esta CD de 35 se localizaron pocos individuos de *Q. crassifolia*, además árboles no representativos de la comunidad (bifurcados o con presencia de plagas), por lo que se decidió no incluirlos para el muestreo y trabajar con categorías diamétricas entre 5 y 30 cm para

ambas especies. Por lo anterior, las ecuaciones alométricas generadas son útiles para este intervalo de CD (5 cm a 30 cm).

Se eligieron 16 árboles por cada especie (32 en total), sanos, de fuste recto y no bifurcados, obteniendo la muestra de forma proporcional a la frecuencia relativa de cada categoría diamétrica, con la intención de muestrear toda la variabilidad existente (Manzano-Méndez *et al.*, 2010). A los individuos se les midió el *DN* con cinta diamétrica y *AT* con clinómetro marca Brunton modelo CM360LA, antes de ser derribados.

### **3.5.3. Separación por componentes**

Posterior al derribo en campo, se separó el componente aéreo del árbol (fuste con corteza, ramas y follaje) para obtener su peso húmedo (*Ph*, en kg) (Acosta-Mireles *et al.*, 2002; Avendaño-Hernández *et al.*, 2009; Gómez-Díaz *et al.*, 2011). Los tallos y ramas principales se cortaron en trozas de 1 m de longitud y se pesaron en una báscula electrónica marca Torrey serie EQB/EQM con capacidad de 100 kg  $\pm$  100 g, mientras que las ramas secundarias y follaje fueron pesadas en una balanza electrónica marca Ohaus modelo SP6001 con capacidad de 6 kg  $\pm$  0.1 g.

### **3.5.4. Pesado y secado de muestras**

El peso seco de cada árbol se determinó por extrapolación en el laboratorio, a partir de cinco rodajas de 5 cm de grosor para fuste (160 rodajas completas en total), cinco muestras de 100 g para ramas (160 en total) y cinco muestras de 100 g para follaje (160 en total); previamente cada muestra fue pesada en campo para tener la referencia del peso húmedo y hacer el ajuste para las fracciones de las partes del árbol que no fueron secadas en el laboratorio.

El secado de las muestras se realizó en una estufa eléctrica RIOSSA modelo HD41, a una temperatura de 100 °C hasta alcanzar su peso constante (Muñoz *et al.*, 2005), mismo que fue verificado registrando el peso de las muestras cada 24 horas con una balanza electrónica marca Ohaus, Modelo Precision Standard con capacidad de 5 kg  $\pm$  0.01 g. De acuerdo con Walker (2010), el contenido de humedad (*CH%*) se obtuvo mediante la fórmula:

$$CH\% = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100 \quad (1)$$

Donde:  $P_h$  = peso húmedo (kg),  $P_s$  = peso seco (kg).

El contenido de humedad se aplicó al peso total de madera de fuste, ramas y follaje (Flores-Nieves *et al.*, 2011) para obtener el peso seco a partir del peso húmedo, por medio de la ecuación:

$$B_c = PH_c - \frac{PH_c \times CH_c}{100} \quad (2)$$

Donde:

$B_c$  = biomasa del componente (kg),  $PH_c$  = peso húmedo del componente (kg) y  $CH_c$  = contenido de humedad del componente.

La suma del peso seco de cada componente constituyó la biomasa aérea total del árbol (Domínguez-Cabrera *et al.*, 2009).

### 3.5.5. Análisis estadístico

Las ecuaciones alométricas convencionales utilizan generalmente el diámetro normal para estimar la biomasa (Navar *et al.*, 2004; Avendaño-Hernández *et al.*, 2009), sin embargo las ecuaciones de mejor estimación de biomasa están en función del diámetro normal y altura total (Brown *et al.*, 1989; Rodríguez-Ortiz *et al.*, 2012). En el presente estudio se analizaron las siguientes ecuaciones para estimar la biomasa del fuste, ramas, follaje y la biomasa total:

$$y = e^{[-\beta_0 + \beta_1 \ln(DN \times AT)]} \quad (3)$$

$$y = e^{[-\beta_0 + \beta_1 \ln(DN^2 \times AT)]} \quad (4)$$

$$y = \beta_0 + \beta_1 \times DN^2 \times AT \quad (5)$$

$$y = \beta_0 (DN \times AT)^{\beta_1} \quad (6)$$

$$y = \beta_0 + \beta_1 \times DN^2 + \beta_2 \times AT + \beta_3 (DN^2 \times AT) \quad (7)$$

Donde:

$y$  = biomasa (kg);  $DN$  = diámetro normal (cm);  $AT$  = altura total (m);  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ , y  $\beta_3$  = parámetros de regresión.

La ecuación de mejor ajuste se comparó con la ecuación de Schumacher (Ecuación 8) que utiliza como variable independiente el *DN*, por ser una de las más frecuentemente utilizadas (Méndez-González *et al.*, 2011). También, se realizó una comparación con ecuaciones que han sido generadas para especies del género *Quercus* aplicadas a las variables medidas en los rodales del presente estudio.

$$y = \beta_0 \left( e^{-\beta_1 / DN} \right) \quad (8)$$

El análisis de las ecuaciones se realizó con el paquete estadístico SAS (SAS Institute Inc., 1996), evaluándose modelos de regresión lineal (PROC GLM) y no lineal (PROC MODEL) para estimar la biomasa total y de cada componente (Rodríguez-Ortiz *et al.*, 2012). Para la elección de las ecuaciones se comprobaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas (Fonseca *et al.*, 2009), analizándose los siguientes indicadores de ajuste: coeficiente de determinación ajustado ( $R^2$ ), error estándar (*EE*), cuadrado medio del error (*CME*) y significancia de los parámetros de cada ecuación (Álvarez-González *et al.*, 2005; Rojo-Martínez *et al.*, 2005).

### 3.5.6. Biomasa aérea por unidad de superficie

La biomasa aérea se cuantifica en kilogramos por árbol o en toneladas por hectárea de peso seco (Silva-Arredondo y Navar-Cháidez, 2010). Para la evaluación de la biomasa aérea por unidad de superficie, de *Q. laurina* y *Q. crassifolia*, se utilizaron los datos medidos en las tres unidades de muestreo, con estos datos y con la ecuación que presentó el mejor ajuste por componente, se calculó la biomasa aérea total de estas dos especies, sumando la biomasa de fuste, ramas y follaje para cada especie por UM, de acuerdo con el procedimiento efectuado por Domínguez-Cabrera *et al.* (2009).

### 3.5.7. Factor de expansión de biomasa

Al cociente de la biomasa aérea total y la biomasa de los fustes se le denomina factor de expansión de biomasa (*FEB*) (Dauber *et al.*, 2002). El método que emplea los *FEB* se utiliza cuando se requiere evaluar la biomasa total con información de inventarios forestales donde se cuantifica el volumen de especies arbóreas (Silva-

Arredondo y Navar-Chaidez, 2010) y consiste en multiplicar la biomasa de los fustes por el *FEB* dando como resultado el valor de la biomasa total (Dauber *et al.*, 2002). Según Domínguez-Cabrera *et al.* (2009), los *FEB* se han calculado utilizando la siguiente ecuación:

$$FEB = \frac{B_f + B_r + B_h}{B_f} \quad (9)$$

Donde:

$B_f$  = biomasa de fuste,  $B_r$  = biomasa de ramas y  $B_h$  = biomasa de hojas.

De acuerdo con Rodríguez-Ortiz *et al.* (2012), mediante ecuaciones de volumen total con la relación:

$$FEB = \frac{BT}{EV} \quad (10)$$

Donde:

$BT$  = biomasa total,  $EV$  = ecuación de volumen.

En el presente estudio los *FEB* se calcularon con la ecuación de biomasa total ( $BT$ ) y la ecuación de biomasa de fuste ( $B_f$ ) por medio de la relación:

$$FEB = \frac{BT}{B_f} \quad (11)$$

### 3.6. RESULTADOS

En el cuadro 3.1 se muestran los estadísticos de los árboles de *Q. laurina* y *Q. crassifolia*, medidos en tres unidades de muestreo (UM) de 2500 m<sup>2</sup> cada una.

Cuadro 3.1. Diámetro y altura de *Quercus laurina* y *Q. crassifolia*, medidos en unidades de muestreo.

Estadístico	<i>Quercus laurina</i> (n = 312)			<i>Quercus crassifolia</i> (n = 314)		
	CD (cm)	DN (cm)	AT (m)	CD (cm)	DN (cm)	AT (m)
Mínimo	5	3.20	2.50	5	3.2	2.50
Máximo	30	32.50	25.00	35	35.7	26.00
Media		16.71	13.64		20.9	14.80
<i>EE</i>		0.48	0.33		0.47	0.31

*CD* = Categoría diamétrica; *DN* = Diámetro normal; *AT* = Altura total; *EE* = Error estándar

El *DN* máximo empleado para generar las ecuaciones de *Q. laurina* fue de 31.0 cm, para esta especie el *DN* máximo medido en las UM fue 32.5 cm. Para *Q. crassifolia* el *DN* máximo medido en las UM fue de 35.7 cm y el *DN* máximo utilizado para generar las ecuaciones fue de 31.0 cm. En ambos casos, las ecuaciones alométricas son útiles para el *DN* máximo utilizado al generarlas. En el mismo sentido, respecto a las alturas máximas consideradas para las ecuaciones, son valores cercanos al intervalo medido en las unidades de muestreo.

Los estadísticos para las variables utilizadas en este estudio se presentan en el Cuadro 3.2, donde para cada especie de encino el tamaño de muestra de árboles fue mayor al empleado para generar las ecuaciones de estudios previos, e. g. *Quercus peduncularis* (n = 8) (Acosta-Mireles *et al.*, 2002), *Q. rysophylla* (n = 8), *Q. cambyi* Tre. (n = 8), *Q. laceyi* Small (n = 7) (Rodríguez-Laguna *et al.*, 2007) y *Q. magnoliaefolia* (n = 12) (Gómez-Díaz *et al.*, 2011).

Cuadro 3.2. Diámetro, altura y biomasa de *Quercus laurina* y *Q. crassifolia*, utilizados para generar las ecuaciones alométricas

Estadístico	<i>Quercus laurina.</i>			<i>Quercus crassifolia</i>		
	<i>DN</i> (cm)	<i>AT</i> (m)	<i>BT</i> (kg)	<i>DN</i> (cm)	<i>AT</i> (m)	<i>BT</i> (kg)
Mínimo	6.00	9.60	8.37	5.00	7.20	7.24
Máximo	31.00	25.50	675.35	31.00	25.00	604.18
Media	16.84	18.73	203.49	16.53	16.12	202.01
<i>EE</i>	2.06	1.15	53.15	2.05	1.57	52.79

*DN* = Diámetro normal; *AT* = Altura total; *EE* = Error estándar; *BT* = Biomasa total.

La proporción de biomasa aérea por componente se muestra en el Cuadro 3.3, donde se observa que la mayor acumulación de biomasa aérea en ambas especies se concentra en el fuste (> 80 %).

Los encinos descritos en el presente estudio acumularon entre sí porcentajes similares en la distribución de biomasa para los diferentes componentes. Los

modelos evaluados para los datos de biomasa aérea total de *Q. laurina* y *Q. crassifolia* se presentan en los Cuadros 3.4 y 3.5, respectivamente.

Cuadro 3.3. Distribución de biomasa aérea por componente.

Estadístico	<i>Q. laurina</i>			<i>Q. crassifolia</i>		
	Fuste	Ramas	Follaje	Fuste	Ramas	Follaje
Mínimo	7.99 (95.4)	0.31(3.7)	0.08 (0.9)	6.75 (93.2)	0.33 (4.5)	0.16 (2.3)
Máximo	546.45 (80.9)	113.16 (16.8)	15.75 (2.3)	484.62 (80.2)	106.74 (17.7)	12.82(2.1)
Media	168.70 (82.9)	30.28 (14.9)	4.51 (2.2)	166.23 (82.3)	32.32 (16.0)	3.45 (1.7)
EE	43.02	8.92	1.27	42.00	9.95	1.05

EE = Error estándar; el valor entre paréntesis representa el porcentaje de acumulación de biomasa.

Cuadro 3.4. Modelos evaluados para biomasa aérea total de *Quercus laurina*.

Ecuación	Parámetros	Error estándar	Valor t	Pr> t	CME	R <sup>2</sup>
(3)	$\beta_0 = 5.6930$	0.5259	10.83	< 0.0001	615.0	0.9864
	$\beta_1 = 1.8361$	0.0813	22.59	< 0.0001		
(4)	$\beta_0 = 4.3375$	0.3756	11.55	< 0.0001	387.7	0.9914
	$\beta_1 = 1.0760$	0.0384	28.03	< 0.0001		
(5)	$\beta_0 = -9.3407$	7.6716	-1.22	0.2435	453.0	0.9900
	$\beta_1 = 0.0281$	0.0007	38.51	< 0.0001		
(6)	$\beta_0 = 0.0034$	0.0018	1.90	0.0780	615.0	0.9864
	$\beta_1 = 1.8361$	0.0813	22.59	< 0.0001		
(7)	$\beta_0 = 29.6627$	32.6749	0.91	0.3818	469.2	0.9896
	$\beta_1 = 0.0191$	0.2330	0.08	0.9360		
	$\beta_2 = -2.6628$	2.3025	-1.16	0.2700		
	$\beta_3 = 0.0286$	0.0089	3.20	0.0077		

$\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  y  $\beta_3$  = Parámetros de las ecuaciones; CME = Cuadrado medio del error; R<sup>2</sup> = Coeficiente de determinación ajustado.

En el presente estudio para ambas especies se eligió la ecuación  $y = e^{[-\beta_0 + \beta_1 \ln(DN^2 \times AT)]}$  (ecuación 4) en función a sus indicadores estadísticos: mayor valor del coeficiente de determinación ajustado, el menor valor del cuadrado medio del error, y la significancia de los parámetros de la ecuación; utilizando las mismas variables independientes para *Q. mongolica* Fisch. en Heilongjiang, China, en donde se mejoraron significativamente los indicadores estadísticos (Wang, 2006).

Cuadro 3.5. Modelos evaluados para biomasa aérea total de *Quercus crassifolia*.

Ecuación	Parámetros	Error estándar	Valor t	Pr> t	CME	R <sup>2</sup>
(3)	$\beta_0 = 3.8124$	0.6632	5.75	< 0.0001	1048.7	0.9765
	$\beta_1 = 1.5498$	0.1032	15.02	< 0.0001		
(4)	$\beta_0 = 2.8664$	0.5016	5.71	< 0.0001	780.9	0.9825
	$\beta_1 = 0.9276$	0.0516	17.99	< 0.0001		
(5)	$\beta_0 = 9.4894$	9.9543	0.95	0.3566	833.5	0.9813
	$\beta_1 = 0.0275$	0.0010	28.08	< 0.0001		
(6)	$\beta_0 = 0.0221$	0.0147	1.51	0.1538	1048.7	0.9765
	$\beta_1 = 1.5497$	0.1032	15.02	< 0.0001		
(7)	$\beta_0 = -5.7525$	29.8366	-0.19	0.8503	856.5	0.9808
	$\beta_1 = 0.3756$	0.3012	1.25	0.2362		
	$\beta_2 = -0.6275$	2.6706	-0.23	0.8182		
	$\beta_3 = 0.0131$	0.0114	1.15	0.2732		

$\beta_0, \beta_1, \beta_2$  y  $\beta_3$  = Parámetros de las ecuaciones; CME = Cuadrado medio del error; R<sup>2</sup> = Coeficiente de determinación ajustado.

El análisis de la ecuación 8 mostró los siguientes indicadores estadísticos: *Q. laurina* (coeficiente de determinación ajustado,  $R^2 = 0.972$  y cuadrado medio del error,  $CME = 1076.4$ ). *Q. crassifolia* ( $R^2 = 0.975$  y  $CME = 810.5$ ). Aunque para ambas especies el valor de  $R^2$  es casi similar al obtenido utilizando la ecuación 4, el  $CME$  es mayor utilizando la ecuación 8.

Para los componentes (fuste, ramas y follaje) se utilizó la misma ecuación 4 que para la biomasa total, que fue la que se ajustó mejor a los datos observados en comparación con las otras ecuaciones. Los parámetros y estimadores de regresión por componentes para *Q. laurina* y *Q. crassifolia* se muestran en los Cuadros 3.6 y 3.7, respectivamente.

Cuadro 3.6. Parámetros y estimadores de regresión de la ecuación 4 para componentes de *Quercus laurina*.

Componente	Parámetros	Error estándar	Valor $t$	$Pr >  t $	CME	$R^2$
Fuste	$\beta_0 = 4.2772$	0.3925	10.90	< 0.0001	296.7	0.9900
	$\beta_1 = 1.0493$	0.0402	23.13	< 0.0001		
Ramas	$\beta_0 = 7.3582$	0.5524	13.32	< 0.0001	17.3	0.9864
	$\beta_1 = 1.1962$	0.0562	21.28	< 0.0001		
Follaje	$\beta_0 = 9.1315$	0.5696	16.03	< 0.0001	0.40	0.9845
	$\beta_1 = 1.1801$	0.0580	20.35	< 0.0001		

$\beta_0$ , y  $\beta_1$  = Parámetros de la ecuación; CME = Cuadrado medio del error;  $R^2$  = Coeficiente de determinación ajustado.

Cuadro 3.7. Parámetros y estimadores de regresión de la ecuación 4 para componentes de *Quercus crassifolia*.

Componente	Parámetros	Error estándar	Valor $t$	$Pr> t $	CME	$R^2$
Fuste	$\beta_0 = 2.6861$	0.5169	5.20	0.0001	591.3	0.9790
	$\beta_1 = 0.8872$	0.0533	16.66	< 0.0001		
Ramas	$\beta_0 = 6.2523$	1.0171	6.15	< 0.0001	69.7	0.9560
	$\beta_1 = 1.0953$	0.1039	10.54	< 0.0001		
Follaje	$\beta_0 = 9.6246$	0.5639	17.07	< 0.0001	0.20	0.9887
	$\beta_1 = 1.2118$	0.0574	21.10	< 0.0001		

$\beta_0$ , y  $\beta_1$  = Parámetros de la ecuación; CME = Cuadrado medio del error;  $R^2$  = Coeficiente de determinación ajustado.

La relación de biomasa con el diámetro normal y la altura total, así como las ecuaciones obtenidas por componente para *Q. laurina* y *Q. crassifolia* se ilustran en las figuras 3.1 y 3.2, respectivamente; en ambas especies, el alto valor de  $R^2$  indica una relación estrecha de la biomasa con el diámetro normal y la altura total.

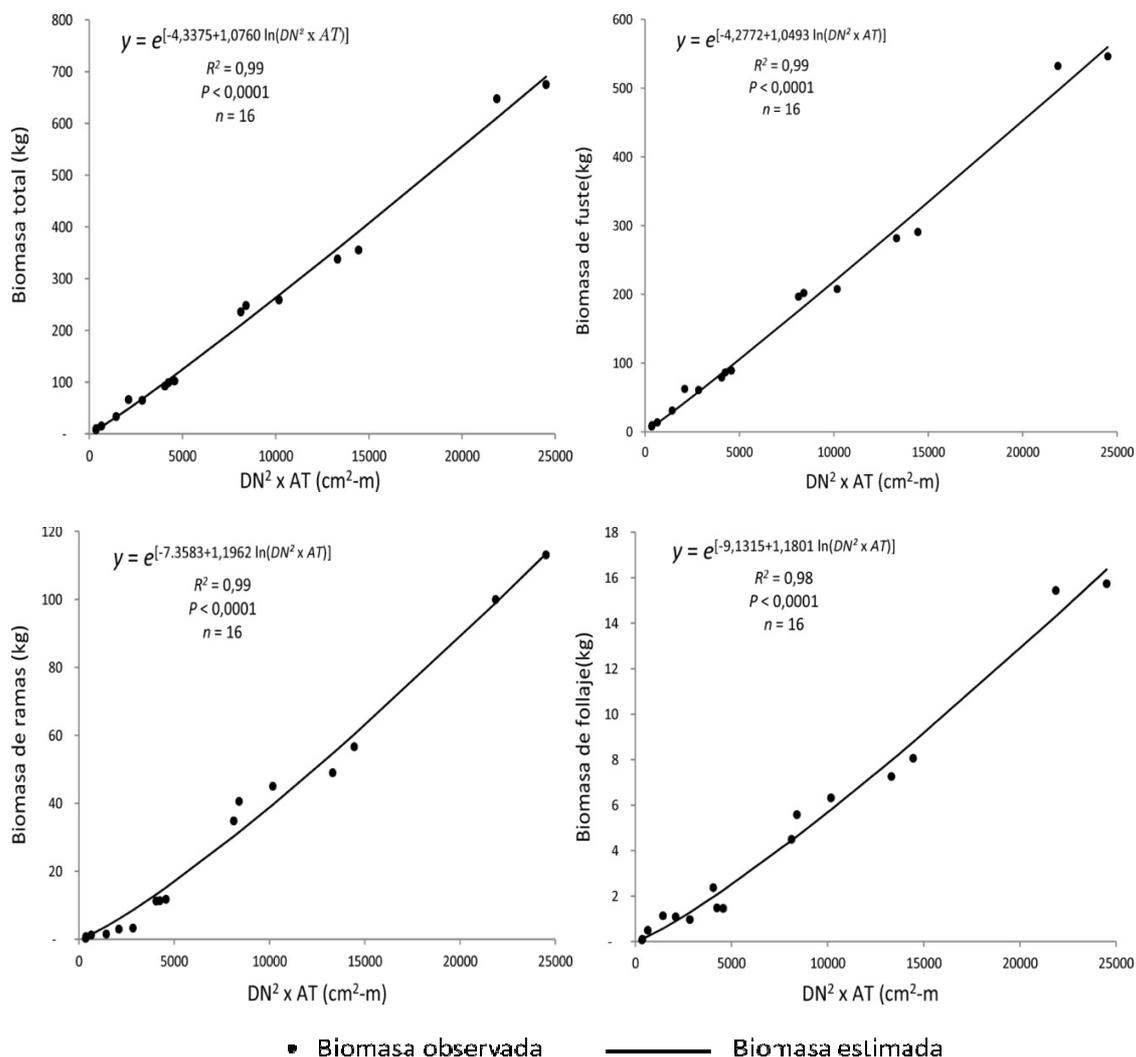


Figura 3.1. Biomasa aérea total y por componentes para *Quercus laurina*, en kg de peso anhidro

En las tres unidades de muestreo (UM) establecidas en el presente estudio (superficie muestreada 7500 m<sup>2</sup>), se midieron un total de 312 árboles de *Q. laurina* y 314 de *Q. crassifolia*, la biomasa aérea acumulada por *Q. laurina* en este estudio fue de 100.15 Mg ha<sup>-1</sup> distribuidos en 416 árboles ha<sup>-1</sup>, mientras *Q. crassifolia* acumuló 129.97 Mg ha<sup>-1</sup> en 419 árboles ha<sup>-1</sup>.

En el cuadro 3.8 se presentan algunas ecuaciones generadas para diferentes especies de *Quercus*, estas ecuaciones se aplicaron a los datos de las unidades de muestreo del presente estudio y se estimó la biomasa total para *Q. laurina* y *Q. crassifolia*.

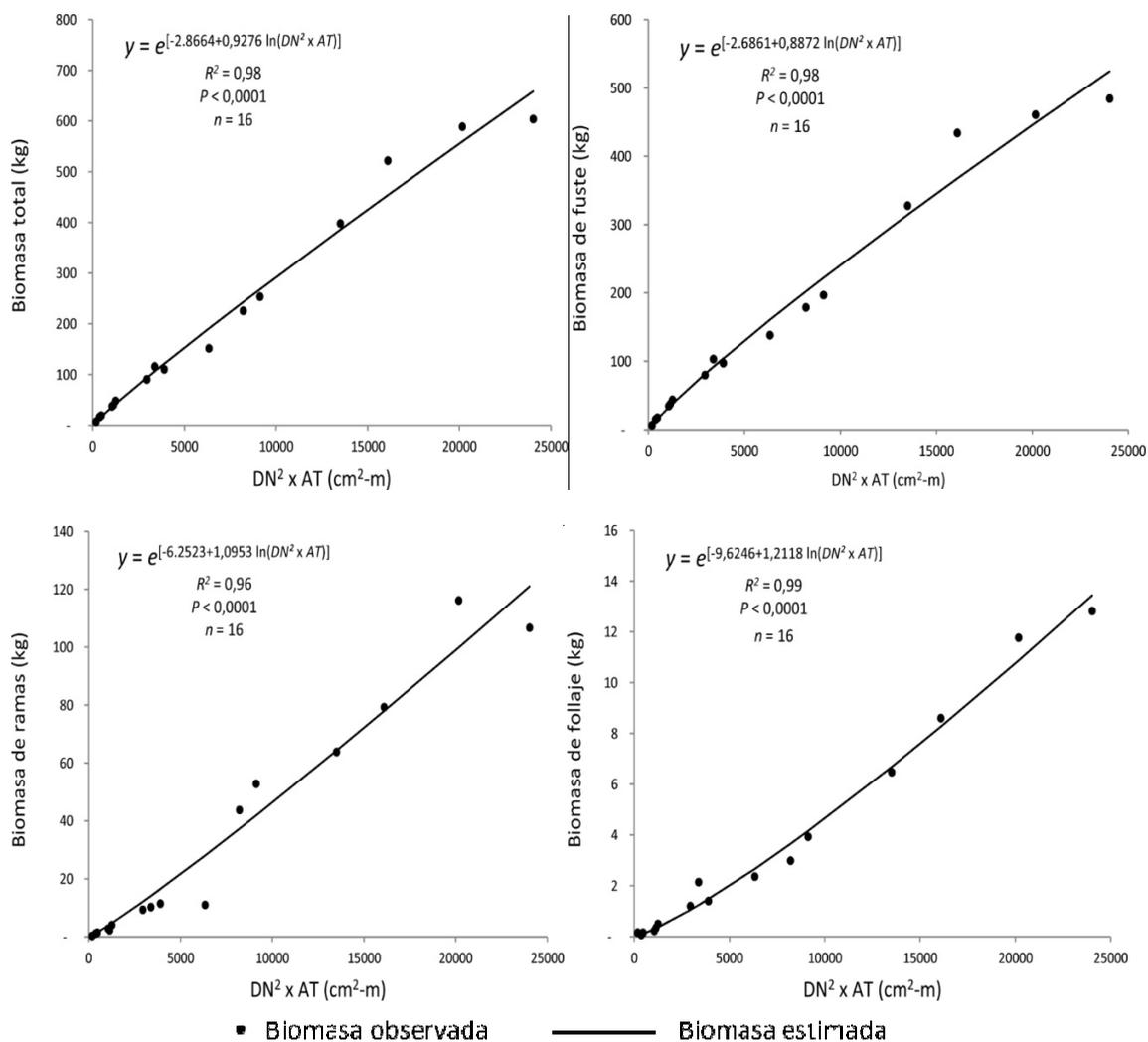


Figura 3.2. Biomasa aérea total y por componentes para *Quercus crassifolia*, en kg de peso anhidro.

Utilizando las ecuaciones generadas para estimar la biomasa aérea total y la biomasa de fuste de cada especie, el factor de expansión de biomasa para *Q. laurina* (ecuación 12) y *Q. crassifolia* (ecuación 13) quedó expresado como:

$$FEB = \frac{e^{[-4.3375+1.0760 \ln(DN^2 \times AT)]}}{e^{[-4.2772+1.0493 \ln(DN^2 \times AT)]}} = e^{[-0.0603+0.0267 \ln(DN^2 \times AT)]} \quad (12)$$

$$FEB = \frac{e^{[-2.8664+0.9276 \ln(DN^2 \times AT)]}}{e^{[-2.6861+0.8872 \ln(DN^2 \times AT)]}} = e^{[-0.1803+0.0404 \ln(DN^2 \times AT)]} \quad (13)$$

Cuadro 3.8. Ecuaciones generadas para especies de *Quercus*, aplicadas a datos medidos en unidades de muestreo.

Fuente	Especies	Ecuación	Biomasa (Mg ha <sup>-1</sup> )	
			<i>Q. laurina</i>	<i>Q. crassifolia</i>
Ayala-López, 2001	<i>Q. crassifolia</i> , <i>Q. chrysophylla</i> Humb. & Bonpl., <i>Q. laurina</i> , <i>Q. rugosa</i> Née	$y = 0.2830(DN^2 \times AT)^{0.8070}$	163.16	202.60
Domínguez-Cabrera, 2009	<i>Q. laceyi</i> , <i>Quercus canbyi</i> , <i>Quercus rysophylla</i>	$y = 4371.395(e^{-70.972/DN}) + 1.3$	78.36	105.49
Acosta-Mireles <i>et al.</i> , 2002	<i>Q. peduncularis</i>	$\ln y = -2.27 + 2.39 \ln(DN)$	76.07	99.29
Gómez-Díaz <i>et al.</i> , 2011	<i>Q. magnoliaefolia</i>	$y = 0.0345(DN)^{2.9334}$	161.00	212.42
Rodríguez-Laguna <i>et al.</i> , 2007	<i>Q. laceyi</i> , <i>Q. canbyi</i>	$\ln y = -2.3517 + 2.4700 \ln(DN)$	91.79	120.08
Rodríguez-Laguna <i>et al.</i> , 2009	<i>Q. rysophylla</i>	$y = 0.9705(DN)^{1.8373}$	113.80	145.24
Rodríguez-Laguna <i>et al.</i> , 2009	<i>Q. xalapensis</i>	$y = 0.7764(DN)^{1.9384}$	126.95	162.88
Silva-Arredondo y Navar-Cháidez, 2010	<i>Quercus sideroxylla</i> , <i>Quercus rugosa</i>	$y = 0.0706(DN)^{2.4077} + 0.004(DN)^{3.0799}$	86.06	112.87
El presente estudio	<i>Q. laurina</i>	$y = e^{[-4.3375 + 1.0760 \ln(DN^2 \times AT)]}$	100.15	
El presente estudio	<i>Q. crassifolia</i>	$y = e^{[-2.8664 + 0.9276 \ln(DN^2 \times AT)]}$		129.97

y = Biomasa, DN = Diámetro normal; AT = Altura total

En promedio, para los 312 árboles muestreados de *Q. laurina* se obtuvo un *FEB* = 1.172 y para los 314 árboles de *Q. crassifolia* un *FEB* = 1.189; estos *FEB* nos indican que aproximadamente el 17 % para *Q. laurina* y 19 % para *Q. crassifolia* de la

biomasa aérea se distribuye en las ramas y follaje, mientras que más del 80 % de la biomasa aérea se concentra en el fuste en ambas especies.

### 3.7. DISCUSIÓN

La biomasa aérea total y por componentes para *Q. laurina* y *Q. crassifolia* se obtuvo mediante la ecuación 4 que utiliza como variables independientes el diámetro normal (*DN*) y la altura total (*AT*) de los árboles, variables que son registradas en los inventarios forestales. El uso del *DN* únicamente como variable independiente mostró un aumento en el cuadrado medio del error, lo que indica una menor precisión de la ecuación 8, respecto a la ecuación 4 que predice mejor los datos observados.

En la comparación de las ecuaciones que se generaron para diferentes especies de *Quercus* (Cuadro 3.8), los valores obtenidos al aplicarlas, son diferentes a los valores resultantes luego de aplicar las ecuaciones específicas generadas en este estudio para *Q. laurina* y *Q. crassifolia*. Por ejemplo, utilizando la ecuación propuesta por Ayala-López (2001), se sobreestima en un 62.9% la biomasa de *Q. laurina* y en un 55.9% la de *Q. crassifolia*. Lo mismo sucede al aplicar la ecuación generada por Gómez-Díaz *et al.* (2011) que también sobreestima la biomasa aérea en 60.8% y 63.4%, para *Q. laurina* y *Q. crassifolia*, respectivamente. Por otro lado, la ecuación generada por Acosta-Mireles *et al.* (2002), subestima, respecto a las ecuaciones generadas en el presente estudio, en 24.1% la biomasa de *Q. laurina* y en 23.6% la de *Q. crassifolia*. En el mismo sentido, la ecuación propuesta por Domínguez-Cabrera (2009), subestima en 21.8% y 18.8% la biomasa de *Q. laurina* y *Q. crassifolia*, respectivamente. Estas comparaciones permiten establecer que, aunque se han generado ecuaciones alométricas para estimar la biomasa aérea de *Quercus*, su utilización se limita a las especies, o grupos de especies para las que fueron generadas, a las condiciones ambientales y de sitio donde cohabitan las especies, al patrón de crecimiento y a la arquitectura de copa (Acosta-Mireles *et al.*, 2002; Wang, 2006; Rodríguez-Ortiz *et al.*, 2012). Por lo anterior, las ecuaciones generadas en este

estudio pueden ser utilizadas en bosques que compartan las mismas condiciones de crecimiento y solo son aplicables a las especies para las que fueron generadas.

La acumulación de biomasa en el fuste de ambas especies fue en promedio seis por ciento superior a *Q. petraea* (Matt.) de Renania-Palatinado, Alemania (fuste 76.7 %, ramas 21.1 % y follaje 2.2 %) (Suchomel *et al.*, 2012) y 20 % mayor a *Q. magnoliaefolia* de Morelos, México (fuste 62.5 %, ramas 27.8 % y follaje 9.6 %) (Gómez-Díaz *et al.*, 2011). Lo anterior puede deberse a que *Q. laurina* y *Q. crassifolia* presentan fustes rectos y poca ramificación en el área de estudio, misma que puede estar influenciada principalmente por factores físicos, edáficos, y por patrones de disturbio que afectan la estructura de la vegetación (Vásquez y Arellano, 2012). En el presente estudio el suelo presenta una capa rica en materia orgánica, con respecto al suelo reportado para *Q. magnoliaefolia* (textura media y superficie pedregosa), lo que puede favorecer el crecimiento de los árboles debido a la disponibilidad de nutrientes. Adicionalmente, el método silvícola utilizado en los bosques de Ixtlán de Juárez (selección de árboles individuales), por los disturbios ocasionados en la apertura de claros en el dosel, favorece la entrada de luz, misma que es aprovechada por especies tolerantes como los encinos, lo que acelera su desarrollo y por ende, la acumulación de biomasa aérea.

El promedio de biomasa aérea reportado en este estudio para *Q. laurina* (100.15 Mg ha<sup>-1</sup>), es similar al reportado para el bosque de pino-encino en el sur de Nuevo León, donde se encontró una biomasa total (BT) de 99.245 Mg ha<sup>-1</sup> para *Quercus spp.* (Domínguez-Cabrera *et al.*, 2009); sin embargo, tomando en cuenta el valor de biomasa aérea de *Q. crassifolia* (129.97 Mg ha<sup>-1</sup>), obtenemos una biomasa aérea total para estas dos especies del bosque de pino encino de Ixtlán de Juárez de 230.12 Mg ha<sup>-1</sup>. Esto supera ampliamente la biomasa reportada para el género *Quercus* en un bosque de pino-encino en el norte de Nuevo León (26.11 Mg ha<sup>-1</sup>) (Silva-Arredondo y Navar-Chaídez, 2010), ó en el parque nacional Malinche entre los estados de Tlaxcala y Puebla (7.66 Mg ha<sup>-1</sup>) (Rojas-García y Villers-Ruiz, 2008), así como para *Q. germana* en un bosque de pino-encino en Tamaulipas (17.3 Mg ha<sup>-1</sup>) (Rodríguez-Laguna *et al.*, 2009) y en un bosque de pino-encino del Jalisco (26.5 Mg ha<sup>-1</sup>) (Castañeda-González *et al.*, 2012). Los valores de biomasa menores están en

relación con la ausencia de árboles con diámetros mayores y menor densidad arbórea, acumulando la biomasa principalmente en categorías diamétricas inferiores. En contraste, los valores de biomasa obtenidos en el presente estudio están en función de promedios altos de área basal ( $24.73 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ ), altura total (14.5 m) y densidad arbórea ( $835 \text{ árboles ha}^{-1}$ ), parámetros asociados con condiciones ambientales favorables, tales como alta humedad relativa y suelos fértiles.

Los valores *FEB* obtenidos en este estudio son menores al encontrado para *Quercus spp.* (1.511) en un bosque de pino-encino, del sur de Nuevo León (Domínguez-Cabrera *et al.*, 2009), valor influenciado principalmente por la proporción de biomasa en las ramas ( $> 50 \%$ ), ya que a menor distribución de biomasa en el fuste mayor *FEB*; así mismo, la estructura del bosque desempeña un papel importante debido a que hay una relación inversa de los indicadores; a mayor altura de los árboles los *FEB* disminuyen (Silva-Arredondo y Navar-Cháidez, 2010), en Ixtlán, Oaxaca, el promedio en altura de los árboles fue de 14.5 m, con individuos que superan los 20 m.

### 3.8. CONCLUSIONES

En el bosque de pino-encino de Ixtlán de Juárez, Oaxaca, la proporción de biomasa aérea por componentes para *Q. laurina* fue de 82.9%, 14.9% y 2.2% para fustes, ramas y follaje, mientras que para *Q. crassifolia* la distribución fue 82.3%, 16.0% y 1.7% en el mismo orden.

La biomasa aérea total para *Q. laurina* se estimó en  $100.15 \text{ Mg ha}^{-1}$  y para *Q. crassifolia* en  $129.97 \text{ Mg ha}^{-1}$ ; en ambos casos, estos valores pudieron ser estimados mediante la ecuación exponencial  $y = e^{[-\beta_0 + \beta_1 \ln(DN^2 \times AT)]}$ , que presentó los mejores coeficientes de ajuste para ambas especies. Otras ecuaciones generadas para diferentes especies de *Quercus* y comparadas con la ecuación obtenida en este estudio, trabajadas todas con los mismos datos de campo, sobreestimaron o subestimaron la biomasa de *Q. laurina* y *Q. crassifolia*.

Los factores de expansión de biomasa: 1.172 para *Q. laurina* y 1.189 para *Q. crassifolia* permitirán realizar estimaciones confiables de biomasa por unidad de área al involucrar variables comúnmente registradas en operaciones de inventarios forestales.

### 3.9. REFERENCIAS

- 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-Murias, A. Merino y R. Rodríguez-Soalleiro. 2005. Estimación de la biomasa arbórea de *Eucalyptus globulus* y *Pinus pinaster* en Galicia. *Recursos Rurais* 1: 21-30
- Aquino-Vásquez, C., F. Ruiz-Aquino y M. E. Fuente-Carrasco. 2012. Caracterización del patrimonio natural de la comunidad de Ixtlán de Juárez: una aproximación desde el espacio territorial. En M. E. Fuente-Carrasco, F. Ruiz-Aquino y C. Aquino-Vásquez, eds. *Conocimiento indígena contemporáneo y patrimonio biocultural en la Sierra Juárez de Oaxaca: Aportaciones empíricas y analíticas hacia la sustentabilidad*. Universidad de la Sierra Juárez, México. pp: 35-59.
- Avendaño-Hernández, D. M., M. Acosta-Mireles, F. Carrillo-Anzures y J. D. Etchevers-Barra. 2009. Estimación de biomasa y carbono en un bosque de *Abies religiosa*. *Fitotecnia Mexicana* 32(3): 233-238.
- Ayala-López, R., B. H. De Jong y H. Ramírez-Maldonado. 2001. Ecuaciones para estimar biomasa en la meseta central de Chiapas. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 7(2): 153-157.
- Basuki, M. T., P. E. Van Laake, A. K. Skidmore y Y. A. Hussin. 2009. Allometric equation for estimating the above-ground biomass in tropical lowland Dipterocarp forests. *Forest Ecology and Management* 257: 1684-1694.

- Brown, S., A. J. Gillespie y A. E. Lugo. 1989. Biomass estimation for tropical forest with applications to forest inventory data. *Forest Science* 35(4): 881-902.
- Cairns, A. M., P. K. Haggerty, R. Alvarez, B. H. de Jong y I. Olmsted. 2000. Tropical Mexico's recent land-use change: a region's contribution to the global carbon cycle. *Ecological Applications* 10: 1426-1441.
- Castañeda-González, J. C., A. Gallegos-Rodríguez, M. Sánchez-Duran y P. A. Domínguez-Caballero. 2012. Biomasa aérea y posibles emisiones de CO<sub>2</sub> después de un incendio; caso del bosque "La Primavera", Jalisco, México. *Ra Ximhai* 8(3): 1-15.
- Castellanos-Bolaños, J.F., E. J. Treviño-Garza, O. A. Aguirre-Calderón, J. Jiménez Pérez y A. Velázquez-Martínez. 2010. Diversidad arbórea y estructura espacial de bosques de pino-encino en Ixtlán de Juárez, Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 1(2): 39-52.
- Clark, B. D., y D. A. Clark. 2000. Landscape-scale variation in forest structure and biomass in a tropical rain forest. *Forest Ecology and Management* 137: 185-198.
- Dauber, E., J. Teran y R. Guzman. 2002. Estimación de Carbono y Biomasa en Bosques naturales de Bolivia. *Revista Forestal Iberoamericana* 1(1): 1-10.
- Díaz-Franco, R., M. Acosta-Mireles, F. Carrillo-Anzures, E. Buendía-Rodríguez, E. Flores-Ayala y J. D. Etchevers-Barra. 2007. Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et. Cham. *Madera y Bosques* 13(1): 25-34.
- Domínguez-Cabrera, G., O. Aguirre-Calderón, J. Jiménez-Pérez, R. Rodríguez-Laguna y J. A. Díaz-Balderas. 2009. Biomasa aérea y factores de expansión de especies arbóreas en bosques del sur de Nuevo León. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 15 (1): 59-64.
- Ferry, S. F., C. Bernard, F. C. Breman, M. Vaan Beek, A. Salim y D. Douglas. 2008. Wood density as a conservation tool: quantification of disturbance and identification on conservation-priority areas in tropical forests. *Conservation Biology* 22: 1299-1308.

- Flores-Nieves, P., M. A. López-López, G. Ángeles-Pérez, M. L. Isla-Serrano y G. Calva-Vásquez. 2011. Modelos para estimación y distribución de biomasa de *Abies religiosa* (Kunth) Schlttdl. et Cham. en proceso de declinación. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 2(8): 9-20.
- Flores-Velázquez, R., J. V. Rangel-Piñón, J. Quintanar-Olguin, M. E. Fuentes-López y L. Vázquez-Silva. 2007. Calidad de maquinado de la madera de *Quercus affinis* y *Quercus laurina*. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 13(1): 41-46.
- Flores-Velázquez, R., M. E. Fuentes-López, J. Quintanar-Olguín y J. C. Tamarit-Urías. 2013. Maquinado de cuatro especies maderables de encino de la Sierra de Juárez, Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 4(16): 22-33.
- Fonseca, G. W., F. G. Alice y J. M. Rey. 2009. Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica. *Bosque* 30(1): 36-47.
- García, E. 1987. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). Instituto de Geografía, UNAM. México. 217 p.
- Garzuglia, M. y M. Saket. 2003. Wood volume and woody biomass: review of FRA 2000 estimates. *Forest Resources Assessment WP 68*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy. 30 p.
- Gómez-Díaz, J. D., J. D. Etchevers-Barra, A. I. Monterroso-Rivas, J. Campo-Alvez, J. A. Tinoco-Rueda. 2011. Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Quercus magnoliaefolia*. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 17(2): 261-272.
- Gómez-García, E., Crecente-Campo, F., y U. Diéguez-Aranda. 2013. Tarifas de biomasa aérea para abedul (*Betula pubescens* Ehrh.) y roble (*Quercus robur* L.) en el noroeste de España. *Madera y Bosques* 19(1): 71-91.
- Kauffman, J. B., R. F. Hughes y C. Heider. 2009. Carbon pool and biomass dynamics associated with deforestation, land use, and agriculture abandonment in the neotropics. *Ecological Applications* 19: 1211-1222.

- Litton, C. M y J. B. Kauffman. 2008. Allometric models for predicting above-ground biomass in two widespread woody plants in Hawaii. *Biotropica* 40: 313-320.
- Manzano-Méndez, F., J. I. Valdez-Hernández, M. A. López-López y H. Vaquera-Huerta. 2010. Crecimiento en diámetro de *Zanthoxylum kellermanii* P. Wilson en una selva perennifolia del norte de Oaxaca, México. *Madera y Bosques* 16(2): 19-33.
- Méndez-González, J., S. L. Luckie-Navarrete, M. A. Capó-Arteaga y J. A. Nájera-Luna. 2011. Ecuaciones alométricas y estimación de incrementos en biomasa aérea y carbono en una plantación mixta de *Pinus devoniana* Lindl. y *P. pseudostrobus* Lindl., en Guanajuato, México. *Agrociencia* 45: 479-491.
- Merlin-Bermúdez, E. y J. J. Navar-Cháidez. 2005. Desarrollo de un modelo de incremento y rendimiento para *Quercus sideroxila* en bosques mixtos de Durango México. *Agrofaz* 5(2): 875-882.
- Muñoz, R. C., J. C. Cancino y M. B. Espinosa. 2005. Análisis de biomasa del vuelo de un rodal adulto de *Pinus radiata*. *Bosque* 26(3): 33-44.
- Navar, J. 2009. Allometric equations for tree species and carbon stocks for forests of northwestern Mexico. *Forest Ecology and Management* 257: 427-434.
- Navar, J., N. González, D. Maldonado, J. Graciano, V. Dale y B. Parresol. 2004. Biomass equations for pine species of forest plantations of Durango, México. *Madera y Bosques* 10: 17-28.
- Návar-Cháidez, J. D. J. 2010. Biomass allometry for tree species of northwestern Mexico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 12(3): 507-519
- Pérez-Olvera, C. y R. Dávalos-Sotelo. 2008. Algunas características anatómicas y tecnológicas de la madera de 24 especies de *Quercus* (encinos) de México. *Madera y Bosque* 14(3): 43-80.
- Rainforest Alliance. 2006. Resumen Público de Certificación de la Comunidad de Ixtlán de Juárez Oaxaca. Consejo de Manejo Forestal y de SmartWood. New York USA. 34 p.
- Rodríguez-Laguna, R., J. Jiménez-Pérez, O. Aguirre-Calderón y E. Jurado-Ibarra. 2007. Ecuaciones alométricas para estimar biomasa aérea en especies de encino y pino en Iturbide, N. L. *Ciencia Forestal en México* 32(101): 39-56.

- Rodríguez-Laguna, R., J. Jiménez-Pérez, O. Aguirre-Calderón, E. J. Treviño-Garza y R. Razo-Zárate. 2009. Estimación de carbono almacenado en el bosque de pino-encino en la Reserva de la Biósfera el Cielo, Tamaulipas, México. *Ra Ximhai* 5(3): 317-327.
- Rodríguez-Ortíz, G., H. M. De los Santos-Posadas, V. A. González Hernández, A. Aldrete, A. Gómez-Guerrero y A. M. Fierros-González. 2012. Modelos de biomasa aérea y foliar en una plantación de rápido crecimiento en Oaxaca. *Madera y Bosques* 18(1): 25-41.
- Rojas-García, F. y L. Villers-Ruiz. 2008. Estimación de la biomasa forestal del Parque Nacional Malinche Tlaxcala-Puebla. *Ciencia Forestal en México* 33(104): 59-86.
- Rojo-Martínez, G. E., J. Jasso-Mata, J. J. Vargas-Hernández, D. J. Palma-López y A. Velázquez-Martínez. 2005. Biomasa aérea en plantaciones comerciales de hule (*Hevea brasiliensis* Müll. Arg.) en el estado de Oaxaca, México. *Agrociencia* 39: 449-456.
- Rubio-Licon, L. E., S. Romero Rangel y C. Rojas-Zenteno. 2011. Estructura y composición florística de dos comunidades con presencia de *Quercus* (Fagaceae) en el Estado de México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 17(1): 77-90.
- SAS Institute. 1996. SAS/STAT User's guide. SAS Institute, Inc., Raleigh, NC.
- Silva-Arredondo, F. M. y J. Navar-Cháidez. 2010. Factores de expansión de biomasa en comunidades forestales templadas del norte de Durango, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 1(1): 55-62.
- Suchomel, C., P. Pyttel, G. Becker y J. Bauhus. 2012. Biomass equations for sessile oak (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) and hornbeam (*Carpinus betulus* L.) in aged coppiced forests in southwest Germany. *Biomass and Bioenergy* 46:722-730.
- Valencia, A. S. 2004. Diversidad del género *Quercus* (Fagaceae) en México. *Boletín de la sociedad Botánica de México* 75: 33-53.

- Vásquez, A. y H. Arellano. 2012. Estructura, Biomasa aérea y carbono almacenado en los bosques del Sur y Noroccidente de Córdoba. arXiv:1208.0248. Disponible en <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1208/1208.0248.pdf>
- Walker, J. C. F. 2010. Primary Wood processing Principles and practice. Springer. Netherlands. 596 p.
- Wang, C. 2006. Biomass allometric equations for 10 co-occurring tree species in Chinese temperate forests. Forest Ecology and Management 222: 9-16.

## CAPÍTULO IV

### ESTRUCTURA ANATÓMICA DE LA MADERA DE DOS ENCINOS DE OAXACA<sup>3</sup>

#### 4.1. RESUMEN

México es un centro de distribución para las especies del género *Quercus*, con 161 especies registradas, de las que 60 presentan características favorables para el aprovechamiento maderable. Aquí se describen las características anatómicas de la madera de *Quercus laurina* y *Q. crassifolia*, y se correlacionan con su densidad básica, contracción volumétrica y dureza. La madera de *Q. laurina* presentó brillo alto y vetado medio, mientras que en *Q. crassifolia* fueron medio y pronunciado, respectivamente. Ambas especies presentan porosidad anular, poros solitarios de forma oval, radios uniseriados, multiseriados y agregados, parénquima apotraqueal difuso en agregados, y fibras libriformes y fibrotraqueidas. En *Q. laurina* se determinó una correlación entre el espesor de pared de las fibras y la densidad básica ( $r = 0.97$ ), y entre el diámetro de lumen de las fibras y la contracción volumétrica ( $r > 0.99$ ). En *Q. crassifolia*, las correlaciones más altas se dieron entre la contracción volumétrica y el espesor de pared de las fibras ( $r = 0.97$ ), y con el diámetro de las fibras ( $r = 0.93$ ). En los dos encinos, la contracción volumétrica alta y la presencia de radios muy anchos, indican una mayor propensión de la madera a presentar grietas y rajaduras durante el proceso de secado.

**Palabras claves:** *Quercus laurina*, *Quercus crassifolia*, densidad básica, contracción volumétrica, dureza.

#### 4.2. ABSTRACT

Mexico is a distribution center for the genus *Quercus*, with 161 species recorded; some 60 of these have favorable characteristics for lumber usage. Herein, we describe the anatomical characteristics of *Quercus crassifolia* and *Q. laurina* wood, and these characteristics are correlated with wood basic density, volumetric

---

<sup>3</sup> Artículo en revisión en la Revista Madera y Bosques. Se presentaron avances en II Congreso Internacional Ciencias Agronómicas, 2014.

shrinkage, and hardness. *Quercus laurina* wood displayed high brightness and medium grain, while in *Q. crassifolia* these were medium and coarse, respectively. Wood from both species was ring-porous, with solitary oval pores; parenchyma was apotracheal diffuse-in-aggregates, and there were uniseriate, multiseriate and aggregate rays, as well as libriform fibers and fibrotracheids. In *Q. laurina*, strong correlations were found between the fiber wall thickness and basic density ( $r = 0.97$ ), and between the lumen diameter and volumetric shrinkage ( $r > 0.99$ ); while in *Q. crassifolia* the strongest correlations were between the volumetric shrinkage and both the fiber wall thickness ( $r = 0.97$ ), and the fiber diameter ( $r = 0.93$ ). In both oaks, a high volumetric shrinkage and the presence of very broad rays, indicate a high propensity of wood to develop cracks and splits upon drying.

**Keyword:** *Quercus laurina*, *Quercus crassifolia*, basic density, volumetric shrinkage, hardness.

### 4.3. INTRODUCCIÓN

La familia Fagaceae comprende 8-10 géneros, y más de 900 especies (Kremer *et al.*, 2012), donde el género *Quercus* presenta la mayor diversidad en la familia, con cerca de 400 especies (Aldrich y Cavender, 2011). En el continente Americano se estiman 250 especies de encino (Oh y Manos, 2008), de las que 161 se han registrado en México (Valencia, 2004). La mayoría de los encinos en México se encuentran en zonas montañosas con clima templado o templado subhúmedo, y más del 95% de las especies se encuentran entre los 1200 y 2800 msnm (Rzedowski, 1978); la mayor riqueza de especies de *Quercus* se concentra en las montañas del sur (Nixon, 1993).

El predio comunal de Ixtlán de Juárez, Oaxaca, comprende 193.1 km<sup>2</sup>, de los que 64.2% son de bosque templado, y donde *Quercus laurina* Humb. & Bonpl. y *Q. crassifolia* Humb. & Bonpl. cohabitan con *Arbutus xalapensis* Kunth, *Alnus acuminata arguta* (Schltdl.) Furlow y *Prunus serotina* Ehrn., entre otras latifoliadas, y con *Pinus* spp. (Aquino *et al.*, 2012; Ruiz-Aquino *et al.* 2014a). En este bosque, coexisten 416

árboles ha<sup>-1</sup> de *Q. laurina* y 419 árboles ha<sup>-1</sup> de *Q. crassifolia*; en su mayoría con fustes rectos, limpios y cilíndricos (Ruiz-Aquino *et al.*, 2014b).

*Quercus laurina* (subgénero *Erytrobalanus*), es un árbol de 10 a 25 m de alto, tiene hojas deciduas, anchamente lanceoladas u oblanceoladas, de 7 a 10 cm de largo por 2.5 a 3 cm de ancho; su fruto es una bellota ovoide de 12 mm de largo (De la Paz *et al.*, 2006). Se distribuye a lo largo de la Sierra Madre Occidental, de la Sierra Madre del Sur y por la región occidental del cinturón volcánico, entre los 2000-2440 y 3065-3300 msnm (González *et al.*, 2004; De la Paz y Dávalos, 2008). La madera de *Q. laurina* presenta grandes posibilidades de ser utilizada industrialmente, debido a su buen desempeño en el maquinado (Flores *et al.*, 2007; Flores *et al.*, 2013). Los árboles de *Q. crassifolia* (subgénero *Erytrobalanus*) alcanzan alturas de hasta 23 m, tienen hojas coriáceas, ovadas, obovadas o elípticas, de 7 a 17.5 cm de largo por 4.1 a 11.5 cm de ancho; su fruto es bianual, con cúpulas hemisféricas de 6 a 10 mm de largo (Valencia *et al.*, 2002). Se distribuye en la Sierra Madre Occidental al NO de México, la Sierra Madre del Sur, y a lo largo del Eje Neovolcánico (Tovar y Oyama, 2004), de 600 a 2850 msnm (Coombes, 2012). Por la respuesta de su madera en operaciones de maquinado, puede emplearse en la elaboración de molduras, lambrines, muebles y parquet (De la Paz y Dávalos 2008; Flores *et al.*, 2013).

Los objetivos del presente estudio fueron determinar las características anatómicas de la madera de *Q. laurina* y *Q. crassifolia* proveniente de Ixtlán de Juárez, e identificar las diferencias entre las dos especies. También se evaluó la influencia de la estructura anatómica en la densidad, la contracción volumétrica, y la dureza de la madera.

#### **4.4. MATERIALES Y MÉTODOS**

##### **4.4.1. Área de estudio y selección de los árboles**

Se utilizaron árboles provenientes de dos rodales con dominancia de especies del género *Quercus* en el bosque templado de Ixtlán de Juárez, Oaxaca. El primer rodal, con dominancia de *Q. laurina*, a 17°21'22" LN y 96°27'42" LO, a una altitud de 2707 msnm. El segundo rodal, con dominancia de *Q. crassifolia*, a 17°21'08" LN y 96°27'31" LO, a una altitud 2631 msnm. Se seleccionaron tres árboles para cada

especie, sanos y representativos, con un diámetro normal entre 30 y 40 cm, y de 20 a 25 m altura. El derribo de los árboles y el troceo se hizo de acuerdo a Ramos y Díaz (1981), tomando para el estudio microscópico una rodaja de 5 cm de espesor a la altura de 1.30 m, y para la caracterización macroscópica, la siguiente rodaja, de 30 cm de espesor. El depósito e identificación de los especímenes se realizó en el herbario de la Universidad de la Sierra Juárez, Oaxaca.

#### **4.4.2. Caracterización macroscópica**

La descripción macroscópica se hizo con tablillas de 1x7x15 cm, orientadas en los tres planos (De la Paz y Dávalos, 2008), utilizando la clasificaciones de Tortorelli (1956) para textura, porosidad y vetado, y de Ortega *et al.* (1988) para el brillo, olor y sabor; para la descripción del color, se usaron las tablas Munsell (1990).

#### **4.4.3. Caracterización microscópica**

De la rodaja para el estudio microscópico se cortaron cubos de 2 cm por lado (10 cubos de albura y 10 de duramen), los que se ablandaron saturándolos y luego calándolos en agua hirviendo por 10 min. Se cortaron secciones de 20  $\mu\text{m}$  en los tres planos con un xilotomo SM2000R (Leica, Alemania), y se tiñeron con Pardo de Bismarck al 1 % por 6 h. Luego se deshidrataron en una serie de alcoholes, y finalmente se aclararon en xilol por 2 min; las secciones se montaron con resina sintética (Sandoval, 2005). Para obtener el material disociado, se cortaron astillas y se digirieron en la solución de Franklin (1946) a 60°C por 24 h. Luego se enjuagaron, y se tiñeron con Pardo de Bismarck, para hacer preparaciones temporales. Las mediciones se realizaron en un microscopio de luz DM 500, con cámara integrada ICC50 (Leica, Alemania). Los vasos se clasificaron en vasos con diámetro ancho ( $> 150 \mu\text{m}$ ) y vasos con diámetro angosto ( $\leq 150 \mu\text{m}$ ) (Chávez *et al.*, 2010). Se midió el diámetro mayor de los vasos en el corte transversal ( $n=600$  por especie), y la longitud de elementos de vaso en el material disociado ( $n=90$  por especie); las mediciones se realizaron de acuerdo al IAWA (1989). También se realizaron 120 mediciones por especie de la longitud y ancho de las fibras, del diámetro de lumen y el espesor de pared de las fibras, del alto y ancho de los rayos uniseriados, del ancho y número de series en rayos multiseriados, y del número de vasos por  $\text{mm}^2$ . Los elementos

mensurables se clasificaron con base en la media de acuerdo a la clasificación de Chattaway (1932), IAWA (1939) y Tortorelli (1956).

Para el estudio al microscopio electrónico de barrido, se cortaron cubos de madera de 5 mm por lado, se deshidrataron en una serie etanólica creciente, y se recubrieron con oro. Se utilizó un microscopio JSM-6390 (JEOL Ltd., Japón), operando a 15 kV.

#### **4.4.4. Propiedades físicas**

Con el objetivo de establecer la influencia de las estructuras anatómicas sobre las propiedades físicas, se utilizaron probetas de una mezcla de albura y duramen para determinar la densidad básica (Db) (n=36 por especie), la contracción volumétrica (CV, n=36), y la dureza (n=24), siguiendo la norma ASTM D 1433-94 (ASTM, 2007).

#### **4.4.5. Análisis estadístico**

Para determinar diferencias entre los elementos celulares de las especies estudiadas, se realizó un análisis de varianza, seguido de un análisis de comparación de medias (Tukey,  $\alpha=0.05$ ). Para determinar la relación de los elementos celulares con la densidad básica, la contracción volumétrica y la dureza de la madera, se calculó el coeficiente de correlación de Pearson (r). Los análisis estadísticos se realizaron usando el paquete estadístico SAS (SAS Institute, 1989).

### **4.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **4.5.1. Caracterización macroscópica**

En general, el duramen fue más oscuro que la albura, aunque no se observó una diferencia muy marcada entre el color de la albura y del duramen en las dos especies. La madera de *Q. laurina* fue más clara que la de *Q. crassifolia*, tanto en albura como en duramen (Cuadro 4.1). El sabor amargo de la madera es una característica común en las dos especies, resultado de la cantidad de extractivos presentes como taninos y polifenoles. Honorato y Hernández (1998) cuantificaron los taninos de la madera de *Q. laurina* y de *Q. crassifolia*, 1,17 % y 1,52% en el mismo

orden, sin encontrar diferencias estadísticas entre las dos especies. La porosidad anular de las dos especies es similar a la reportada por De la Paz y Dávalos (2008), y tiene influencia sobre el vetado de la madera. Las características anatómicas macroscópicas se presentan en la Cuadro 4.1.

Cuadro 4.1. Características anatómicas macroscópicas de la madera de *Q. laurina* y *Q. crassifolia*.

Característica	Descripción		
	<i>Q. laurina</i>	<i>Q. crassifolia</i>	
Color	Albura	Blanco 10YR 8/2	Castaño muy pálido 10YR 8/4
	Duramen	Gris claro 10YR 7/2	Gris rosáceo 7.5 YR 6/2
Olor	No característico		
Sabor	Amargo		
Brillo	Alto		
Vetado	Medio		
Textura	Gruesa		
Porosidad	Anular		

## 4.5.2. Caracterización microscópica

### 4.5.2.1. Radios

Una de las características anatómicas más notable de la madera de encino es la presencia de radios multiseriados. Las especies que aquí se describen presentan radios uniseriados, multiseriados y agregados. Las dimensiones y el número de células de los radios se consignan en la Cuadro 4.2.

En las dos especies, los radios leñosos son homogéneos (Fig. 4.1A, 4.1B), formados por células procumbentes (Fig. 4.1C, 4.1D), lo que coincide con De la Paz *et al.* (2006) y De la Paz y Dávalos (2008).

Cuadro 4.2. Dimensiones y número de células de radios de la madera de *Q. laurina* y *Q. crassifolia*.

Dimensiones	<i>Q. laurina</i>				<i>Q. crassifolia</i>			
	Árbol			Media (DE)	Árbol			Media (DE)
	1	2	3		1	2	3	
Radios uniseriados albura								
Altura (µm)	420.2	349.8	414.1	394.7 (68)	357.4	387.8	381.3	375.5 (78)
Ancho (µm)	12.3	15.6	14.1	14.0 (3.7)	16.6	15.3	16.7	16.2 (3.4)
No. células	20.5	17.1	18.7	18.7 (3.7)	14.4	19.4	16.7	16.8 (4.6)
Radios uniseriados duramen								
Altura (µm)	354.1	412.1	375.9	380.7 (82)	369.8	385.2	367.5	374.2 (75)
Ancho (µm)	16.1	16.4	15.5	16.0 (4.1)	21.4	15.3	16.8	17.8 (5.3)
No. células	16.0	19.2	17.3	17.5 (4.3)	16.7	18.3	16.2	17.1 (3.5)
Radios multiseriados albura								
Ancho (µm)	434.0	309.6	280.7	341.5 (90)	464.0	363.7	438.3	422.0 (121)
No. series	30.9	24.6	21.8	25.7 (5.6)	28.2	21.9	25.1	25.0 (6.1)
Radios multiseriados duramen								
Ancho (µm)	493.5	288.5	323.4	368.4 (120)	384.4	409.2	643.0	478.9 (170)
No. series	34.9	22.5	25.0	27.4 (7.5)	23.8	24.2	31.7	26.6 (7.0)

DE: desviación estándar

Los radios uniseriados en la madera de albura de *Q. laurina* son 3,5% más altos que los de *Q. crassifolia*; sin embargo, no se encontraron diferencias significativas en la altura de los radios entre albura-albura, duramen-duramen y albura-duramen de ambas especies. Según la clasificación de Chattaway (1932), los radios uniseriados se clasifican como extremadamente bajos; respecto al ancho, los radios uniseriados se clasifican de extremadamente finos a muy finos (IAWA, 1939). Se encontraron diferencias estadísticas significativas entre albura y duramen de *Q. laurina* ( $p = 0.006$ ), albura y duramen de *Q. crassifolia* ( $p = 0.046$ ), y en albura-albura ( $p = 0.001$ ) y en duramen-duramen ( $p = 0.038$ ) de las dos especies. Las medias reportadas en el presente estudio para *Q. laurina*, en los radios uniseriados (número de células) y en los radios multiseriados (número de series), fueron mayores a los reportados para la misma especie por De la Paz y Dávalos (2008), 11 células y 21 series. Para *Q. crassifolia*, De la Paz et al. (2005) encontraron radios multiseriados muy anchos (387 µm, 20 series), valores menores a los que se reportan en este estudio.

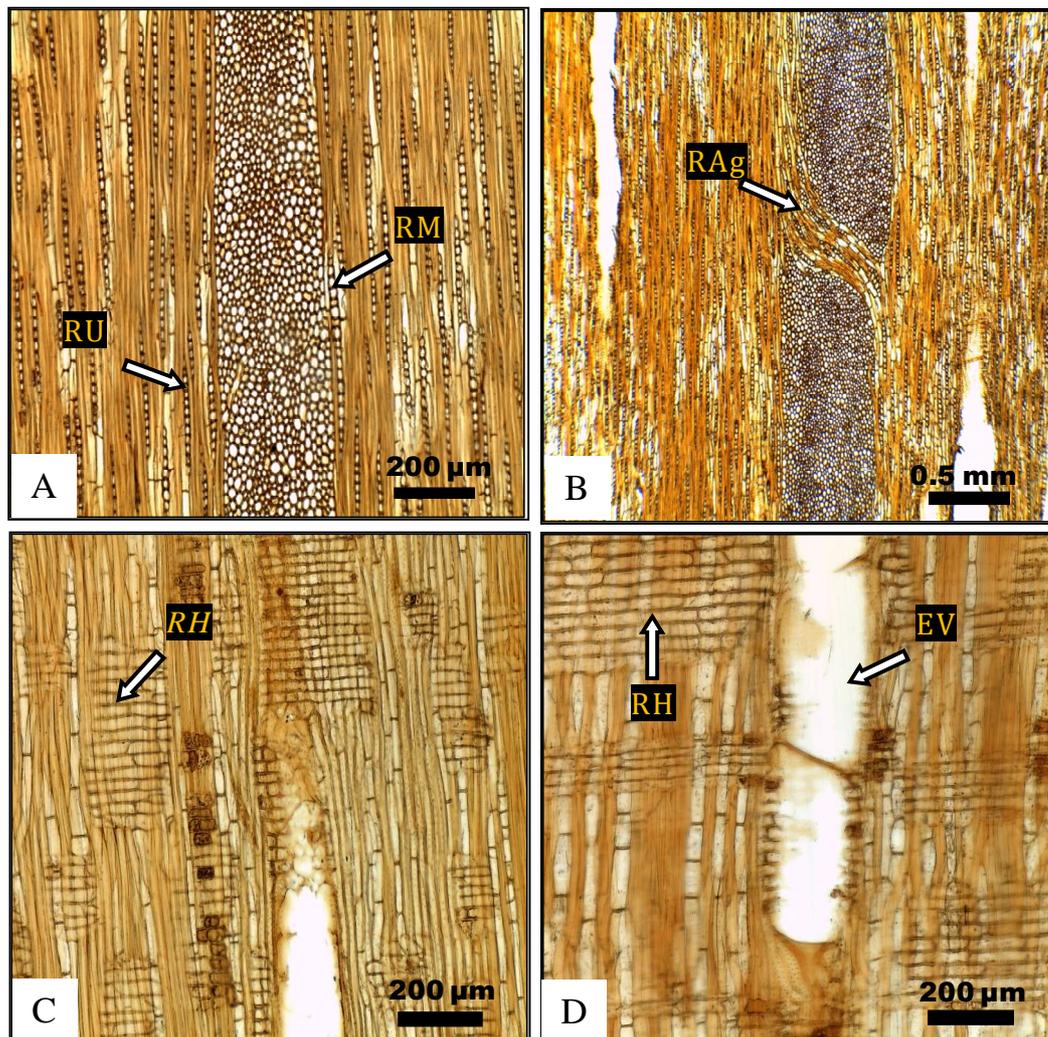


Figura 4.1. A) *Q. laurina* (10x), RU = radio uniseriado; RM = radio multiseriado. B) *Q. crassifolia* (4x); RAg = radio agregado. C) *Q. laurina* (10x), RH = radio homogéneo. D) *Q. crassifolia* (10x), EV = elemento del vaso.

Las dimensiones de los radios son de las variables anatómicas que más influencia tienen en el proceso de secado, debido a que presentan una pared celular primaria flexible, poco engrosada y constituyen puntos débiles en la madera por la ausencia de la pared secundaria (Metcalf y Chalk, 1985). En conjunción con su densidad alta, acentúan las contracciones altas en la madera, ocasionando problemas en su industrialización. Por otra parte, los rayos visibles a simple vista, son un carácter anatómico valioso de la figura de la madera de encino, apreciado en la fabricación de pisos, muebles y chapas.

#### 4.5.2.2. Vasos y parénquima axial

Con respecto a su longitud, los elementos de vaso se clasifican como medianos en ambas especies (Chattaway, 1932). En el plano transversal, los vasos presentan poros con diámetro tangencial de moderadamente pequeños a moderadamente grandes (IAWA, 1939). En la albura de ambas especies, los poros por mm<sup>2</sup> son escasos y en el duramen moderadamente escasos (Chattaway, 1932). La consideración del diámetro y la cantidad por mm<sup>2</sup> de los poros es importante en las operaciones de acabado y pegado, ya que a mayor número por mm<sup>2</sup>, es más difícil darle un buen acabado a la madera, y la adhesión de las superficies es menor; también tiene relevancia en los procesos de impregnación de la madera, pues la presencia de vasos numerosos es deseable para facilitar el movimiento y la distribución uniforme de los preservadores (Honorato, 2002). Las dimensiones de los vasos se presentan en la Cuadro 4.3.

Cuadro 4.3. Dimensiones de los vasos de la madera de *Q. laurina* y *Q. crassifolia*.

Dimensiones	<i>Q. laurina</i>				<i>Q. crassifolia</i>			
	Árbol			Media (DE)	Árbol			Media (DE)
	1	2	3		1	2	3	
Albura								
D (> 150 μm)	205.0	282.8	286.7	258.2 (52.4)	276.7	262.8	250.4	263.3 (40.9)
D (≤150 μm)	95.8	100.6	109.3	101.9 (21.6)	135.5	117.1	113.8	122.1 (22.6)
Longitud (μm)	426.0	427.2	487.0	446.7 (87.6)	419.2	524.7	496.2	480.0 (109)
Número/mm <sup>2</sup>	5.2	4.4	4.8	4.8 (1.6)	4.9	4.2	5.2	4.8 (1.3)
Duramen								
D (> 150 μm)	201.5	258.7	257.0	239.1 (45.6)	241.4	255.5	216.3	237.7 (35.9)
D (≤150 μm)	100.0	97.6	98.6	98.7 (19.5)	112.7	119.1	120.0	117.3 (18.6)
Longitud (μm)	420.9	440.8	417.5	426.4 (86.7)	447.8	481.5	455.0	461.5 (86.6)
Número/mm <sup>2</sup>	4.6	5.3	5.2	5.2 (2.6)	5.6	5.0	5.9	5.5 (1.6)

DE = desviación estándar; D = diámetro (μm)

La madera de *Q. laurina* presentó porosidad anular (Fig. 4.2A), similar a la reportada para esta especie por De la Paz y Quintanar (2001) y De la Paz y Dávalos (2008), pero diferente a la porosidad semianular reportada por Aguilar y Castro (2006) y De la Paz *et al.* (2006). Los poros son de contorno oval y circular, solitarios y arreglados en hileras radiales, presentan tílides en la madera de duramen (Fig. 4.2B).

Los elementos de vaso (Fig. 4.2C) presentan placas perforadas simples y puntuaciones areoladas alternas de forma oval (Fig. 4.2D), y no presentan engrosamiento de la pared celular. El parénquima axial es apotraqueal difuso en agregados.

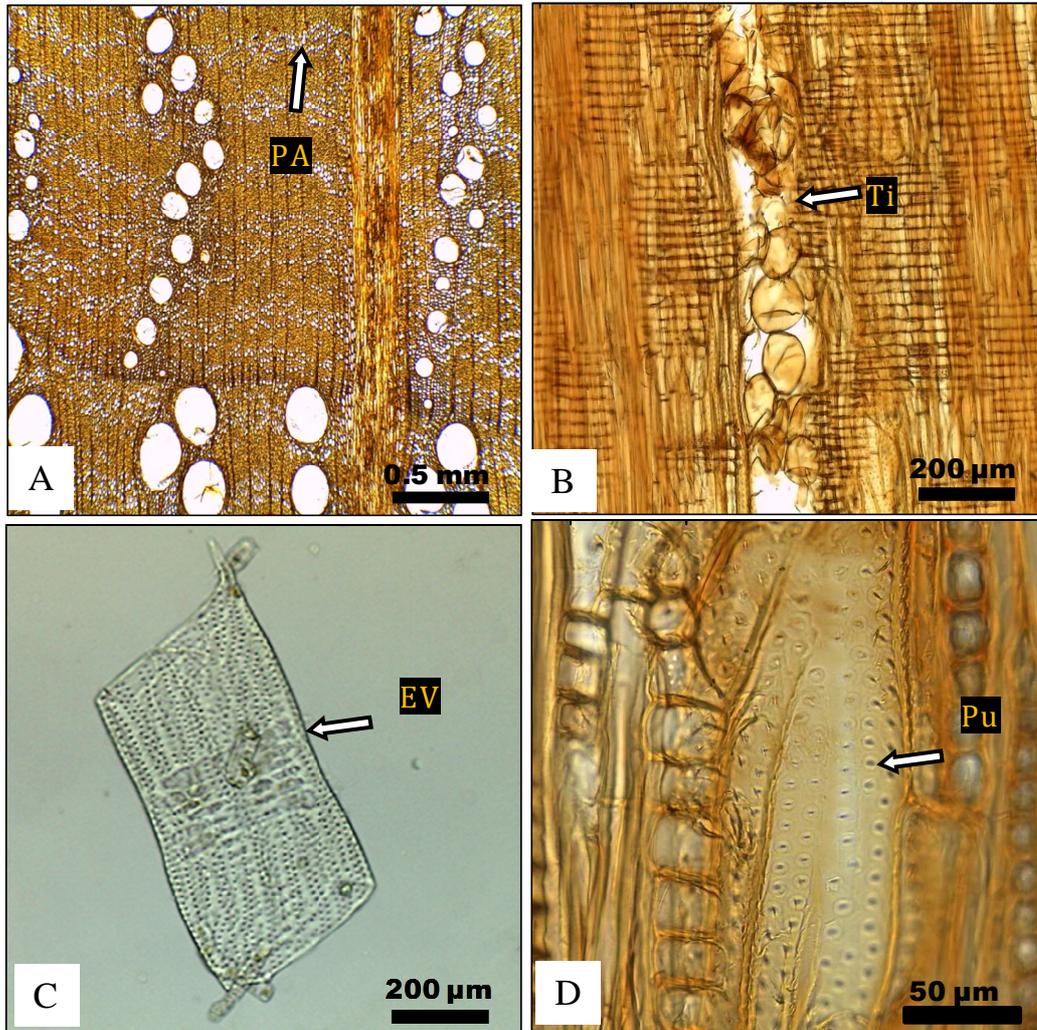


Figura 4.2. *Q. laurina* A) porosidad anular (4x), PA = parénquima apotraqueal difuso. B) Ti = tílides (10x). C) EV = elemento de vaso en material disociado (10x). D) Pu = puntuaciones areoladas en elemento de vaso (40x).

La madera de *Q. crassifolia*, presentó porosidad anular (Fig. 4.3A), lo que coincide con lo reportado para la misma especie por De la Paz y Dávalos (2008) y De la Paz y Quintanar (2001).

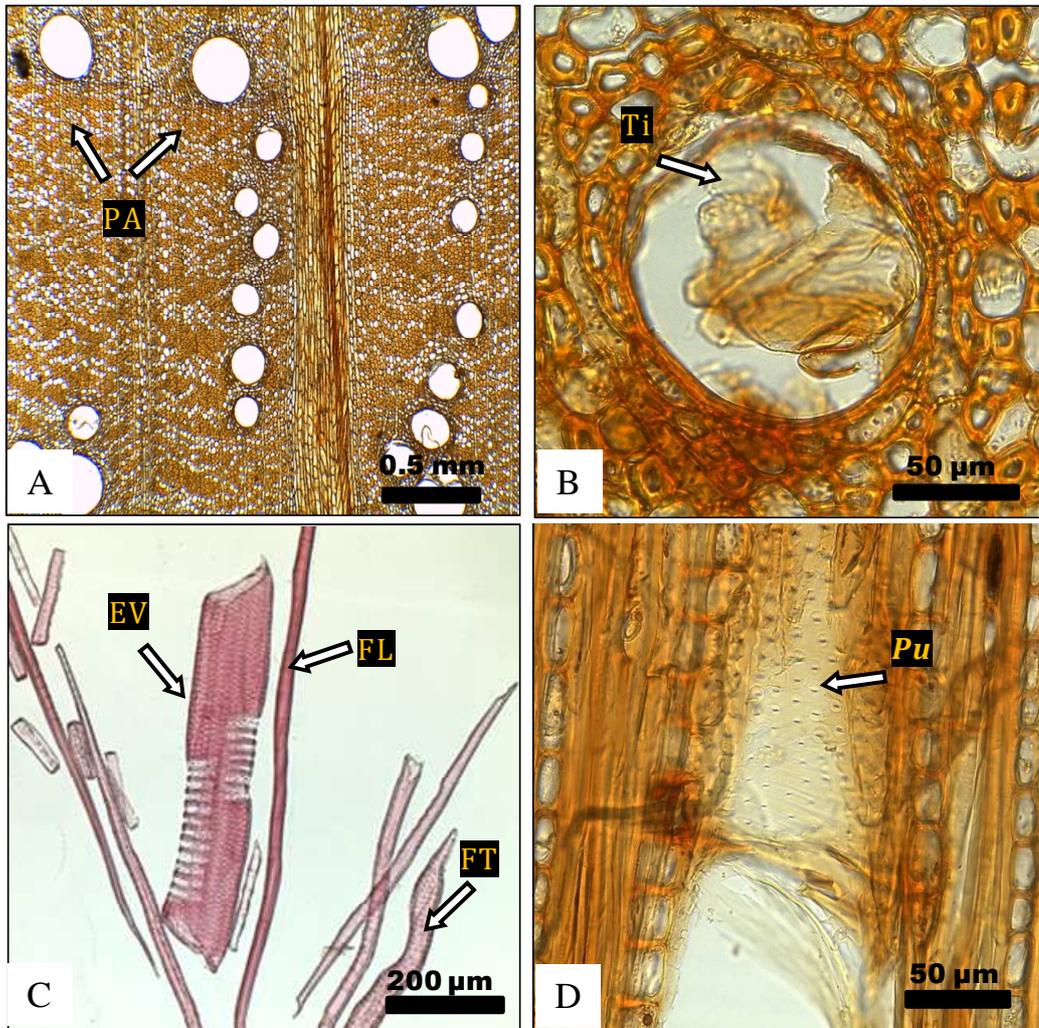


Figura 4.3. *Q. crassifolia* A) porosidad anular (4x); PA = parénquima apotraqueal difuso. B) Ti = tílido (40x). C) EV = elemento de vaso; FT = fibrotraqueida; FL = fibra libriforme. D) Pu = puntuaciones areoladas en elemento de vaso.

La porosidad anular mejora las características estéticas de la madera, haciendo el vetado más atractivo. Los poros son de contorno oval y circular, solitarios y

arreglados en hileras radiales, y presentan tñlides en la madera de duramen (Fig. 4.3B, Fig. 4.4A). Los elementos de vaso presentan placas perforadas simples (Fig. 4.4B), y puntuaciones areoladas alternas de forma oval (Fig. 4.3D), con ausencia de engrosamientos de la pared celular. El parénquima axial es apotraqueal difuso en agregados. Se encontraron diferencias estadísticas entre las especies estudiadas en el número de poros por mm<sup>2</sup> en madera de duramen ( $p = 0.007$ ), y en el diámetro de poros menores a 150  $\mu\text{m}$  en albura y duramen ( $p < 0.001$ ).

#### **4.5.2.3. Fibras y fibrotraqueidas**

Las dimensiones de las fibras y las características de los radios multiseriados, son las variables que más influencia tienen en las propiedades físicas y mecánicas de la madera, y para establecer la factibilidad de utilizar la madera en la producción de pulpa, papel, y tableros de fibras. Las dos especies presentan fibras de tipo libriforme y fibrotraqueidas, y en *Q. crassifolia* se identificaron fibras septadas aisladas (Fig. 4.4D). Con relación a la clasificación de IAWA (1937), las fibras de albura de ambas especies se clasifican como moderadamente largas, mientras que las de duramen como fibras medianas (Cuadro 4.4). Con base en el diámetro, las fibras de albura se clasifican como medianas y las de duramen como finas; con referencia al espesor de la pared, *Q. crassifolia* presentó fibras de pared gruesa en albura y duramen, mientras para *Q. laurina* la pared es gruesa en albura y muy gruesa en duramen (Tortorelli, 1956).

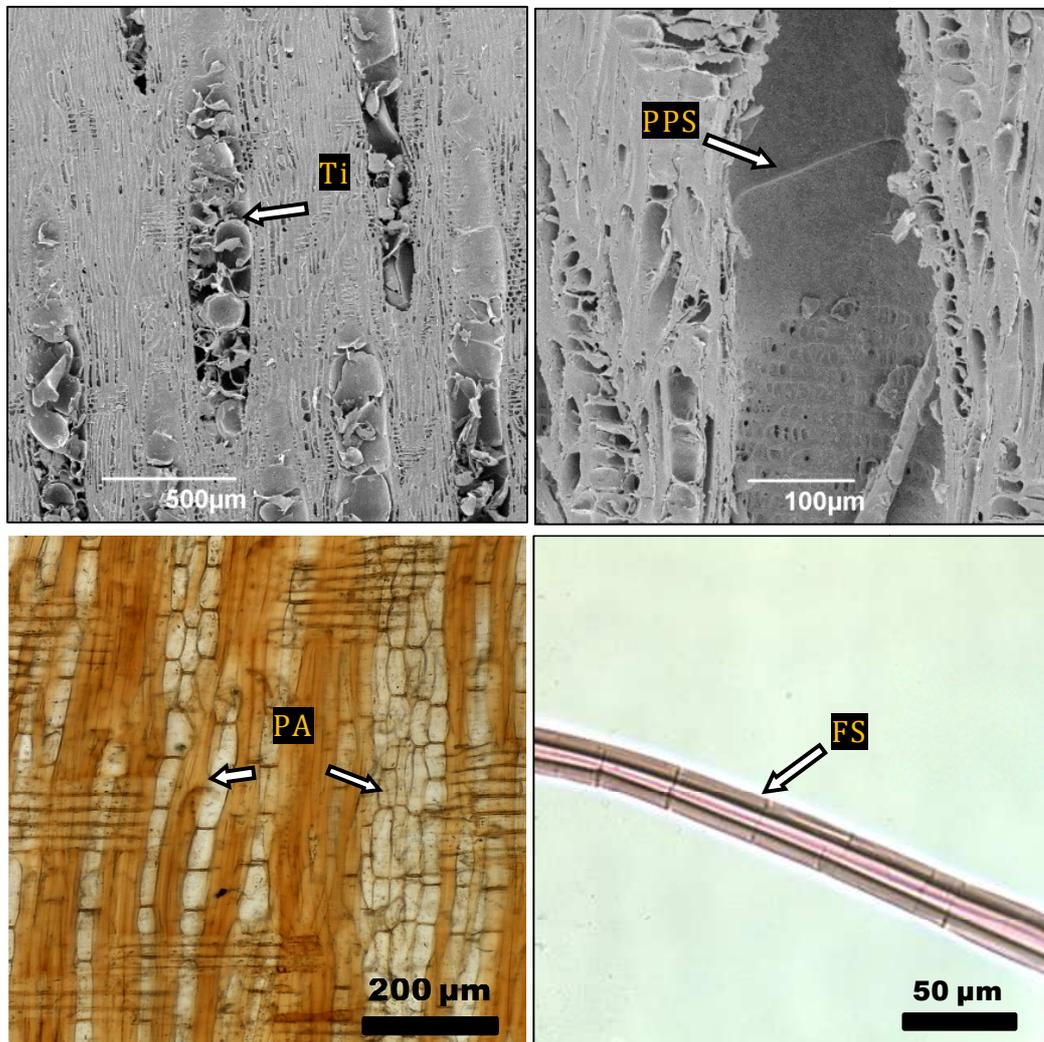


Figura 4.4. *Q. crassifolia*. Microscopio electrónico de barrido: A) Ti = tálides en elemento de vaso, corte radial. B) PPS = placa perforada simple. Microscopio de luz: C) PA = parénquima, corte radial. D) Fibra septada (FS) (40x).

Se encontraron diferencias significativas entre la longitud ( $p < 0.001$ ), el diámetro ( $p = 0.002$ ), y el espesor de pared ( $p < 0.001$ ) de fibras de albura y duramen de *Q. laurina*, y también entre la longitud ( $p < 0.001$ ) y el diámetro ( $p < 0.001$ ) de fibras de albura y duramen de *Q. crassifolia*. No se encontraron diferencias estadísticas significativas en los tres parámetros al comparar las fibras de albura-albura y duramen-duramen de las dos especies ( $p > 0.05$ ).

Cuadro 4.4. Dimensiones de las fibras de la madera de *Q. laurina* y *Q. crassifolia*.

Dimensiones	<i>Q. laurina</i>				<i>Q. crassifolia</i>			
	Árbol			Media (DE)	Árbol			Media (DE)
	1	2	3		1	2	3	
Albura								
Longitud (mm)	1.9	1.7	1.8	1.8 (0.2)	1.7	1.9	2.0	1.9 (0.2)
Diámetro (µm)	22.6	28.3	27.1	26.0 (5.8)	26.2	26.0	28.1	26.7 (4.1)
DL (µm)	7.7	10.4	9.4	9.2 (3.5)	9.8	12.7	9.9	10.8 (11)
EP (µm)	7.5	9.0	8.8	8.4 (1.9)	8.2	6.6	9.1	8.0 (5.5)
Duramen								
Longitud (mm)	1.5	1.7	1.7	1.6 (0.2)	1.6	1.7	1.6	1.6 (0.1)
Diámetro (µm)	24.7	22.0	22.7	23.1 (3.9)	23.1	23.5	22.8	23.1 (4.3)
DL (µm)	10.2	7.6	8.7	8.8 (2.5)	8.4	7.4	8.0	7.9 (2.0)
EP (µm)	7.3	7.2	7.0	7.1 (1.3)	7.4	8.1	7.4	7.6 (1.8)

DL = diámetro del lumen; EP = espesor de pared (µm)

#### 4.5.3. Propiedades físicas

La densidad básica (Db) de la madera de *Q. laurina* fue de  $0.693 \text{ g cm}^{-3}$ , superior a los  $0.600 \text{ g cm}^{-3}$  reportados por Honorato y Fuentes (2001) para la misma especie, y a los  $0.652 \text{ g cm}^{-3}$  de De la Paz y Dávalos (2008). En *Q. crassifolia*, la Db fue de  $0.666 \text{ g cm}^{-3}$ , similar a los  $0.687 \text{ g cm}^{-3}$  reportados por De la Paz y Dávalos (2008) (Cuadro 4.5). Las diferencias en la densidad de la madera ocurren por cambios en la proporción de los elementos constitutivos del xilema, como vasos, fibras, y células de parénquima, y a la variación en el espesor de la pared celular del esclerénquima, atribuidas a las condiciones climáticas y de suelo de las distintas regiones donde crecen los individuos (Bernal y Terrazas, 2000; Montaña *et al.*, 2013). La Db de las dos especies fue alta, de acuerdo a la clasificación de Sotomayor (2005). Como se esperaba de una madera de densidad alta, la contracción volumétrica de las dos especies también fue alta, de acuerdo a la clasificación de Doldán (2007). Una contracción volumétrica alta indica una menor estabilidad dimensional de la madera, lo que precisa mayor cuidado en el proceso de secado de la madera, ya que habrá una mayor tendencia a la presencia de agrietamiento y rajaduras en el material.

Cuadro 4.5. Propiedades físicas de la madera de *Q. laurina* y *Q. crassifolia*.

Propiedades físicas	<i>Q. laurina</i>				<i>Q. crassifolia</i>			
	Árbol			Media (DE)	Árbol			Media (DE)
	1	2	3		1	2	3	
Db (g cm <sup>-3</sup> )	0.685	0.704	0.690	0.693 (0.02)	0.656	0.681	0.661	0.666 (0.02)
CV (%)	17.94	19.93	21.09	19.65 (1.54)	16.61	16.18	16.81	16.53 (1.14)
DJ (kN)	10.10	8.64	6.90	8.55 (2.22)	7.82	7.37	9.03	8.08 (1.13)

DE = Desviación estándar; Db = Densidad básica; CV = Contracción volumétrica; DJ = Dureza Janka, cara transversal (carga máxima)

La dureza de la madera de *Q. laurina* fue superior a la de *Q. crassifolia* (Cuadro 4.5), y ambas especies se clasifican como de dureza alta, de acuerdo a Dávalos y Bárcenas (1999). La dureza, como las demás propiedades físicas de la madera, están directamente relacionadas con la Db; en este estudio, *Q. laurina* presentó una Db superior a *Q. crassifolia*, lo que es consistente con los valores de dureza encontrados.

#### 4.5.4. Relación entre propiedades físicas y parámetros anatómicos

De acuerdo con el análisis de correlación, se encontraron correlaciones significativas entre las propiedades físicas y algunos parámetros anatómicos (Cuadro 4.6). Para *Q. laurina*, las correlaciones positivas más altas se dieron entre la densidad básica (Db) y el ancho de los rayos uniseriados ( $r = 0.98$ ) y, como se anticipaba, entre la Db y el espesor de la pared de la fibra (EPF) ( $r = 0.97$ ). También se encontraron correlaciones positivas altas entre la contracción volumétrica y el diámetro de lumen (DL) ( $r = 1.00$ ), y entre el ancho de los radios multiseriados (ARM) y la dureza ( $r = 0.83$ ). En *Quercus crassifolia*, se encontraron correlaciones positivas altas entre la Db y el DL ( $r = 0.99$ ), entre la contracción volumétrica y el EPF ( $r = 0.97$ ), y entre la dureza y el ARM ( $r = 1.00$ ).

Cuadro 4.6. Correlación entre propiedades físicas y parámetros anatómicos de la madera de *Q. laurina* y *Q. crassifolia*.

Propiedades físicas	Coeficiente de correlación ( <i>r</i> )							
	DV > 150	DV < 150	LV	DF	EPF	DL	ARU	ARM
<i>Quercus laurina</i>								
Densidad básica	0.86	0.19	0.36	0.94	0.97	0.58	0.98	-0.87
Contracción Vol.	0.94	0.89	0.95	0.85	0.80	1.00	0.46	-0.93
Dureza	-0.85	-0.96	-0.99	-0.73	-0.66	-0.99	-0.27	0.83
<i>Quercus crassifolia</i>								
Densidad básica	0.50	-0.36	0.80	-0.41	-0.85	0.99	-0.79	-0.69
Contracción Vol.	-0.75	0.05	-0.14	0.93	0.97	-0.99	0.57	0.88
Dureza	-0.97	-0.40	-0.14	0.93	0.98	-0.80	0.14	1.00

DV = diámetro del vaso; LV = longitud de los elementos del vaso; DF = diámetro de la fibra; EPF = espesor de pared de la fibra; DL = diámetro de lumen de las fibras; ARU = ancho de radios uniseriados; ARM = ancho de radios multiseriados

#### 4.6. CONCLUSIONES

La madera de *Q. laurina* presentó una tonalidad más clara con respecto a *Q. crassifolia*, y el atractivo vetado de estos dos encinos permite disponer su utilización en productos decorativos. La madera de las dos especies pudo diferenciarse por el brillo alto y la textura media en *Q. laurina*, contra un brillo medio y una textura gruesa en *Q. crassifolia*. Las dos especies mostraron similitud en todos sus caracteres microscópicos, aunque en *Q. crassifolia* se encontraron fibras septadas. Estadísticamente se determinaron diferencias significativas entre las dos especies en el ancho de los radios uniseriados en albura y duramen, en el número de poros por mm<sup>2</sup> en el duramen, y en el diámetro de poros menores a 150 μm en albura y duramen. Se determinó una correlación alta entre el espesor de pared de las fibras y la densidad básica en *Q. laurina*, y entre el espesor de pared de las fibras y la contracción volumétrica en *Q. crassifolia*. Ambas especies mostraron correlación alta entre la contracción volumétrica y el diámetro de las fibras. Por otra parte, la dureza alta indica que la madera de estas especies puede utilizarse en la fabricación de pisos de tráfico pesado. Finalmente, la alta contracción volumétrica aquí determinada, conlleva a implementar programas de secado con condiciones de temperatura y humedad rigurosamente controladas.

#### 4.7. REFERENCIAS

- Aguilar R., S. y B. J. Castro P. 2006. Anatomía de la madera de doce especies del bosque mesófilo de montaña del Estado de México. *Madera y Bosques* 12(1): 95-115.
- Aldrich, P. R. y J. Cavender B. 2011. *Quercus*. In: C. Kole, ed. *Wild Crop Relatives: Genomic and Breeding Resources, Forest Trees*. Springer Berlin Heidelberg 89-129.
- Aquino V., C., F. Ruiz-Aquino y M. E. Fuente C. 2012. Caracterización del patrimonio natural de la comunidad de Ixtlán de Juárez: una aproximación desde el espacio territorial. In: M. E. Fuente C., F. Ruiz A. y C. Aquino V., eds. *Conocimiento indígena contemporáneo y patrimonio biocultural en la Sierra Juárez de Oaxaca: Aportaciones empíricas y analíticas hacia la sustentabilidad*. Universidad de la Sierra Juárez, México. 35-59.
- ASTM (American Society for Testing and Materials). 2007. ASTM D143-94. Standard Test methods for small clear specimens of timber. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania 32 p.
- Bernal S., S. y T. Terrazas S. 2000. Influencia climática sobre la variación radial de caracteres anatómicos de madera en *Abies religiosa*. *Madera y Bosques* 6(1): 73-86.
- Chattaway, M. 1932. Proposed standards for numerical values used in describing woods. *Tropical Woods* 29: 20-28.
- Chávez R., D. M., S. Aguilar R. y T. Terrazas S. 2010. Variación anatómica en la madera de *Quercus obtusata* (Fagaceae). *Madera y bosques* 16(2): 69-87.
- Coombes, A. (2012). *Quercus crassifolia*. *Curtis's Botanical Magazine* 29(2): 162-169.
- Dávalos S., R. y G. M. Barcenás P. 1999. Clasificación de las propiedades mecánicas de las maderas en condición "seca". *Madera y Bosques* 5(1): 61-69.
- De la Paz P.-O., C. y A. Quintanar I. 2001. Características anatómicas de la madera de *Quercus castanea* Née, *Q. crassifolia* Humb. et Bonpl. y *Q. laurina* Humb. et Bonpl. *Revista Ciencia Forestal en México* 24 (85): 95-115.

- De la Paz P.-O., C y R. Dávalos S. 2008. Algunas características anatómicas y tecnológicas de la madera de 24 especies de *Quercus* (encinos) de México. *Madera y Bosques* 14(3): 43-80.
- De la Paz P.-O., C., S. V. Jiménez, y J. C. Romero. 2006. Anatomía de la madera de ocho especies de *Quercus* (Fagaceae) de Oaxaca, México. *Madera y Bosques* 12(1): 63-94.
- De la Paz P.-O., C., R. Dávalos S., y P. A. Quintanar I. 2005. Influencia de los radios en algunas propiedades físicas y mecánicas de la madera de ocho encinos (*Quercus*) de Durango, México. *Madera y Bosques* 11(2):49-68
- Doldán N., S., D. Ramírez H., y M. G. Ovelar A. 2007. Estudio de los cambios dimensionales de la madera de *Apuleia leiocarpa* (Vog.) Macbride (yvyra pere) secada en cámara solar. *Investigación Agraria* 9(2): 72-77.
- Flores V., R., M. E. Fuentes L., J. Quintanar O. y J. C. Tamarit U. 2013. Maquinado de cuatro especies maderables de encino de la sierra de Juárez, Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 4(16): 22-33.
- Flores V., R., J. V. Rangel P., J. Quintanar O., M. E. Fuentes L. y L. Vázquez S. 2007. Calidad de maquinado de la madera de *Quercus affinis* y *Quercus laurina*. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 13(1): 41-46.
- Franklin, G. L. 1946. A rapid method of softening wood for microtome sectioning. *Trop. Woods* 88: 35-36.
- González R., A., D. M. Arias, S. Valencia y K. Oyama. 2004. Morphological and RAPD analysis of hybridization between *Quercus affinis* and *Q. laurina* (Fagaceae), two Mexican red oaks. *American Journal of Botany* 91(3): 401-409.
- Honorato S., J. A. 2002. Características anatómicas de la madera de encino. *In*: Quintanar O. J., ed. Características, propiedades y procesos de transformación de la madera de los encinos de México. INIFAP-CIRCE. C. E. San Martinito. Puebla, México 34-68.

- Honorato S., J. A. y J. Hernández P. 1998. Determinación de componentes químicos de la madera de cinco especies de encino del estado de Puebla. *Madera y Bosques* 4(2): 79-93.
- Honorato S., J. A. y M. E. Fuentes L. 2001. Propiedades físico-mecánicas de la madera de cinco especies de encino del estado de Guanajuato. *Revista Ciencia Forestal en México* 26(90): 5-28.
- IAWA Committee. 1937. Standard terms of length of vessel members and wood fibers. *Tropical Woods* 51: 21-22.
- IAWA Committee. 1939. Standard terms of size for vessel diameter and ray width. *Tropical Woods* 59: 51-52.
- IAWA Committee. 1989. List of macroscopic features for hardwood identification. *IAWA Bulletin* 10(3): 219-332.
- Kremer, A., A. G. Abbott, J. E. Carlson, P. S. Manos, C. Plomion, P. Sisco, M. E. Staton, S. Ueno y G. G. Vendramin. 2012. Genomics of Fagaceae. *Tree Genetics & Genomes* 8(3): 583-610.
- Metcalf, C. R. y L. Chalk. 1985. *Anatomy of the dicotyledons: Wood structure and conclusion of the general introduction*. Clarendon Press. Oxford. 297 p.
- Montaño A., S., S. L. Camargo R. y C. De la Paz P.-O. 2013. Ecoanatomía de los elementos de vaso de la madera de cinco especies del género *Mimosa* (Leguminosae-Mimosoideae). *Botanical Sciences* 91(1):1-10.
- Munsell Color Company. 1975. *Munsell soil color charts*. Baltimore, Maryland. 17 p.
- Nixon, K. C. 1993. The genus *Quercus* in Mexico. *In*: T. P. Ramamoorthy, R. Bye, A. Lot, and J. Fa. eds. *Biological diversity of Mexico: origins and distribution*. Oxford University Press. New York, USA. p. 447-458.
- Oh, S. H. y P. S. Manos. 2008. Molecular phylogenetics and cupule evolution in Fagaceae as inferred from nuclear CRABS CLAW sequences. *Taxon* 57 (2): 434-451.
- Ortega, F., L. Guerrero, T. Carmona y C. Córdova. 1988. Angiospermas arbóreas de México. Núm. 1. Anatomía de la madera de 28 especies de Cosautlán de Carvajal, Veracruz. *Boletín Técnico La Madera y su Uso* No. 19. Instituto

- Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bióticos-Universidad Autónoma Metropolitana Atzacapotzalco. México. D.F. 206 pp.
- Ramos A., C. H. y V. Díaz G. 1981. Instrucciones para recolectar muestras de madera para estudios tecnológicos. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales. Boletín Divulgativo.
- Ruiz- Aquino F., J. I. Valdez-Hernández, A. Romero-Manzanares, F. Manzano-Méndez, y M. E. Fuentes-López. 2014a. Distribución espacial de dos encinos y atributos ecológicos de comunidades cohabitadas en la Sierra Juárez, Oaxaca. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente (*Enviado*).
- Ruiz-Aquino F., J. I. Valdez-Hernández, F. Manzano-Méndez, G. Rodríguez-Ortiz, A. Romero-Manzanares y M. E. Fuentes-López. 2014b. Ecuaciones de biomasa aérea para *Quercus laurina* y *Q. crassifolia* en Oaxaca, México. Madera y Bosques (*En prensa*).
- Rzedowski, J. 1978. Vegetación de México. Editorial Limusa. México. 432 p.
- Sandoval, E. 2005. Técnicas aplicadas al estudio de la anatomía vegetal. Cuadernos del Instituto de Biología 38. UNAM. México, D.F. 281 p.
- SAS Institute. 1989. SAS user's guide statistics. Cary, North Carolina. SAS Institute Inc.
- Sotomayor C., J. R. 2005. Características mecánicas y clasificación de la madera de 150 especies mexicanas. Investigación e Ingeniería de la Madera 1(1):1-24.
- Tortorelli, L. 1956. Maderas y bosques argentinos. ACME. Buenos Aires. 910 p.
- Tovar S., E. y K. Oyama. 2004. Natural hybridization and hybrid zones between *Quercus crassifolia* and *Quercus crassipes* (Fagaceae) in Mexico: morphological and molecular evidence. American Journal of Botany 91(9): 1352-1363.
- Valencia A., S. 2004. Diversidad del género *Quercus* (Fagaceae) en México. Boletín de la Sociedad Botánica de México 75: 33-53.
- Valencia A., S., M. Gómez C. y F. Becerra L. 2002. Catálogo de encinos del estado de Guerrero, México. Libro Técnico No. 1. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. México. 180 p.

## CAPÍTULO V

### PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA DE DOS ENCINOS MEXICANOS: RELACIÓN CON PROPIEDADES FÍSICAS SELECTAS<sup>4</sup>

#### 5.1. RESUMEN

Aquí describimos la relación entre 27 parámetros mecánicos y la densidad, los coeficientes de contracción, el punto de saturación de la fibra (PSF), el contenido de humedad, y la relación de anisotropía en pequeños especímenes de madera de *Quercus crassifolia* Humb. & Bonpl. y *Q. laurina* Humb. & Bonpl., de Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México. Los dos encinos presentaron baja estabilidad dimensional, y los resultados de los ensayos mecánicos indicaron una madera de alta resistencia mecánica y al impacto. Las propiedades mecánicas estuvieron correlacionadas positivamente con la densidad, con los coeficientes de contracción, y con el PSF. La densidad fue en general el mejor predictor de las propiedades mecánicas, aunque el MOR fue mejor predictor del MOE en la prueba de flexión. Los modelos univariados para predecir las propiedades mecánicas utilizando el mejor regresor de las propiedades físicas arrojaron valores de  $R^2 = 0.104$  ( $p = 0.015$ ) a  $R^2 = 0.494$  ( $p < 0.001$ ), mientras que los modelos multivariados incrementaron el poder predictivo significativamente, de  $R^2 = 0.190$  ( $p = 0.004$ ) a  $R^2 = 0.646$  ( $p < 0.001$ ).

**Palabras clave:** *densidad, estabilidad dimensional, Quercus, relación de anisotropía, resistencia mecánica.*

#### 5.2. ABSTRACT

Herein, we describe the relationship between 27 mechanical parameters and the density, shrinkage coefficient, the fiber saturation point (FSP), the moisture content and the ratio of anisotropy in small wood specimens of *Quercus crassifolia* Humb & Bonpl. y *Q. laurina* Humb. & Bonpl., of Ixtlán de Juárez, Oaxaca, Mexico. Two oaks

---

<sup>4</sup> Artículo en revision en la revista Wood and Fiber Science con el título: Mechanical properties of wood of two mexican oaks: Relationship to selected physical characteristics. Se presentaron avances en el XI Congreso Mexicano Sobre Recursos Forestales, 2013.

showed low dimensional stability, and mechanical testing results indicated a wood with a high-level strength and impact resistance. The mechanical properties were positively correlated with density, shrinkage coefficient, and the FSP. The density was generally the best predictor of mechanical properties, although the MOR was a better predictor of MOE in bending test. Using the best physical properties regressor, univariate models to predict the mechanical properties returned values  $R^2 = 0.104$  ( $p = 0.015$ ) to  $R^2 = 0.494$  ( $p < 0.001$ ), while multivariate models significantly increased the predictive value of  $R^2 = 0.190$  ( $p = 0.004$ ) to  $R^2 = 0.646$  ( $p < 0.001$ ).

**Keywords:** *density, dimensional stability, Quercus, anisotropy ratio, mechanical strength.*

### 5.3. INTRODUCCIÓN

*Quercus* (Fagaceae) tiene la mayor distribución a nivel mundial, con cerca de 400 especies (Aldrich y Cavender, 2011). México es el mayor centro de diversidad global de *Quercus*, con 161 especies, de las que 109 son endémicas (Nixon *et al.*, 1993; Valencia, 2004). La distribución de los encinos incluye los principales tipos de vegetación en climas templados y regiones subtropicales del hemisferio norte (Zavala, 1998; Domínguez y Quintanilla, 2002); muchas especies de encino habitan en regiones de clima árido (Johnson *et al.*, 2009). En México, la principal cubierta vegetal forestal en climas templado y subhúmedo, consiste en bosques de pino, encino, y pino-encino (Rodríguez y Romero, 2007). Los encinos con distribución más amplia en México son *Q. candicans* Née, *Q. castanea* Née, *Q. crassifolia* Humb. & Bonpl., *Q. laeta* Liebm., *Q. microphylla* Née, *Q. obtusata* Humb. & Bonpl., y *Q. rugosa* Née (Zavala, 1998).

En un reporte previo, se describió la estructura y composición del bosque de encino en Ixtlán de Juárez, Oaxaca, haciendo énfasis en los índices de importancia ecológica y los patrones de distribución espacial del género *Quercus* (Ruiz-Aquino *et al.*, 2014d). Entre 19 especies leñosas, los mayores Índices de Valor de Importancia y de Valor Forestal, correspondieron a *Q. laurina* y *Q. crassifolia*. Asimismo, se reconoció que los árboles de estas dos especies tienen fustes rectos, limpios y cilíndricos (Ruiz-Aquino *et al.*, 2014c). Considerando que su madera presenta

además excelente respuesta a las operaciones de maquinado (Flores *et al.*, 2013), es concebible que la madera de *Q. laurina* y *Q. crassifolia* pueda utilizarse industrialmente en aplicaciones con alto valor agregado.

En 2012, la madera de encino ocupó el segundo lugar de aprovechamiento después de la madera de pino en México, utilizándose en escuadría (35%), celulósicos (8%), leña (20%), carbón (27%) y postes, pilotes y durmientes (10%). Sin embargo, sólo el 8.8% del total de la producción forestal maderable en México provino del encino (SEMARNAT, 2012), debido en gran medida a que no se conocen las características tecnológicas de la madera de muchos encinos mexicanos (Flores *et al.*, 2013).

En este trabajo, se evaluaron las propiedades físicas de la madera de *Q. laurina* (QL) y *Q. crassifolia* (QC), como preámbulo al diseño de procesos tecnológicos para su beneficio. Asimismo, se identificaron parámetros de fácil medición, que requieren especímenes pequeños (e.g. densidad en cilindros de madera), para estimar las propiedades mecánicas de la madera.

## **5.4. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **5.4.1. Área de estudio, selección de árboles y aserrío**

El muestreo se realizó en un bosque de pino-encino de la comunidad de Ixtlán de Juárez, Oaxaca, localizado entre 17°18'16" y 17°30'00" LN; 96°31'38" y 96°22'00" LO. Se seleccionaron tres árboles por especie, sanos y representativos, de 30 a 40 cm de DAP, y alturas entre 20 y 25 m. El derribo de los árboles y troceo se hizo de acuerdo con Ramos y Díaz (1981), tomando cuatro trozas de 1.3 m de longitud por árbol; la primer troza se utilizó para las pruebas físicas, y las tres restantes se aserraron para los ensayos mecánicos. El aserrío se realizó en cuartos, obteniéndose polines de 7 × 7 × 130 cm con planos radial y tangencial definidos (Nájera *et al.*, 2005); de éstos se cortaron probetas representativas de la parte comercial del fuste. Los ensayos en condición verde se realizaron al final del aserrío. Para los ensayos en condición seca (12% CH), se tomaron precauciones para el secado, en vista de las altas contracciones de la madera de encino. El secado se

realizó bajo cubierta, hasta un contenido de humedad (CH) < 30 % (40 d); luego se secó en un secador solar, a un CH del 12% (aprox. 30 d).

#### **5.4.2. Propiedades físicas**

Se utilizaron probetas de las dimensiones especificadas en la norma ASTM D 143-94 (ASTM, 2007). Las probetas se obtuvieron de una rodaja de 15 cm de espesor, a 1.30 m de la base de cada árbol muestreado. El material restante de la primera troza se utilizó para la caracterización anatómica y química de la madera (Ruiz-Aquino *et al.* 2014a, b). Las propiedades físicas determinadas fueron: densidad básica ( $D_b$ ,  $n = 36$  por especie), al 12% CH (densidad normal,  $D_n$ ,  $n = 36$ ), verde ( $D_v$ ,  $n = 36$ ) y anhidra ( $D_o$ ,  $n = 36$ ); contracción volumétrica (VS,  $n = 36$ ); contracción radial ( $S_r$ ,  $n = 36$ ), contracción tangencial ( $S_t$ ,  $n = 36$ ) y contracción longitudinal ( $S_l$ ,  $n = 36$ ); y CH en verde ( $CH_v$ ,  $n = 36$ ). El punto de saturación de la fibra (PSF) se calculó con la ecuación de Fuentes-Salinas (2000):  $PSF = VS \times (0.9 \times D_b)^{-1}$ . La relación de anisotropía (RA) se calculó con:  $RA = S_t \times (S_r)^{-1}$ .

#### **5.4.3. Propiedades mecánicas**

Los ensayos mecánicos se realizaron siguiendo el método secundario de la norma ASTM D 143-94 (ASTM, 2007), excepto el de flexión dinámica, que se realizó según a la norma DIN 52189 (DIN, 1981). Los primeros ensayos se realizaron en una máquina universal de pruebas 3385H (Instron Corporation, USA), con una celda de carga de 250 kN de capacidad, controlada por el software Bluehill. La flexión dinámica se evaluó en una máquina de impacto PW 15/10-S (Otto Wolpert-Werke, Alemania), equipada con un martillo de 10 kg. Los ensayos mecánicos realizados en condición seca fueron: dureza (carga máxima, CM, en los planos transversal, radial y tangencial;  $n = 24$  por especie); cortante (esfuerzo máximo, EM;  $n = 21$ ); rajado (CM/ancho de la probeta,  $n = 18$ ); tensión perpendicular (EM,  $n = 15$ ); compresión axial (esfuerzo al límite proporcional, ELP; módulo de elasticidad, MOE; trabajo al límite proporcional, TLP; y trabajo a la carga máxima, TCM;  $n = 21$ ); compresión perpendicular (ELP y MOE,  $n = 21$ ); flexión estática (ELP, MOE, EM, TLP, TCM y módulo de ruptura, MOR;  $n = 21$  para QL,  $n = 12$  para QC); y flexión dinámica

(trabajo total de ruptura,  $W$ ;  $n = 21$ ). Los ensayos mecánicos realizados en condición verde, fueron flexión estática ( $n = 36$ ) y flexión dinámica ( $n = 30$ ).

#### 5.4.4. Análisis estadístico

Se hizo un ANOVA de los parámetros estudiados, seguido de un análisis de grupos homogéneos de medias (Tukey,  $\alpha = 0.05$ ). Para determinar la relación de las propiedades físicas con las propiedades mecánicas, se calculó el coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ). Para modelar los parámetros mecánicos, se seleccionó el mejor modelo univariado de la estimación curvilínea en términos del  $R^2$ , del mejor regresor individual (parámetro físico). También se corrió la regresión múltiple lineal discriminando las variables relevantes mediante el procedimiento backward, utilizando todos los parámetros físicos de la madera como regresores. El análisis se realizó en el software SPSS ver. 22.0.0.0.

### 5.5. RESULTADOS

#### 5.5.1. Propiedades físicas

*Quercus laurina* (QL) presentó densidades 4.1-8.1% más altas que *Q. crassifolia* (QC), y en todos los casos, la diferencia entre especies fue estadísticamente significativa (Cuadro 5.1). La variabilidad intraespecífica de las densidades fue notablemente baja en las dos especies (CV = 2.2% a 3.0%). La  $Db = 0.693 \text{ g cm}^{-3}$  de la madera de QL, fue superior a la  $Db = 0.600 \text{ g cm}^{-3}$  estimada por Honorato y Fuentes (2001), y a la  $Db = 0.652 \text{ g cm}^{-3}$  referida por De la Paz Pérez y Dávalos (2008) para la misma especie. En QC, la  $Db = 0.666 \text{ g cm}^{-3}$ , fue inferior a la  $Db = 0.687 \text{ g cm}^{-3}$  reportada por De la Paz Pérez y Dávalos (2008). La  $Db$  y la  $Dn$  fueron altas en las dos especies, de acuerdo con la clasificación de Sotomayor (2005) y Tortorelli (1956), respectivamente.

La densidad más alta de QL se reflejó en cambios dimensionales mayores a los de QC (Cuadro 5.1). En ambas especies, las contracciones tangencial ( $S_t$ ), radial ( $S_r$ ) y volumétrica (VS) fueron altas, de acuerdo con Chávez *et al.* (2007), excepto por la  $S_r$  de QC (4.65%), que fue media. Las contracciones reportadas en este estudio, son consistentes con las de cinco especies de encinos de Guanajuato, México ( $S_r = 4.7$ -

5.5%;  $S_t = 13.3-16.1\%$ ; Honorato y Fuentes, 2001), con *Q. laeta* de Durango, México ( $S_r = 6.4\%$ ;  $S_t = 10.7\%$ ; Nájera *et al.*, 2005), y con 24 especies de *Quercus* en México ( $VS = 15.2-22.5\%$ ; De la Paz Pérez y Dávalos, 2008), que en todos los casos se reportan altas.

Cuadro 5.1. Propiedades físicas de la madera de *Quercus laurina* y *Q. crassifolia*.

	<i>Quercus laurina</i>				<i>Quercus crassifolia</i>			
	Árbol			Media (SD)	Árbol			Media (SD)
	1	2	3		1	2	3	
CH <sub>v</sub>	66.3	70.4	75.5	70.7 (5.1)a	70.5	62.5	75.4	69.5 (7.3)a
Db	0.685	0.704	0.690	0.693 (0.02)a	0.656	0.681	0.661	0.666 (0.02)b
Dn	0.787	0.819	0.805	0.805 (0.03)a	0.741	0.762	0.744	0.750 (0.03)b
Dv	1.139	1.200	1.210	1.183 (0.03)a	1.119	1.106	1.159	1.128 (0.03)b
Do	0.834	0.880	0.875	0.863 (0.03)a	0.787	0.813	0.795	0.798 (0.03)b
S <sub>t</sub>	13.3	14.5	14.0	13.9 (1.2)a	12.3	11.6	11.4	11.6 (1.3)b
S <sub>r</sub>	5.20	6.79	6.72	6.19 (1.1)a	4.65	5.42	5.69	5.42 (0.8)b
S <sub>l</sub>	0.17	0.34	0.17	0.21 (0.2)a	0.16	0.39	0.19	0.26 (0.2)a
VS	17.9	19.9	21.1	19.7 (1.5)a	16.6	16.2	16.8	16.5(1.1)b
RA	2.59	2.20	2.09	2.31 (0.4)a	2.74	2.18	2.03	2.20 (0.5)a
PSF	29.1	31.5	34.0	31.5 (2.4)a	28.1	26.4	28.3	26.9 (2.3)b

Letras diferentes en cada fila indican diferencias significativas entre especies. CH<sub>v</sub>, contenido de humedad en verde (%); Db, densidad básica (g cm<sup>-3</sup>); Dn, densidad normal (g cm<sup>-3</sup>); Dv, densidad verde (g cm<sup>-3</sup>); Do, densidad anhidra (g cm<sup>-3</sup>); S<sub>r</sub>, contracción tangencial (%); S<sub>r</sub>, contracción radial (%); S<sub>l</sub>, contracción longitudinal (%); VS, contracción volumétrica (%); RA, relación de anisotropía; PSF, punto de saturación de la fibra (%). SD, desviación típica.

La RA de ambas especies (2.20-2.31; Cuadro 5.1) se encuentra en el intervalo registrado para 24 especies de *Quercus* en México (RA = 2.0-2.9; De la Paz Pérez y Dávalos, 2008). En ambas especies, la RA se calificó como alta, de acuerdo con Fuentes-Salinas (1998). Por otra parte, el PSF para QL fue 4.6% mayor que en QC (Cuadro 1); en ambas especies, el valor determinado para el PSF fue Alto (Fuentes-Salinas, 2000).

### 5.5.2. Resistencia a la flexión estática

Excepto por el trabajo a la carga máxima (TCM) en la condición verde, los parámetros de la flexión estática fueron estadísticamente mayores en la madera de QL, tanto en condición seca como en condición verde, lo que es congruente con su

mayor Db (Cuadro 5.2). Como se esperaba, los valores en la flexión estática fueron más altos en condición seca que en condición verde; en las dos especies, la propiedad más afectada fue la resiliencia, esto es, el TCM. La disminución en el CH incrementó la resistencia mecánica en diferente magnitud para los diversos parámetros, e influyó más en QL que en QC, independientemente del parámetro considerado. En QL, la proporción de cambio de la condición seca con respecto a la condición verde fue: MOE 35%, ELP 56%, TLP 70%, EM 79%, MOR 80%, y TCM 123%, mientras que en QC éstas fueron: MOE 20%, ELP 18%, TLP 13%, EM 56%, MOR 57%, y TCM 105%.

Cuadro 5.2. Resistencia a la flexión estática y a la flexión dinámica en condición verde y seca (12% CH) en pequeños especímenes de madera de *Quercus laurina* y *Q. crassifolia*.

	<i>Quercus laurina</i>		<i>Quercus crassifolia</i>	
	Verde Media (SD)	Seca Media (SD)	Verde Media (SD)	Seca Media (SD)
MOE	14.8 (1.6)a	20.0 (2.6)b	12.1 (1.2)c	14.6 (1.3)a
MOR	70.5 (5.4)a	127.1 (13.6)b	58.8 (8.1)c	89.5 (8.4)d
EM	78.1 (5.8)a	139.8 (15.3)b	63.2 (8.4)c	98.9 (9.5)d
ELP	43.5 (13.1)a	67.9 (18.1)b	30.2 (6.8)c	35.7 (8.2)d
TLP	7.9 (4.6)a	13.4 (6.4)b	4.4 (1.9)c	5.0 (2.9)a,c
TCM	65.2 (15.7)a	145.6 (29.0)b	59.4 (17.3)a	121.6 (35.5)c
W (J)	35.9 (6.4)a	60.4 (11.9)b	39.2 (6.7)a	55.5 (13.2)b

Letras diferentes en cada fila, indican diferencias significativas. MOE, módulo de elasticidad (GPa); MOR, módulo de ruptura (MPa); EM, esfuerzo máximo (MPa); ELP, esfuerzo al límite proporcional (MPa); TLP, trabajo al límite proporcional ( $\text{kJ m}^3$ ); TCM, trabajo a la carga máxima ( $\text{kJ m}^3$ ); W = trabajo total de ruptura (J).

Nuestros valores de MOE en condición verde (QL 14.8 GPa; QC 12.1 GPa), son consistentes con los reportados por De la Paz Pérez y Dávalos (2008), 14.6 GPa para QL, y 11.8 GPa para QC, aunque nuestros MOR en condición verde (QL 70.5 MPa; QC 57.0 MPa), fueron menores a los de dichos autores (QL 73.6 MPa; QC 66.2 MPa). En QL, el MOR y el MOE aquí reportados son similares al valor medio de 24 encinos mexicanos en condición verde (71.9 MPa; 12.5 GPa, respectivamente) (De la Paz Pérez y Dávalos, 2008). Comparativamente a lo reportado para los 24 encinos, en QC, el MOE en condición verde fue similar a la media, pero el MOR fue

menor, con excepción de *Q. affinis* Scheidw. (MOR 40.9 MPa; Db 0.579 g cm<sup>-3</sup>), y fue mucho menor al MOR de otros encinos rojos como *Q. conspersa* Benth. (MOR 77.4 MPa; Db 0.687 g cm<sup>-3</sup>) o *Q. mexicana* Humb. & Bonpl. (MOR 73.5 MPa; Db 0.613 g cm<sup>-3</sup>), y al MOR de encinos blancos como *Q. potosina* Trel. (MOR 86.6 MPa; Db 0.767 g cm<sup>-3</sup>) o *Q. excelsa* Liebm. (MOR 85.1 MPa; Db 0.715 g cm<sup>-3</sup>). De acuerdo con las clasificaciones de Dávalos y Bárcenas (1998, 1999), el MOE de QL fue muy alto, y el de QC alto, tanto en condición verde como en condición seca, mientras que el MOR fue alto y medio en el mismo orden, para ambas condiciones.

### 5.5.3. Resistencia a la flexión dinámica

La energía que absorbe la madera ante la aplicación de una carga instantánea, se le denomina trabajo total de ruptura (*W*) (Bárcenas *et al.*, 2003). La resistencia a la flexión dinámica se redujo al incrementarse el CH de la madera (Cuadro 5.2); el *W* pasó de 60.4 y 55.5 J en la condición seca a 35.9 y 39.2 J en la condición verde en QL y QC, respectivamente, lo que representa un cambio del 68% y 42%, en el mismo orden. Este comportamiento concuerda con lo observado por Bárcenas *et al.* (2003) para la madera de encino, donde el *W*<sub>12%</sub> fue mayor al *W*<sub>verde</sub> en la madera de *Q. uxoris* McVaugh, *Q. eugeniifolia* Liebm. y *Q. mexicana*. No obstante, el efecto del CH en el *W* varió con la especie, pues 11 de las 16 maderas estudiadas por Bárcenas *et al.* (2003), presentaron un *W*<sub>verde</sub> > *W*<sub>12%</sub>. Valores similares al *W* de QC se reportaron para *Q. mexicana* procedente de Veracruz, México (Db = 0.609 g cm<sup>-3</sup>), 54.7 J en condición seca, y 40.5 J en condición verde (Bárcenas *et al.*, 2003).

### 5.5.4. Resistencia a la compresión

En el Cuadro 5.3 se muestran los valores del ensayo en compresión axial (CA) obtenidos para ambas especies en condición seca. En todos los parámetros mecánicos de la CA, QL es superior a QC, excepto para el TCM. Bárcenas *et al.* (2005), determinaron que la resistencia a la CA disminuye al incrementarse el tamaño y la abundancia de los radios medulares, debido a la desviación que causan en los elementos celulares longitudinales. En QC, el ancho de los radios multiseriados en la albura (422 μm) y el duramen (479 μm), fueron mayores a los de QL, 342 y 368 μm, respectivamente (Ruiz-Aquino *et al.*, 2014b), lo que aunado con

su menor densidad, podría explicar la menor resistencia de QC a la CA. El TCM fue significativamente mayor en QC ( $160 \text{ kJ}\cdot\text{m}^3$ ) comparado con el de QL ( $124 \text{ kJ}\cdot\text{m}^3$ ); en ambas especies, el TCM se encuentra por debajo del intervalo registrado para encinos rojos ( $182.1\text{-}218.3 \text{ kJ}\cdot\text{m}^3$ ) (Honorato y Fuentes, 2001). En contraste, De la Paz Pérez y Dávalos (2008) registraron 39.7 y 34.7 MPa para el esfuerzo máximo (EM) en la CA para QL y QC, respectivamente, cifras que son menores a los resultados del presente estudio (48.5 y 42.9 MPa, en el mismo orden). Con base en el EM, la resistencia a la CA de la madera de QL se clasifica como media y la de QC como baja, respectivamente (Dávalos y Bárcenas, 1999). En función al MOE, la rigidez de ambas especies en compresión axial, es baja (Sotomayor, 2005).

Cuadro 5.3. Resistencia a la compresión axial (CA) y perpendicular al eje (CP) en condición seca (12% CH), en pequeños especímenes de madera de *Quercus laurina* y *Q. crassifolia*.

	<i>Quercus laurina</i>		<i>Quercus crassifolia</i>	
	CA	CP	CA	CP
ELP	19.5 (10.2)a	6.7 (2.1)A	17.9 (6.7)a	5.7 (1.6)A
MOE	6.9 (1.5)a	3.0 (0.8)A	5.5 (0.9)b	3.4 (0.5)B
EM	48.5 (11.1)a	NA	42.9 (5.5)b	NA
TLP	12.8 (13.1)a	NA	11.4 (8.3)a	NA
TCM	124.0 (43.8)a	NA	160.1 (38.2)b	NA

Letras minúsculas diferentes en cada fila, representan diferencias significativas entre especies en CA. Letras mayúsculas diferentes en cada fila, representan diferencias significativas entre especies en CP. ELP, esfuerzo al límite proporcional (MPa); MOE, módulo de elasticidad (MPa); EM, esfuerzo máximo (MPa); TLP, trabajo al límite proporcional ( $\text{kJ}\cdot\text{m}^3$ ); TCM, trabajo a la carga máxima ( $\text{kJ}\cdot\text{m}^3$ ). NA, no aplicable. Se presentan los valores medios, con la desviación típica entre paréntesis.

En la prueba de compresión perpendicular (CP), el esfuerzo al límite proporcional (ELP), fue mayor en QL (6.74 MPa) que en QC (5.72 MPa); según la clasificación de Dávalos y Bárcenas (1999), éste se clasifica como medio y bajo, respectivamente. Honorato y Fuentes (2001) encontraron un ELP = 13.3 MPa para QL, mientras que De la Paz Pérez y Dávalos (2008) reportan un ELP de 8.6 MPa y 9.3 MPa para QL y QC, respectivamente. Como se anticipó, el ELP y el MOE fue mayor en la CA que en

la CP en ambas especies; en la CA, las fibras trabajan como columnas individuales, apoyándose en fibras adyacentes cuyas paredes celulares están cementadas con lignina (Bárceñas *et al.*, 2005). Además, las capas  $S_1$  y  $S_3$  de la pared celular secundaria circundan las microfibrillas de la capa  $S_2$ , lo que limita la deformación y aumenta la resistencia a la CA (Bárceñas *et al.*, 2005).

#### **5.5.5. Dureza, y resistencia al cortante, tensión perpendicular, y al rajado**

En ambos encinos, la dureza fue alta en los tres planos, según la clasificación de Dávalos y Bárceñas (1999). En el plano transversal, la dureza de *QL* (8.55 kN) fue nominalmente mayor a la de *QC* (8.08 kN), aunque la diferencia no fue significativa (Cuadro 5.4). Estos valores son mayores a los reportados por De la Paz Pérez y Dávalos (2008) para las mismas especies (*QL* 6.62 kN; *QC* 6.7 kN), y también superiores a los 6.61-7.83 kN de cinco encinos de Guanajuato, México (Honorato y Fuentes, 2001). La dureza de *QL* mostró una proporción 1.29:1.00:0.87 en los planos transversal, radial y tangencial, respectivamente; para *QC*, la proporción fue 1.10:1.00:0.93. Este hallazgo difiere al de De la Paz Pérez y Dávalos (2008), quienes reportan menor dureza en la cara transversal para *QL* y *QC*, aunque concuerda con el reporte de *Q. laeta* (Nájera *et al.*, 2005), y con la dureza de cinco encinos de Guanajuato, México (Honorato y Fuentes, 2001). A pesar de la menor densidad de *QC*, su dureza lateral resultó estadísticamente mayor que la de *QL*.

Los valores aquí reportados para el EM en cortante, 18.4 MPa para *QL* y 15.5 MPa para *QC* (Cuadro 5.4), son mayores al intervalo registrado para las 24 especies de encino (8.0-12.3 MPa), reportadas por De la Paz Pérez y Dávalos (2008). No obstante, el EM de *QL* se encuentra en el intervalo reportado para cinco encinos de Guanajuato, México (17.9-19.6 MPa) (Honorato y Fuentes, 2001). En *QL*, la resistencia al cortante fue muy alta, y en *QC* fue alta (Dávalos y Bárceñas, 1999).

El EM en tensión perpendicular para las dos especies (*QL* 6.01 MPa; *QC* 6.51 MPa), están en el intervalo reportado para nueve encinos rojos de EUA (3.50-7.20 MPa; Green *et al.*, 1999). En ambas especies, la resistencia a la tensión perpendicular fue alta, de acuerdo con la clasificación de Novelo (1964). Por otro

lado, no hubo diferencia significativa entre las dos especies en la resistencia al rajado.

Cuadro 5.4. Dureza, y resistencia al cortante, al rajado, y a la tensión perpendicular en condición seca (12% CH), en pequeños especímenes de madera de *Quercus laurina* y *Q. crassifolia*.

	<i>Q. laurina</i> Media (SD)	<i>Q. crassifolia</i> Media (SD)
Dur rad	6.60 (1.3)a	7.29 (0.7)b
Dur tan	5.77 (0.7)a	6.78 (0.7)b
Dur tran	8.55 (2.2)a	8.08 (1.1)a
Cortante	46.7 (3.5)a	38.8 (3.8)b
Rajado	94.6 (33.0)a	95.4 (24.0)a
Tensión	6.01 (1.9)a	6.51 (0.7)a

Dur rad, dureza en el plano radial (kN); Dur tan, dureza en el plano tangencial (kN); Dur tran, dureza en el plano transversal (kN); Cortante, esfuerzo máximo al cortante (MPa); Rajado, resistencia al rajado (N/mm). Tensión, resistencia a la tensión perpendicular al eje (MPa). Letras minúsculas diferentes en cada fila, representan diferencias significativas entre especies.

### 5.5.6. Modelación de las propiedades

Veintitrés de los 27 parámetros mecánicos tuvieron correlación significativa con al menos una propiedad física (resultados no mostrados). Las excepciones fueron la resistencia a la tensión perpendicular y al rajado, el ELP de la CA, y el  $W_{12\%}$ . Como se esperaba, la densidad estuvo correlacionada positivamente con la resistencia mecánica; las mejores correlaciones fueron para  $D_o$ , seguido por VS, y por  $S_t$ . Destaca también la correlación positiva significativa entre 13 parámetros mecánicos, y el PSF. Las correlaciones de las propiedades físicas con los parámetros mecánicos más comunes se muestran en el Cuadro 5.5.

Un análisis gráfico justificó el uso de un solo modelo, para estimar 18 parámetros mecánicos que muestran correlación significativa con la densidad en las dos especies. Las excepciones a esto fueron el MOE de la CP, dureza, y el TCM de la CA. En el Cuadro 5.6 se listan los modelos para 12 propiedades mecánicas, utilizando los parámetros físicos como regresores.

Cuadro 5.5. Correlación de Pearson (r) entre las propiedades físicas y los parámetros mecánicos de la madera de *Quercus laurina* y *Q. crassifolia*.

	CH <sub>v</sub>	Dv	Db	Do	VS	S <sub>t</sub>	S <sub>r</sub>	PSF	RA
ELP <sub>verde</sub>	-0.14	0.11	<b>0.27</b>	<b>0.30</b>	<b>0.23</b>	<b>0.32</b>	-0.05	0.17	<b>0.31</b>
MOE <sub>verde</sub>	-0.04	<b>0.38</b>	<b>0.47</b>	<b>0.57</b>	<b>0.50</b>	<b>0.52</b>	0.03	<b>0.40</b>	<b>0.35</b>
MOR <sub>verde</sub>	-0.15	<b>0.26</b>	<b>0.45</b>	<b>0.54</b>	<b>0.47</b>	<b>0.46</b>	0.13	<b>0.37</b>	0.22
ELP <sub>12%</sub>	-0.03	0.29	<b>0.40</b>	<b>0.47</b>	<b>0.49</b>	<b>0.40</b>	0.24	<b>0.44</b>	0.03
MOE <sub>12%</sub>	-0.04	<b>0.35</b>	<b>0.49</b>	<b>0.53</b>	<b>0.51</b>	<b>0.55</b>	0.10	<b>0.44</b>	0.25
MOR <sub>12%</sub>	-0.05	<b>0.39</b>	<b>0.55</b>	<b>0.63</b>	<b>0.63</b>	<b>0.56</b>	0.28	<b>0.57</b>	0.08
ELP <sub>CP</sub>	<b>-0.35</b>	-0.16	0.17	.16	0.12	<b>0.36</b>	-0.05	0.07	0.30
EM <sub>CA</sub>	0.21	<b>0.54</b>	<b>0.40</b>	<b>0.49</b>	<b>0.49</b>	<b>0.53</b>	<b>0.35</b>	<b>0.43</b>	0.06
MOE <sub>CA</sub>	0.23	<b>0.55</b>	<b>0.39</b>	<b>0.50</b>	<b>0.53</b>	<b>0.68</b>	<b>0.44</b>	<b>0.48</b>	0.02
Cortante	0.17	<b>0.59</b>	<b>0.50</b>	<b>0.61</b>	<b>0.62</b>	<b>0.65</b>	<b>0.41</b>	<b>0.54</b>	0.02
Dur rad <i>QL</i>	0.06	<b>0.49</b>	<b>0.60</b>	<b>0.52</b>	0.21	0.08	0.32	0.02	-0.28
Dur tan <i>QL</i>	0.10	<b>0.47</b>	<b>0.53</b>	<b>0.61</b>	<b>0.49</b>	<b>0.44</b>	0.40	0.34	-0.20
Dur rad <i>QC</i>	-0.29	-0.33	0.04	-0.06	-0.28	-0.15	-0.20	-0.28	0.04
Dur tan <i>QC</i>	0.39	0.28	-0.24	-0.07	0.38	0.07	0.33	<b>0.48</b>	-0.23

Valores en negritas indican una r significativa con  $p < 0.05$ , y en negritas sombreadas, con  $p < 0.01$ . ELP<sub>verde</sub>, esfuerzo el límite proporcional en la prueba de flexión en condición verde; MOE<sub>verde</sub>, módulo de elasticidad en flexión en condición verde; MOR<sub>verde</sub>, módulo de ruptura en flexión en condición verde. ELP<sub>12%</sub>, ELP en flexión en condición seca; MOE<sub>12%</sub>, MOE en flexión en condición seca; MOR<sub>12%</sub>, MOR en flexión en condición seca; ELP<sub>CP</sub>, ELP en compresión perpendicular; EM<sub>CA</sub>, esfuerzo máximo en compresión axial; MOE<sub>CA</sub>, MOE en compresión axial; Cortante, esfuerzo cortante; Dur rad *QL*, dureza en el plano radial en *Q. laurina*; Dur tan *QL*, dureza en el plano tangencial en *Q. laurina*; Dur rad *QC*, dureza en el plano radial en *Q. crassifolia*; Dur tan *QC*, dureza en el plano tangencial en *Q. crassifolia*. Para unidades de medida, véase Cuadros 2 y 4.

La regresión lineal multivariada arrojó mejores modelos que la regresión univariada en términos de  $R^2$ . Los mejores ajustes fueron para el MOR<sub>12%</sub> ( $R^2 = 0.61$ ), el MOE<sub>12%</sub> ( $R^2 = 0.61$ ), y la dureza en el plano radial (*QL*,  $R^2 = 0.65$ ; *QC*,  $R^2 = 0.63$ ). De la Paz Pérez y Dávalos (2008) obtuvieron un  $R^2$  de 0.56 y 0.36 para la estimación del MOR de la madera de 24 encinos a partir de la Db y del MOE, respectivamente, y un  $R^2 = 0.19$  para la estimación del MOE a partir de la Db. El  $R^2$  aquí determinado para estimar el MOR<sub>12%</sub> a partir de los parámetros físicos, fue similar al  $R^2 = 0.64$  obtenido por Carrillo *et al.* (2011) para estimar el MOR<sub>12%</sub> a partir de la Db de la madera de 14 latifoliadas del noreste de México, aunque menor al  $R^2 =$

0.87 de su estimación del MOR<sub>12%</sub> a partir del MOE<sub>12%</sub> para este grupo de especies. Por otro lado, se generaron modelos significativos para estimar el MOE<sub>12%</sub> ( $R^2 = 0.24$ ;  $p = 0.016$ ) y el MOR<sub>12%</sub> ( $R^2 = 0.30$ ;  $p = 0.005$ ) a partir de la Dv y el CH<sub>v</sub> de la madera.

Cuadro 5.6. Estadísticos de los modelos para predecir las propiedades mecánicas a partir de las propiedades físicas de pequeños especímenes de madera de *Quercus laurina* y *Q. crassifolia*.

Parámetro <sup>‡</sup>	Modelo univariado				Modelo lineal multivariado		
	X <sup>†</sup>	R <sup>2</sup>	Sig.	Modelo	Regresores en el modelo	R <sup>2</sup>	Sig.
ELP <sub>verde</sub>	S <sub>t</sub>	0.104	0.015	Y = a+bX	RA, Do	0.190	0.004
MOE <sub>verde</sub>	Do	0.323	0.000	Y = a+bX	Do, CH <sub>v</sub> , S <sub>r</sub> , Dv	0.536	0.000
MOR <sub>verde</sub>	Do	0.323	0.000	Y = a+bX	RA, Do, Dv, Db	0.453	0.000
ELP <sub>12%</sub>	VS	0.285	0.001	Y = a+bX <sup>b</sup>	CH <sub>v</sub> , PS, Do, Dv	0.354	0.016
MOE <sub>12%</sub>	S <sub>t</sub>	0.322	0.001	Y = a+bX <sup>b</sup>	S <sub>l</sub> , CH <sub>v</sub> , PSF, Do, Dv	0.605	0.000
MOR <sub>12%</sub>	Do	0.438	0.000	Y = a+bX <sup>b</sup>	Dv, PSF, Do, CH <sub>v</sub> , S <sub>l</sub>	0.610	0.000
ELP <sub>CP</sub>	S <sub>t</sub>	0.128	0.035	Y = a+bX	S <sub>l</sub> , Dv, PSF, S <sub>t</sub> , S <sub>r</sub> , CH <sub>v</sub> , Do	0.532	0.002
EM <sub>CA</sub>	Dv	0.295	0.000	Y = a+bX <sup>b</sup>	RA, S <sub>t</sub> , S <sub>r</sub>	0.440	0.000
MOE <sub>CA</sub>	S <sub>t</sub>	0.494	0.000	Y = a+bX <sup>b</sup>	Dv, Db, PSF, S <sub>t</sub> , S <sub>r</sub>	0.609	0.000
Cortante	S <sub>t</sub>	0.428	0.000	Y = a+bX	S <sub>t</sub>	0.428	0.000
Dur rad QL	Db	0.368	0.002	Y = a+bX <sup>b</sup>	S <sub>l</sub> , Db, PSF, Do	0.646	0.000
Dur tan QL	Do	0.384	0.001	Y = a+bX <sup>b</sup>	Db, PSF	0.381	0.006
Dur rad QC	-	-	-	-	CH <sub>v</sub> , Do, PSF, Dv	0.628	0.019
Dur tan QC	PSF	0.247	0.050	Y = a+bX	PSF	0.247	0.050

<sup>‡</sup>Los primeros 10 modelos se calcularon con los datos de las dos especies de encino juntas.

<sup>†</sup>X se refiere al mejor regresor en el modelo univariado. Para abreviaciones y unidades, véase Cuadro 5.

## 5.6. DISCUSIÓN

Los encinos, en particular *Quercus laurina* (QL) y *Quercus crassifolia* (QC), son un recurso maderable abundante, y representan el componente principal, a menudo dominante, de los bosques de Ixtlán de Juárez, Oaxaca. A pesar de su respuesta favorable en operaciones de maquinado (Flores *et al.*, 2013), y a su reconocida facilidad para la impregnación (De la Paz Pérez y Dávalos, 2008), la madera de estos

dos encinos es un recurso subvaluado localmente, que se aprovecha básicamente como combustible.

En este trabajo, encontramos que la resistencia mecánica y las propiedades físicas de la madera de *QL* y *QC* son comparables a las de otros encinos mexicanos, con la posible excepción de la resistencia a la compresión, que fue en general más baja. En todas las formas de esfuerzo, la resistencia en condición seca fue más alta que en condición verde. Siete de los 10 parámetros mecánicos clasificados, fueron altos a muy altos, en concordancia con la *Db* alta de los dos encinos; la resistencia al impacto también fue alta comparada con otras especies de *Db* similar (Bárceñas *et al.*, 2003). Considerando la conformación de los fustes, es claro que el recurso es apto para el aserrío, posiblemente para utilizar la madera en elementos estructurales de alto valor agregado (e.g. vigas laminadas), o que requieran alta resistencia mecánica (estructuras en vías férreas o en la minería) y al impacto (mangos de herramienta y vagones).

Sin embargo, algunas propiedades físicas de la madera de *QL* y *QC* son desfavorables para utilizarla en su forma aserrada: la madera presentó valores altos de  $S_t$ ,  $VS$ , y relación de anisotropía (*RA*). Las (*RA*) aquí reportadas (2.2-2.3), fueron mayores a las de otras latifoliadas de interés comercial, como *Tectona grandis* L. F. (*RA* = 1.8; Castro y Raigosa, 2000), y mucho mayores a la madera de coníferas de reconocida estabilidad dimensional, como *Juniperus flaccida* Schltld. (*RA* = 1.41; Borja *et al.*, 2010). La alta *RA*, junto con la alta variación dimensional indican que la madera de *QL* y *QC* tenderá a deformarse y rajarse durante el secado. Los cambios dimensionales de la madera en servicio serán especialmente críticos ante los cambios en la humedad ambiental.

Es claro que los retos tecnológicos principales para el aprovechamiento maderable de *QL* y *QC* es el proceso de secado, y abordar el aspecto de la inestabilidad dimensional de la madera en servicio. Además, la planeación del aserrío debe incluir patrones de corte que atenúen las desventajas de la *RA* alta, aún a costa del coeficiente de aserrío. La adopción de procesos de modificación térmica o acetilización de la madera parecen opciones legítimas para aprovechar este

abundante recurso, en vista de que la principal desventaja para utilizar la madera aserrada de *QL* y *QC*, se reduce básicamente a los aspectos de su inestabilidad dimensional. Por otra parte, los esfuerzos de manejo silvícola de estas especies, podrían concentrarse quizás en la selección de árboles élite con menores  $S_t$  y RA.

La determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas toman mucho tiempo, pero la densidad es usualmente un buen estimador de dichas propiedades; a menudo, la densidad de la madera se utiliza como un indicador de calidad en términos de su resistencia mecánica (Carrillo *et al.*, 2011). Las propiedades físicas y mecánicas de la madera de *QL* y *QC* tuvieron una marcada correlación con la densidad, y con las propiedades que relacionan su contenido de humedad con la estabilidad dimensional. La madera de *QL* fue en general más densa y resistente que la de *QC*, pero el incremento de la resistencia de *QL* fue proporcional al incremento de su densidad, excepto por la dureza. Se determinó que se puede utilizar un solo modelo para las dos especies, para predecir 10 parámetros mecánicos de la madera; en 8 de esos 10 modelos, y en 3 de los 4 modelos para predecir la dureza, el algoritmo introduce la densidad como variable independiente, con regresiones en general altamente significativas. Otra propiedad física que resaltó por su presencia y significancia en los modelos fue el PSF, posiblemente porque integra la información de la  $Db$  y el  $VS$  en un solo parámetro.

La posibilidad de predecir parámetros mecánicos a partir de propiedades físicas fácilmente cuantificables, pudiera auxiliar a los productores para evitar las piezas de madera con resistencia muy baja, o para unificar piezas con propiedades similares en elementos estructurales pegados (e.g. vigas laminadas). En particular, resalta la factibilidad de utilizar dos parámetros en condición verde ( $CH_V$  y  $D_V$ ), para clasificar en línea la madera aserrada de estas dos especies, de acuerdo con la rigidez y la resistencia a la flexión estimadas que habrán de alcanzar en 12%. Por otro lado, las predicciones pudieran utilizarse para seleccionar árboles élite, con el fin de mejorar genéticamente los rodales naturales o plantaciones futuras de *QL* y *QC*, con base en el parámetro mecánico de interés.

La relación existente entre el MOE y MOR es bien conocida (El-Osta *et al.* 1979; Green *et al.* 1999, Carrillo *et al.* 2011), se determinó un  $R^2 = 0.86$  ( $p < 0.001$ ), para la regresión lineal del  $MOR_{12\%}$  contra el  $MOE_{12\%}$ . Sin embargo, determinar el MOE en pequeños especímenes de madera (e.g. cilindros de Pressler) dista de ser una tarea elemental en un programa de selección de árboles élite, o de preclasificación industrial. Existe la tecnología para hacer calibraciones muy finas del  $MOE_{12\%}$  en pequeños especímenes de madera, e.g. en el SilviScan (Evans e Ilic, 2001), o vía la quimiometría de espectros del infrarrojo cercano (Schimleck *et al.* 2003). Una predicción de esta naturaleza, pudiera mejorar el ajuste del  $MOR_{12\%}$ , ya que el modelo que incluye el  $MOE_{12\%}$  junto con RA, Db,  $CH_V$ ,  $S_t$ ,  $S_r$  y Do, arroja un  $R^2 = 0.93$  ( $p < 0.001$ ) (Fig. 5.1).

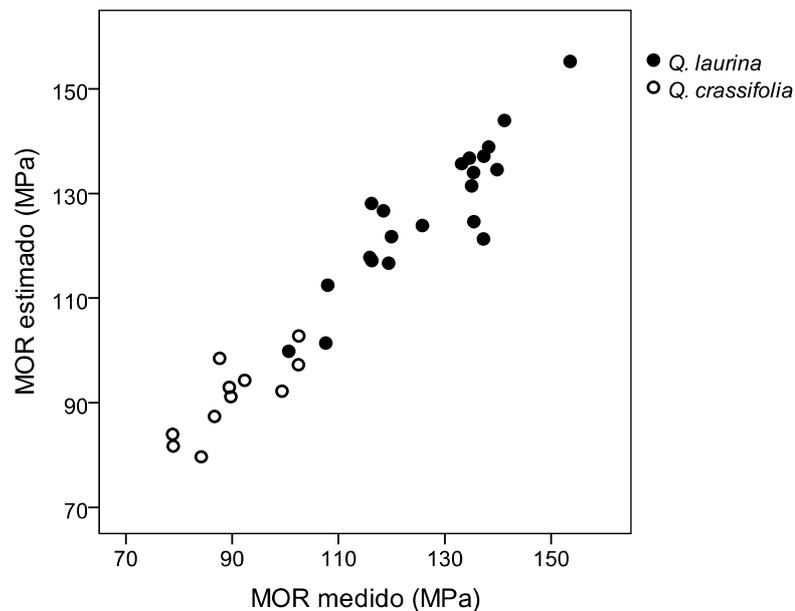


Figura 5.1. Ajuste del modelo de MOR en la condición seca (12% CH), de la madera de *Quercus laurina* y *Q. crassifolia*. Regresores en el modelo:  $MOE_{12\%}$ , RA, Db,  $CH_V$ ,  $S_t$ ,  $S_r$  y Do ( $R^2 = 0.930$ ).

## 5.7. CONCLUSIONES

La madera de *Quercus laurina* y de *Q. crassifolia* mostró alta densidad, y alta resistencia mecánica y al impacto. Por otro parte, las altas contracciones lineales y en particular una alta relación de anisotropía, indican que la madera de estos encinos será susceptible a presentar defectos al secado, y mucho movimiento en servicio debido a la inestabilidad dimensional ante cambios en la humedad ambiental.

Se obtuvieron modelos significativos para predecir parámetros mecánicos a partir de propiedades físicas de fácil evaluación, cuyos resultados ayudan a identificar las posibilidades de agregar valor a las maderas de las dos especies de encino estudiadas.

## 5.8. REFERENCIAS

- Aldrich PR, Cavender-Bares J (2011) *Quercus*. In: Kole C (Ed.) Wild Crop Relatives: Genomic and Breeding Resources, Forest Trees. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp. 89-129.
- ASTM (2007) Method D143-94: Standard test methods for small clear specimens of timber. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania 32 p.
- Bárcenas G, Ortega F, Ángeles G, Ronzón P (2005) Relación estructura-propiedades de la madera de angiospermas mexicanas. *Universidad y Ciencia* 21:45-55.
- Bárcenas G, Zárate RP, Ordóñez VR, Guerrero A, Honorato JA (2003) Correlación de los resultados de impacto o tenacidad de 16 maderas mexicanas utilizando dos métodos de prueba. *Madera Bosques* 9:55-70.
- Borja A, Machuca R, Fuentes-Salinas M, Ayerde D, Fuentes M, Quintero A (2010) Caracterización tecnológica de la madera de *Juniperus flaccida* var. *poblana* Martínez. *Revista Chapingo* 16:261-280.

- Carrillo A, Garza M, Nañez MJ, Garza F, Foroughbakhch R, Sandoval S (2011) Physical and mechanical wood properties of 14 timber species from Northeast Mexico. *Ann For Sci* 68:675-679.
- Castro F, Raigosa J (2000) Crecimiento y propiedades físico-mecánicas de la madera de teca (*Tectona grandis*) de 17 años de edad en San Joaquín de Abangares, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 24:7-23.
- Chávez NS, Ramírez D, Ovelar MG (2007) Estudio de los cambios dimensionales de la madera de *Apuleia leiocarpa* (Vog.) Macbride (yvyra pere) secada en cámara solar. *Investigación Agraria* 9:72-77.
- Dávalos R, Bárcenas G (1998) Clasificación de las propiedades mecánicas de las maderas mexicanas en condición verde. *Madera Bosques* 4:65-70.
- Dávalos R, Bárcenas G (1999) Clasificación de las propiedades mecánicas de las maderas mexicanas en condición seca. *Madera Bosques* 5:61-69.
- De la Paz Pérez C, Dávalos R (2008) Algunas características anatómicas y tecnológicas de la madera de 24 especies de *Quercus* (encinos) de México. *Madera Bosques* 14:43-80.
- DIN (1981) Deutsche Norm 52189. Part 1: Impact bending test. Determination of impact bending strength. Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin, 3 p.
- Domínguez JA, Quintanilla JA (2002) Distribución y aspectos ecológicos del género *Quercus* (Fagaceae), en el estado de Coahuila, México. *Polibotanica* 13:1-23.
- El-Osta M, Badran O, El-Wakeel A (1979) Prediction of modulus of rupture from modulus of elasticity for some Egyptian hardwoods. *Wood Fiber Sci* 11:147-154.
- Evans R, Ilic J (2001) Rapid prediction of wood stiffness from microfibril angle and density. *For Prod J* 51:53-57

- Flores R, Fuentes ME, Quintanar J, Tamarit JC (2013) Maquinado de cuatro especies maderables de encino de la Sierra de Juárez, Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 4: 22-33.
- Fuentes-Salinas M (1998) Propiedades tecnológicas de las maderas mexicanas, de importancia en la construcción. *Revista Chapingo* 4:221-229.
- Fuentes-Salinas M (2000) Estimación del punto de saturación de la fibra (PSF) de las maderas. *Revista Chapingo* 6:79-81.
- Green DW, Winandy JE, Kretschmann DE (1999) Mechanical properties of wood. *In: Wood Handbook*. FPL-GTR-113. Madison, USDA Forest Service 4:1-45
- Honorato JA, Fuentes ME (2001) Propiedades físico-mecánicas de la madera de cinco especies de encino del estado de Guanajuato. *Revista Ciencia Forestal en México* 26:5-28.
- Johnson PS, Shifley SR, Rogers R (2009) *The ecology and silviculture of oaks*, 2nd Ed. CABI Publishing, Wallingford, UK. 580 p.
- Nájera JA, Vargas A, Méndez J, Graciano JJ (2005) Propiedades físicas y mecánicas de la madera en *Quercus laeta* Liemb. de El Salto, Durango. *Ra Ximhai* 1:559-576.
- Nixon KC (1993) The genus *Quercus* in Mexico. *In: Ramamoorthy T.P., Bye R., Lot A. y Fa J. Eds. Biological diversity of Mexico: origins and distribution*, Oxford University Press, NY, pp. 447-458.
- Novelo GJ (1964) Aplicaciones de la madera de cuatro especies tropicales con base a sus propiedades físicas y mecánicas. Tesis de licenciatura. Departamento de Bosques, ENA. Texcoco, Estado de México.
- Ramos AC, Díaz GG (1981) Instrucciones para recolectar muestras de madera para estudios tecnológicos. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales. Boletín Divulgativo. 1-15
- Rodríguez IS, Romero S (2007) Arquitectura foliar de diez especies de encino (*Quercus*, Fagaceae) de México. *Acta Bot Mex* 81:9-34.

- Ruiz-Aquino F, González-Peña MM, Valdez-Hernández JI, Revilla US, Romero-Manzanares A (2014a) Fuel properties and chemical characterization of wood and bark of two oaks from Oaxaca, Mexico. *Ind Crop Prod* (Submitted).
- Ruiz-Aquino F, González-Peña MM, Valdez-Hernández JI, Romero-Manzanares A (2014b). Estructura anatómica de la madera de dos encinos de Oaxaca. *Madera Bosques* (Submitted).
- Ruiz-Aquino F, Valdez-Hernández JI, Manzano-Méndez F, Rodríguez-Ortiz G, Romero-Manzanares A, Fuentes-López ME (2014c) Ecuaciones de biomasa aérea para *Quercus laurina* y *Q. crassifolia* en Oaxaca. *Madera Bosques* 20:33-48.
- Ruiz-Aquino F, Valdez-Hernández JI, Romero-Manzanares A, Manzano-Méndez F, y Fuentes-López ME (2014d) Distribución espacial de dos encinos y atributos ecológicos de comunidades cohabitadas en la Sierra Juárez, Oaxaca. *Revista Chapingo* (Submitted).
- Schimleck LR, Mora C, Daniels RF (2003) Estimation of the physical wood properties of green *Pinus taeda* radial samples by near infrared spectroscopy. *Can J For Res* 33:2297-2305
- SEMARNAT (2012) Anuario estadístico de la producción forestal 2011. Dirección General de Gestión Forestal y de Suelos. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D. F. México. 222 p.
- Sotomayor JR (2005) Características mecánicas y clasificación de la madera de 150 especies mexicanas. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología de la Madera 1:3-24.
- Tortorelli LA (1956) *Maderas y Bosques Argentinos*. ACME. Buenos Aires. 910 p.
- Valencia S (2004) Diversidad del género *Quercus* (Fagaceae) en México. *B Soc Bot Mex* 75:33-53.
- Zavala CF (1998) Observaciones sobre la distribución de encinos en México. *Polibotanica* 8:47-64.

## CAPÍTULO VI

### PROPIEDADES ENERGÉTICAS Y CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LA MADERA Y LA CORTEZA DE DOS ENCINOS DE OAXACA, MÉXICO<sup>5</sup>

#### 6.1. RESUMEN

Aquí describimos la composición química de la albura, el duramen y la corteza de *Quercus laurina* y *Q. crassifolia* de Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México. También se caracterizó energéticamente la madera, la corteza y el carbón de los dos encinos. No hubo diferencia significativa en el contenido de lignina (24.9-25.5%),  $\alpha$ -celulosa (47.6-47.9%), y hemicelulosas (22.4-23.2%) en las dos maderas, mientras que los contenidos de ceniza, extractivos totales y extractivos en agua caliente fueron mayores en la madera de *Q. crassifolia*. El contenido de lignina,  $\alpha$ -celulosa, hemicelulosas, suberina, y extractivos totales en la corteza variaron de 25.2 a 39.6%, de 12.2 a 49.6%, de 18.6 a 23.6%, de 1.99 a 26.6%, y de 12.7 a 31.7%, respectivamente. El poder calorífico superior de la madera de los dos encinos (19.3-19.4 MJ kg<sup>-1</sup>) fue mayor al de otras latifoliadas de clima templado. Por su alto contenido de polisacáridos y bajo de extractivos, las dos maderas son aptas para la obtención de pulpa celulósica, mientras que el contenido de suberina en la corteza externa, sugiere un potencial para la obtención de biopolímeros. Las propiedades energéticas de la madera y el carbón vegetal de ambas especies, indican su vocación como combustible sólido.

**Palabras clave:** polisacáridos, suberina, poder calorífico superior, carbono fijo.

#### 6.2. ABSTRACT

Herein, we describe the chemical composition of the sapwood, heartwood and bark of *Quercus laurina* and *Q. crassifolia* of Ixtlán de Juárez, Oaxaca, Mexico. The fuel properties of the wood, bark and carbon of the two oaks are also described. There was no significant difference in lignin (24.9-25.5%),  $\alpha$ -cellulose (47.6-47.9%), and

---

<sup>5</sup> Artículo en prensa en la revista *Industrial Crops and Products*, con el título: Chemical characterization and fuel properties of wood and bark of two oaks from Oaxaca, Mexico. DOI: 10.1016/j.indcrop.2014.11.024. Se presentaron avances en la IX Reunión Nacional de Innovación Forestal, 2014.

hemicellulose (22.4-23.2%) content of the two woods, whereas the ash, total extractive and hot-water-soluble extractive contents were higher in the wood of *Q. crassifolia*. The lignin,  $\alpha$ -cellulose, hemicellulose, suberin, and total extractive content of bark ranged between 25.2-39.6%, 12.2-49.6%, 18.6-23.6%, 1.99-26.6%, and 12.7-31.7%, respectively. The high heating value of the wood of the two oaks (19.3-19.4 MJ kg<sup>-1</sup>) was higher than that of other temperate broadleaf trees. Because of their high polysaccharide and low extractive content, the two woods are suitable for the production of cellulose pulp, while the suberin content of the outside bark suggests potential for the production of biopolymers. The fuel properties of the wood and charcoal of both species indicate their potential as solid fuel.

**Key words:** polysaccharides, suberin, high heating value, fixed carbon.

### 6.3. INTRODUCCIÓN

Oaxaca es el estado con mayor diversidad de encinos en México, con 48 especies (tres de ellas endémicas), las que representan cerca del 30% del total de encinos en México (Valencia, 2004). En Ixtlán de Juárez, *Quercus laurina* Humb. & Bonpl. y *Q. crassifolia* Humb. & Bonpl. cohabitan con otras 21 especies de *Quercus*, y es la región con mayor riqueza de encinos en Oaxaca (Valencia y Nixon, 2004). En Ixtlán, los encinos son un recurso abundante, con rodales densos de 835 árboles ha<sup>-1</sup> de *Q. laurina* y *Q. crassifolia*, con individuos de fustes bien conformados, con altura media de 14.5 m (Ruiz-Aquino *et al.*, 2014a, 2014b). Sin embargo, la utilización de la madera de *Q. laurina* y *Q. crassifolia* está limitada a la producción de leña y carbón; por su alta densidad, la madera de estas especies también se usa localmente para fabricar elementos estructurales rústicos (Ruiz-Aquino *et al.*, 2014c).

Para visualizar nuevos usos de la madera de estos dos encinos, es necesario investigar su constitución química, ya que es la base indispensable para proponer procesos de producción de pulpa y papel, biocompuestos, y materiales con mayor valor agregado en el contexto de una biorefinería (Fengel y Wegener, 1984). Asimismo, la constitución química de la madera, en particular la cantidad y tipo de

extractivos, es relevante en la interacción con adhesivos, e.g. en la producción de chapas, tableros y vigas laminadas, o con los acabados y recubrimientos de la madera en la industria del mueble (Pizzi y Salvadó, 2007). La composición química de la madera también influye en sus propiedades físicas. Por ejemplo, una mayor cantidad de celulosa, implica una densidad básica más alta de la madera, debido a la estructura más uniforme y mayor peso molecular comparado con las hemicelulosas (Moya y Arce, 2006); similarmente, la densidad básica se ve influenciada por la cantidad de extractivos, lo que se refleja indirectamente en las propiedades mecánicas de la madera.

Por otra parte, la corteza representa 10-35% de la biomasa aérea total de especies forestales (Young, 1971); a diferencia de la madera, la corteza contiene polifenoles y suberina, más extractivos, y menos polisacáridos (Fengel y Wegener, 1984). El análisis de los extractivos y monosacáridos en la corteza, determina su posible aprovechamiento con fines industriales (Baptista *et al.*, 2013; Feng *et al.*, 2013).

De las 400 especies de encino que existen en el mundo (Aldrich y Cavender-Bares, 2011), sólo se conoce la composición química de la madera de 25-30 especies (Honorato, 2002); la comprensión de la química de la corteza de los encinos es todavía más limitada. El objetivo del presente trabajo, fue determinar la composición química de la albura, el duramen y la corteza de *Q. laurina* y *Q. crassifolia*, para proponer usos acordes a su composición. También se determinaron las características energéticas de la madera y el carbón vegetal de estas dos especies.

## **6.4. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **6.4.1. Selección de árboles y preparación de los especímenes**

El material para análisis se obtuvo de tres árboles por especie, sanos y representativos, en rodales dominados por *Quercus*, en Ixtlán de Juárez, Oaxaca (17°21'22" LN y 96°27'42" LO), a 2707 msnm. Se tomó la primera troza de cada árbol, de 2.5 m de largo, y se cortó una rodaja de 2 cm en cada extremo. Cada rodaja se

dividió en cuadrantes, y se tomaron cuadrantes opuestos, separando la albura y el duramen. La albura de las dos rodajas de cada árbol se mezcló para hacer una sola muestra, y lo mismo se hizo con el duramen. El material se molió en un molino tipo Wiley, y se tamizó entre las mallas No. 40 y 60. La corteza de los encinos se removió de la madera, se separó en corteza interna y corteza externa, y se siguió el mismo procedimiento para moler y tamizar el material. Se prepararon cubos de 2 cm por lado para determinar la densidad al 12 % de contenido de humedad (CH), en albura, duramen y corteza interna.

#### **6.4.2. Caracterización química de la madera**

Las determinaciones se realizaron en general siguiendo las normas para el análisis de la madera de la ASTM International (ASTM, 2007): extractivos en etanol-tolueno (EtOH/Toln, 2:1 v/v) con ASTM D 1107-96; solubilidad en agua caliente con ASTM D 1110-84; y extractivos totales en un Soxhlet con EtOH/Toln (2:1 v/v) por 4 h y luego con EtOH por 6 h, y finalmente en agua caliente por 3 h, según ASTM D 1105-96. El contenido de lignina Klason (LK) se determinó en material libre de extractivos según ASTM D 1106-96. La lignina soluble en ácido (LSA) se determinó según la norma TAPPI UM250 (TAPPI, 1991), midiendo la absorbancia del filtrado de la hidrólisis secundaria a 205 nm en un espectrómetro Lambda 25 (Perkin Elmer, EUA). El contenido de holocelulosa se determinó con el procedimiento del clorito de sodio acidificado (Fengel y Wegener, 1984), y se corrigió por el contenido de lignina residual (LK+LSA). El contenido de  $\alpha$ -celulosa se determinó con ASTM D 1103-60 (ASTM, 1976); las hemicelulosas se determinaron por diferencia entre holocelulosa y  $\alpha$ -celulosa. La cuantificación de los azúcares neutros en el hidrolizado de la lignina Klason, como acetatos de alditol, se realizó en un cromatógrafo de gases 7890A (Agilent, USA), equipado con una columna Rtx-225, de acuerdo a la norma TAPPI T249 cm-00 (TAPPI, 1994), pero siguiendo la versión miniaturizada de Foster *et al.* (2010). El contenido de cenizas se obtuvo con ASTM D 1102-84, el contenido de volátiles con ASTM E 872-82 (ASTM, 2006), y el carbono fijo de acuerdo a ASTM E 870-82 (ASTM, 2006). La composición de la ceniza se determinó con procedimientos estandarizados.

### **6.4.3. Caracterización química de la corteza**

La caracterización química de la corteza fue similar a la de la madera, con excepción de la determinación de los extractivos. La corteza se extrajo en un Soxhlet con diclorometano ( $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ , 4 h), seguido de EtOH (6 h), y finalmente en agua caliente por ebullición con reflujo (3 h) (Pereira, 2013). La solubilidad en  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$  y en EtOH se determinó por evaporación de los solventes, mientras que la solubilidad final en agua caliente, se determinó por diferencia de peso del material sin extraer descontando la solubilidad en  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$  y EtOH. También se obtuvo la solubilidad en agua caliente según ASTM D 1110-84, y la solubilidad en NaOH al 1% del material sin extraer de acuerdo a ASTM D 1109-84. La suberina se cuantificó como el contenido de ácidos grasos libres y monómeros de alcoholes de cadena larga, y se determinó por metanólisis del material libre de extractivos, siguiendo el procedimiento de Miranda et al. (2012, 2013). La holocelulosa se determinó en material libre de extractivos, sin corrección por lignina residual, mientras que la lignina Klason se determinó en corteza pulverizada extraída desuberinizada (Pereira, 1988).

### **6.4.4. Fabricación y caracterización del carbón vegetal**

Se cortaron cubos de albura y duramen de 0.8 cm por lado, y se colocaron en crisoles de porcelana antes de introducirlos a una mufla modificada, y se pirolizaron en un ambiente de  $\text{N}_2$ , aplicando la siguiente secuencia a una tasa de calentamiento de  $20^\circ\text{C min}^{-1}$ : 20 min a  $150^\circ\text{C}$ , 20 min a  $250^\circ\text{C}$ , 30 min a  $350^\circ\text{C}$ , 45 min a  $400^\circ\text{C}$ , y 45 min a  $450^\circ\text{C}$  (Tello *et al.*, 2014). Los contenidos de humedad, volátiles y cenizas del carbón se determinaron según ASTM D 1762-84.

### **6.4.5. Caracterización energética de la madera, el carbón vegetal y la corteza interna**

El poder calorífico superior (PCS,  $\text{MJ kg}^{-1}$ ) se determinó en especímenes de corteza interna, y de albura y duramen de madera y de carbón, según ASTM D5865-13 (ASTM, 2013), en un calorímetro isoperibólico 6200 (Parr, EUA), equipado con recirculador Parr 6510. La densidad energética (DE,  $\text{GJ m}^{-3}$ ) se obtuvo con:  $\text{PCS} \times \text{Dn}$ , donde  $\text{Dn}$  ( $\text{g cm}^{-3}$ ) es la densidad normal a  $50\% \pm 5\%$  HR a  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ . El índice

de valor de combustible (IVC) se calculó con:  $(PCS \times Dn)/(CH \times AC)$ , donde AC es el contenido de cenizas (w/w), y CH es el contenido de humedad (w/w).

#### **6.4.6. Análisis estadístico**

Se realizó un análisis de varianza para las variables de la composición química y el HHV de la madera, utilizando el paquete IBM SPSS ver. 22.0.0.0. Se utilizó un diseño factorial, donde los factores fueron la especie y el tipo de madera. Cuando se determinó que el factor de variación produjo un efecto significativo en el parámetro de interés, se compararon las medias utilizando la prueba HSD de Tukey ( $\alpha=0.05$ ).

### **6.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **6.5.1. Caracterización química de madera**

No se determinaron diferencias en la composición química de la albura y el duramen en cada especie, excepto por el contenido de ceniza, que fue mayor en el duramen en los dos encinos (Cuadro 6.1). La composición química de la madera de las dos especies fue muy similar, en particular en los polímeros, y sólo se encontraron contenidos mayores de ceniza, y de extractivos totales y en agua caliente, en *Q. crassifolia*, tanto en albura como en duramen.

En la madera de las dos especies, el contenido de extractivos en agua caliente fue muy similar al contenido de extractivos totales, lo que resalta la naturaleza polar del grueso de los extractivos de la madera de los dos encinos, típicamente fenoles y polifenoles; esto concuerda con caracterizaciones previas (Bárcenas *et al.*, 2008). El contenido de extractivos totales del duramen de *Q. crassifolia* fue similar a los de *Q. candicans* (10.2%) (Rutiaga *et al.*, 2000), mientras que el contenido de extractivos en agua caliente (4.7-8.6%), es similar aunque superior a los valores reportados para *Q. laurina* (4.8%), *Q. obtusata* (5.0%), *Q. candicans* (5.3%), y *Q. resinosa* (6.2%) (Villalvazo *et al.*, 1981).

El contenido de ceniza de la madera de ambas especies (0.30-0.95%) se ubica en el rango típico de 0.1 a 1.4% para maderas latifoliadas de clima templado (Bautista y Honorato, 2005). El contenido de ceniza fue menor al reportado por Honorato y

Hernández (1998) para mezclas de albura y duramen de las mismas especies, 0.87% para *Q. laurina*, y 1.38% para *Q. crassifolia*. Por otro lado, se determinó una mayor concentración de elementos inorgánicos en la albura que en el duramen; esto se ha atribuido a la reabsorción de nutrientes desde los anillos senescentes de la madera (Penninckx *et al.*, 2001).

Cuadro 6.1. Composición química de la madera de *Q. laurina* y *Q. crassifolia* (%).

Componente	<i>Q. laurina</i>		<i>Q. crassifolia</i>	
	Albura	Duramen	Albura	Duramen
Extractivos totales <sup>a</sup>	5.29 (1.58)A, a	5.35 (2.49)A, a	8.24 (1.25)B, a	8.88 (0.50)B, a
Solubilidad agua caliente <sup>a</sup>	4.66 (1.92)A, a	4.97 (2.37)A, a	7.83 (1.42)B, a	8.62 (0.50)B, a
Solubilidad EtOH/Toln <sup>a</sup>	4.15 (1.50)A, a	3.75 (1.99)A, a	4.76 (1.85)A, a	5.42 (1.07)A, a
Ceniza <sup>b</sup>	0.30 (0.04)A, a	0.43 (0.12)A, b	0.64 (0.05)B, a	0.95 (0.14)B, b
Lignina <sup>b</sup>	25.1 (2.74)A, a	25.5 (2.65)A, a	24.9 (2.73)A, a	25.2 (2.70)A, a
Klason	20.5 (1.01)A, a	20.8 (0.81)A, a	20.1 (0.79)A, a	20.4 (0.81)A, a
Soluble en ácido	4.52 (0.67)A, a	4.70 (0.45)A, a	4.76 (0.42)A, a	4.72 (0.37)A, a
Holocelulosa <sup>b</sup>	70.8 (1.64)A, a	70.8 (0.62)A, a	69.7 (1.26)A, a	70.3 (0.99)A, a
$\alpha$ -celulosa	47.9 (2.27)A, a	47.6 (1.86)A, a	47.0 (0.49)A, a	47.9 (0.73)A, a
Hemicelulosas	22.9 (0.64)A, a	23.2 (2.18)A, a	22.6 (0.77)A, a	22.4 (0.37)A, a

<sup>a</sup>Con respecto al peso anhidro antes de la extracción. <sup>b</sup>Con respecto al peso anhidro extraído. Se presenta la media de dos repeticiones por árbol = 6 repeticiones; los valores entre paréntesis representan la desviación estándar. Letras mayúsculas diferentes por filas representan diferencias significativas entre especies ( $\alpha = 0.05$ ). Letras minúsculas diferentes por filas representan diferencias significativas entre tipo de madera en cada especie ( $\alpha = 0.05$ ).

Los contenidos de celulosa y lignina Klason (LK) aquí registrados (Cuadro 6.1), son consistentes con los reportados para la madera de 12 encinos mexicanos por Honorato (2002), y para dos encinos blancos de San Luis Potosí, México (LK, 21.0-21.5%; celulosa, 45.7-48.4%) (Bárceñas *et al.*, 2008); sin embargo, el contenido de LK y celulosa fue inferior al de cuatro especies de encino de Guanajuato y Veracruz, México (LK, 20.4-23.4%; celulosa 46.8-52.9%) (Bautista y Honorato, 2005). El contenido de hemicelulosas en albura y duramen reportados en este trabajo, es similar aunque mayor al contenido de pentosanos reportado para nueve especies de *Quercus* en México (18.4-21.6%) (Honorato y Hernández, 1998; Bautista y Honorato,

2005). Los porcentajes de polisacáridos, lignina y extractivos aquí obtenidos para *Q. laurina* y *Q. crassifolia*, sugieren aptitud de la madera para la producción de pulpa celulósica, donde es deseable un menor contenido de lignina, extraíbles y ceniza, y un alto porcentaje de polisacáridos. Sin embargo, debido a las fibras cortas de estas especies (Ruiz-Aquino *et al.*, 2014c), se requiere utilizar mezclas con especies de fibra larga, si su destino final fuera la fabricación de papel. La composición de los monosacáridos en los carbohidratos de la madera es similar en los dos encinos (Fig. 6.1), con dominancia de la glucosa. La xilosa es el segundo azúcar más abundante, y existe una cantidad considerable de arabinosa, lo que indica la predominancia de la arabinoxilana sobre la glucomanana en las hemicelulosas.

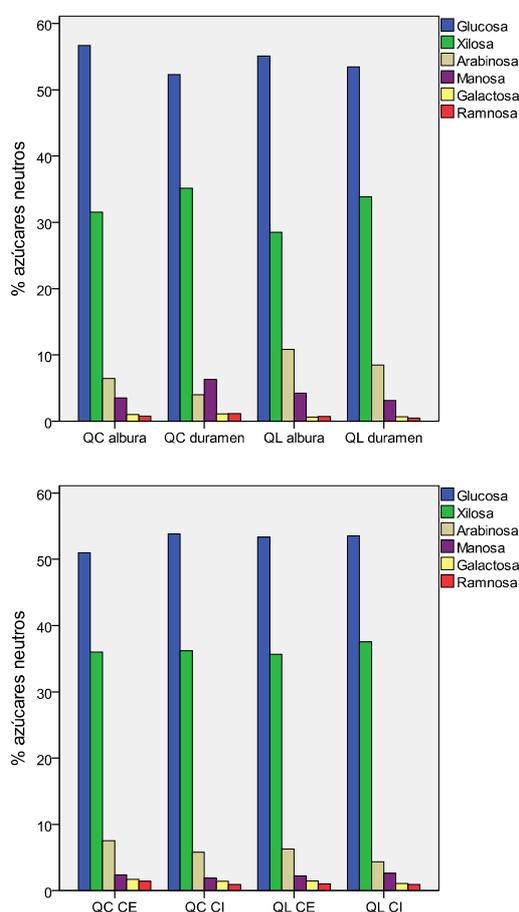


Figura 6.1. Composición de los carbohidratos en la madera y corteza, en % de los monosacáridos neutros totales; QC = *Q. crassifolia*; QL = *Q. laurina*; CE = corteza externa; CI = corteza interna. Las barras representan la media de 6 replicas para la madera, y de 2 réplicas para la corteza.

### 6.5.2. Caracterización química de la corteza

A diferencia de la madera, la composición de la corteza fue diferente entre los dos encinos, particularmente en los extractivos (Cuadro 6.2): los extractivos totales, en CH<sub>3</sub>Cl<sub>2</sub>, en EtOH y en agua caliente fueron mayores en la corteza interna de *Q. crassifolia*, mientras que en *Q. laurina*, la corteza externa presentó en general el mayor contenido de extractivos. También se encontraron diferencias en la composición de los extractivos de la corteza interna y la corteza externa dentro de cada especie.

Cuadro 6.2. Composición química de la corteza de *Q. laurina* y *Q. crassifolia*.

	<i>Q. laurina</i>		<i>Q. crassifolia</i>	
	Interna	Externa	Interna	Externa
Solubilidad NaOH <sup>a</sup>	27.2	55.6	46.3	50.7
Extractivos totales <sup>a</sup>	14.9	19.3	31.7	12.7
CH <sub>3</sub> Cl <sub>2</sub>	3.08	8.35	6.57	5.71
Etanol	12.7	11.0	18.0	4.3
Agua caliente	-0.89	-0.11	7.15	2.61
Solubilidad agua caliente <sup>a</sup>	15.1	13.5	31.6	10.9
Ceniza <sup>b</sup>	3.82	2.68	3.83	3.36
Suberina <sup>b</sup>	3.57	26.6	1.99	20.1
Lignina <sup>c</sup>	31.7	36.9	25.2	39.6
Klason	29.1	35.7	22.5	38.5
Soluble en ácido	2.61	1.20	2.65	1.10
Holocelulosa <sup>c, d</sup>	61.0	33.8	69.0	36.9
α-celulosa	42.4	12.2	49.6	13.3
Hemicelulosas	18.6	21.6	19.4	23.6

<sup>a</sup>Con respecto al peso anhidro antes de la extracción. <sup>b</sup>Con respecto al peso anhidro extraído. <sup>c</sup>Con respecto al peso anhidro extraído, desuberinizado.

<sup>d</sup>La holocelulosa reportada en este cuadro se obtuvo con: 100 – (ceniza + suberina + lignina). Los valores representan la media de dos repeticiones.

En la corteza interna, el contenido de extractivos totales es similar a los del agua caliente en las dos especies, lo que indica la naturaleza polar de los extractivos en esta parte de la corteza, probablemente polifenoles de bajo peso molecular, y taninos condensables. En cambio, en la corteza externa, del 17 al 43% de los extractivos totales no fueron solubles en agua caliente, sino en CH<sub>3</sub>Cl<sub>2</sub> (ceras, grasas,

triglicéridos, alcoholes y ácidos grasos, y terpenos), y en EtOH (flavafenos solubles en etanol). En los dos encinos, el contenido de extractivos en la corteza es mucho más alto que en la madera, particularmente los de la corteza interna en *Q. crassifolia*; también es más alto en relación al contenido de extractivos en la corteza de otras latifoliadas, como *Tectona grandis* (10.7%; Baptista *et al.*, 2013) o *Eucalyptus globulus* (6.5%; Miranda *et al.*, 2013), pero es similar al de la corteza de *Betula pendula* (17.6%; Miranda *et al.*, 2013) y de *Q. robur* (15.7%; Dietrichs *et al.*, 1978), y al contenido de extractivos del corcho de *Q. suber* (16.2%; Pereira, 2013) y de *Q. cerris* (16.7%; Şen *et al.*, 2010).

Las sustancias extraídas por NaOH al 1% son especialmente ácidos polifenólicos, extractivos, polisacáridos lábiles de las hemicelulosas, y los subproductos de la depolimerización de la suberina y de las ceras. En el presente estudio, la solubilidad en NaOH al 1% fue muy diferente entre las dos especies. En *Q. crassifolia*, la solubilidad de la corteza externa (50.7%) fue similar a la corteza interna (46.3%), mientras que en *Q. laurina*, la solubilidad de la corteza externa (55.6%) fue el doble al de la corteza interna (27.2%). Para los tres primeros, los resultados son similares a la solubilidad de la corteza de *B. pendula* (51.7%; Miranda *et al.*, 2013), de *Picea abies* (51.7%), y de *Pinus sylvestris* (50.4%) (Miranda *et al.*, 2012). Por otra parte, la solubilidad en álcali de la corteza interna de *Q. laurina* (27.2%), fue similar a la de la corteza de *E. globulus* (26.6%; Vásquez *et al.*, 2008). La corteza interna de los dos encinos tuvo una solubilidad menor en el álcali, lo que está en línea con su menor contenido de suberina. Una solubilidad alta en NaOH al 1% acompañado de un bajo contenido de suberina, como en la corteza interna de *Q. crassifolia*, sugiere una fuente potencial de polifenoles condensables en formaldehído (polifenoles Stiasny), un material adecuado para la producción de adhesivos (Kofujita *et al.*, 1999).

El contenido de ceniza fue similar en la corteza interna y externa en los dos encinos (2.68 a 3.83%), y representa 4-8 veces el contenido de ceniza de la madera. El contenido de ceniza aquí registrado, es superior al de la corteza de *Q. robur* (2.2%; Dietrichs *et al.*, 1978), y al del corcho de *Q. suber* (0.7%; Pereira, 1988), similar a la corteza de *B. pendula* (2.9%, Miranda *et al.*, 2013), pero es inferior al de

las cortezas de *Salix* sp. (11.5-13.1%), *Liquidambar* sp. (10.4-12.8%), y *Fraxinus* sp. (12.1-12.3%) (Fengel y Wegener, 1984).

Como se anticipaba, el contenido más alto de suberina se encontró en la corteza externa de los dos encinos; en ambas especies, el contenido de suberina en la corteza externa (20.1-26.6%), es similar a la del corcho de *Q. cerris* (28.5%; Şen *et al.*, 2010), pero menor al del corcho de *Q. suber* (41.0%; Pereira, 2013). Gandini *et al.* (2006) destacan la importancia de la suberina como fuente abundante de ácidos hidroxigrasos y dicarboxílicos, además de su aplicación emergente en la síntesis de materiales poliméricos. Los ácidos hidroxigrasos, además de hallarse en la corteza de los encinos, también se localizan en gran escala en las semillas de *Ricinus communis* y *Lesquerella* spp (Pinto *et al.*, 2009), pero en realidad, no son abundantes en la naturaleza.

Respecto a los polímeros estructurales, se encontraron en general contenidos altos de lignina (25.2-39.6%), más en la corteza externa de ambas especies, mientras que los mayores contenidos de holocelulosa fueron en la corteza interna (61-69%). En general, se han registrado valores altos de lignina en la corteza de diferentes especies, hasta del 44.7% (Dietrichs *et al.*, 1978; Feng *et al.*, 2013). El contenido de lignina en el corcho de *Q. suber*, varió de 20.7 a 33.0% (Pereira, 1988; Pinto *et al.*, 2009), y en la corteza de *E. globulus*, fue del 34.1% (Miranda *et al.*, 2013). La holocelulosa obtenida del material simplemente extraído, resultó muy elevada, probablemente porque el clorito de sodio acidificado no removió la totalidad de la suberina, y ésta aparece gravimétricamente como polisacárido. Así, en el Cuadro 6.2, se muestra el contenido de holocelulosa obtenido por diferencia del contenido de lignina, ceniza y suberina. La composición de la corteza interna y externa fue muy diferente con respecto al polisacárido dominante: en la corteza interna, la celulosa representa el 69-72% de los polisacáridos, mientras que en la corteza externa, las hemicelulosas representan el 64% de la holocelulosa. El contenido de holocelulosa en la corteza interna de nuestros dos encinos, es equiparable al 63.2% de la corteza de *Q. robur* (Dietrichs *et al.*, 1978), y al 62.6% de la corteza de *E. globulus* (Miranda *et al.*, 2012). La composición química de la corteza varía considerablemente entre individuos de la misma especie, y aún en un

mismo árbol: Pereira (1988) encontró diferencias de 34-45% en el contenido de suberina, de 20-25% en el de lignina, y de 15-20% en los polisacáridos, en el corcho de árboles individuales de *Q. suber*.

La composición de los monosacáridos en la corteza fue similar a la de la madera en ambas especies, aunque resalta una mayor concentración de xilosa, y una relevancia todavía menor de la glucomanana (Fig. 1).

### 6.5.3. Compuestos inorgánicos

El análisis cualitativo de las cenizas de madera y de corteza de las dos especies se muestra en el Cuadro 6.3. Los dos principales elementos químicos en la madera y la corteza fueron Ca y K, en ambas especies.

Cuadro 6.3. Compuestos inorgánicos en madera y corteza de *Q. laurina* y *Q. crassifolia*.

(%) <sup>a</sup>	<i>Q. laurina</i>				<i>Q. crassifolia</i>			
	Madera		Corteza		Madera		Corteza	
	SW	HW	Int.	Ext.	SW	HW	Int.	Ext.
Ca	21.1	17.9	36.3	37.3	9.10	8.00	16.2	26.2
K	13.2	11.9	8.55	4.32	22.0	18.5	16.7	5.02
Mg	6.70	6.50	2.05	1.77	8.80	8.00	3.63	4.14
Na	6.43	5.00	1.84	1.48	8.39	7.03	5.47	1.47
Mn	2.96	1.78	0.59	1.29	3.21	2.03	1.70	3.71
Fe	1.92	1.34	0.09	0.63	0.91	0.77	0.13	0.43
B	0.77	0.76	< 0.1	0.06	0.28	0.15	0.07	< 0.1
Cu	0.32	0.88	0.08	< 0.1	0.14	0.21	< 0.1	0.08
Zn	0.34	0.28	0.02	< 0.1	0.17	0.11	< 0.1	< 0.1

<sup>a</sup>Con respecto al peso anhidro de las cenizas. Ca, Mg y Zn, por espectrofotometría de absorción atómica, en un espectrofotómetro Solar (Unicam, GB). K y Na por espectrofotometría de emisión en un flamómetro digital 2655-00 (Cole Parmer, USA). B por fotolorimetría por reducción con molibdovanadato, en un espectrofotómetro Genesys 10S UV-Vis (Thermo Scientific, USA). No se determinaron otros elementos. SW, albura; HW, duramen.

En la ceniza de albura y duramen, el tercer mineral más abundante es el Mg. En el duramen de *Q. candicans*, Rutiaga *et al.* (2000) encontraron que el mineral más abundante es K, seguido de Mg. La variación en la composición de las cenizas está en función de las especies, de la parte del árbol, de la localización geográfica, y también de los procesos industriales (Siddique, 2012). Debido a su composición

química, la adición de ceniza en los cultivos modifica el pH del suelo, incrementando la disponibilidad de Ca y Mg para las plantas, y la incorporación al terreno de cultivo tiene potencial para mejorar la productividad del suelo (Baptista *et al.*, 2013). Por otro lado, Siddique (2012) destaca la factibilidad del uso de la ceniza de madera como aditivo para concreto en productos estructurales prefabricados.

### 3.4. Caracterización energética

En albura y duramen de las dos especies, el poder calorífico superior (PCS) varió de 19.3 a 19.4 MJ kg<sup>-1</sup> (Cuadro 6.4), comparables con los 19.8 MJ kg<sup>-1</sup> de 20 especies de la Amazonia Peruana (Uceda, 1984), y con el de 15 maderas del matorral espinoso tamaulipeco (19.7 MJ kg<sup>-1</sup>; Tello *et al.* 2014), pero superior al reportado por Kollman (1959) para maderas latifoliadas de clima templado (18.8 MJ kg<sup>-1</sup>).

El contenido energético de la madera de *Q. laurina* fue significativamente mayor que el de *Q. crassifolia* ( $p=0.011$ ). El duramen de *Q. crassifolia*, con más lignina y extractivos que la albura, presenta un incremento significativo del PCS respecto a la albura de la misma especie ( $p=0.048$ ). No se encontraron diferencias estadísticas significativas en el PCS de la corteza interna de las dos especies ( $p=0.510$ ); el PCS de la corteza fue menor al de la madera, quizás por su mayor contenido de ceniza, a pesar de su mayor contenido de carbono fijo (CF). El PCS del carbón vegetal de las dos especies varió de 32.0 a 33.3 MJ kg<sup>-1</sup>; estos valores son marginalmente menores a los 34.6 MJ kg<sup>-1</sup> reportados para el carbón vegetal de 11 especies latifoliadas por Rivera y Uceda (1987). Sin embargo, cumplen cómodamente con el requerimiento del PCS para carbón vegetal de las normas alemana DIN 51749 (27.8 MJ kg<sup>-1</sup>) (DIN, 1989), y europea EN 1860-2 (29.1 MJ kg<sup>-1</sup>) (BSI, 2005), y el del mercado japonés (30.5 MJ kg<sup>-1</sup>; Carrillo *et al.*, 2013). En el carbón de *Q. laurina* se encontraron más volátiles en la albura, mientras que en *Q. crassifolia* fue en el duramen. El contenido de volátiles en *Q. laurina* fue significativamente mayor al de *Q. crassifolia* ( $p=0.019$ ).

Cuadro 6.4. Características energéticas en madera, la corteza y el carbón vegetal de *Q. laurina* y *Q. crassifolia*

Especie	PCS (MJ kg <sup>-1</sup> )	CH (%)	Volat. (%)	AC (%)	CF (%)	Dn (g cm <sup>-3</sup> )	DE (GJ m <sup>-3</sup> )	IVC	Rendto. carbón <sup>a</sup> (%)
<i>Q. laurina</i>									
Albura	19.4	10.1	85.2	0.3	14.5	0.895	17.4	57,874	--
Duramen	19.4	10.4	84.7	0.4	14.9	0.883	17.1	38,209	--
Corteza	18.0	11.1	81.8	2.1	16.1	0.680	12.3	5,242	--
Carbón (SW)	32.3	6.4	27.8	1.0	71.1	0.423	13.7	20,520	30.0
Carbón (HW)	33.3	5.8	23.9	1.5	74.6	0.339	11.3	12,449	23.7
<i>Q. crassifolia</i>									
Albura	19.3	10.5	83.7	0.6	15.6	0.914	17.6	26,040	--
Duramen	19.4	10.4	81.6	1.0	17.5	0.858	16.6	16,768	--
Corteza	17.8	12.9	77.2	2.3	20.5	0.737	13.1	4,354	--
Carbón (SW)	32.8	3.9	21.1	2.5	76.4	0.459	15.0	15,705	23.3
Carbón (HW)	32.0	5.6	25.6	2.7	71.6	0.484	15.5	10,097	24.5

<sup>a</sup>Rendimiento del carbón vegetal en relación al peso anhidro inicial de la madera.

PCS, poder calorífico superior; CH, contenido de humedad; Volat., volátiles; AC, contenido de ceniza; CF, carbono fijo; Dn, densidad normal; DE, densidad energética; IVC, índice del valor del combustible.

El promedio de CF en el carbón de *Q. laurina* (72.9%) y de *Q. crassifolia* (74.0%), es apenas inferior al requerido para el carbón vegetal en Norteamérica (75%) (Sánchez-Rojas, 1997) y Alemania (75%) (DIN, 1989). Esto sugiere que de ajustarse la secuela, es posible alcanzar el CF requerido en las normas internacionales, con rendimientos muy aceptables, de 5.4 m<sup>3</sup> ton<sup>-1</sup> para *Q. laurina*, y 6.3 m<sup>3</sup> ton<sup>-1</sup> para *Q. crassifolia*, similares a los reportados por Bustamante *et al.* (2013) para el carbón vegetal de *Q. sideroxylla*, de 5.4 m<sup>3</sup> ton<sup>-1</sup> con un CF del 73.7%. Por otro lado, el bajo contenido de cenizas en la madera y el carbón vegetal de ambas especies, las hace atractivas para su utilización en calderas industriales (Werkelin *et al.*, 2011). De acuerdo a la clasificación de Tello *et al.* (2014), el Índice de Valor de Combustible (IVC) del carbón y la madera de *Q. laurina* fue en ambos casos Muy Alto, mientras que en *Q. crassifolia*, el IVC del carbón fue Alto, y el de la madera, Medio.

## 6.6. CONCLUSIONES

No se encontraron diferencias estadísticas en el contenido de polímeros estructurales en la madera de *Q. laurina* y *Q. crassifolia*; la diferencia en las dos especies se limitó a la concentración de los extractivos. La composición de la madera de los dos encinos fue típica comparada con otras especies del mismo género, resaltando un contenido alto de carbohidratos. Por el contenido de suberina en la corteza externa, ambas especies podrían evaluarse para la obtención de materiales poliméricos, y la corteza interna de *Q. crassifolia* tiene potencial para la extracción de polifenoles Stiasny. El PCS de las dos maderas es mayor al reportado para otras latifoliadas de clima templado. Se propone que con una pirólisis controlada, es factible obtener un carbón vegetal que cumpla con los estándares comerciales internacionales. También es viable utilizar indistintamente las dos especies para fabricar carbón vegetal.

## 6.7. REFERENCIAS

- Aldrich, P.R., Cavender-Bares, J., 2011. *Quercus*. In: Kole, C. (Ed.), Wild Crop Relatives: Genomic and Breeding Resources, Forest Trees. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp. 89-129.
- ASTM, 1976. Standard test method for alpha-cellulose in wood. D 1103-60. ASTM International, West 400 Conshohocken, PA. 2 p.
- ASTM, 2006. Standard test method for volatile matter in the analysis of particulate wood fuels. E 872-82. ASTM International, West 400 Conshohocken, PA. 3 p.
- ASTM, 2006. Standard test methods for analysis of wood fuels. E 870-82. ASTM International, West 400 Conshohocken, PA. 2 p.
- ASTM, 2007. Volume 04.10: Wood. ASTM International, West 400 Conshohocken, PA.

- ASTM, 2013. Standard test method for gross calorific value of coal and coke. D 5865-13. ASTM International, West 400 Conshohocken, PA. 19 p.
- Baptista, I., Miranda, I., Quilhó, T., Gominho, J., Pereira, H., 2013. Characterisation and fractioning of *Tectona grandis* bark in view of its valorisation as a biorefinery raw-material. *Ind. Crop. Prod.* 50, 166-175.
- Bárcenas, G.M., Ríos-Villa, R., Aguirre-Rivera, J.R., Juárez-Flores, B.I., Honorato-Salazar, J.A., 2008. Composición química y densidad básica relativa de la madera de dos especies arbustivas de encino blanco de la Sierra de Álvarez, SLP, México. *Madera Bosques* 14, 81-94.
- Bautista, R., Honorato, J.A., 2005. Composición química de la madera de cuatro especies del género *Quercus*. *Revista Ciencia Forestal en México* 30, 25-49.
- BSI, 2005. European Norm EN 1860-2. Appliances, solid fuels and firelighters for barbecuing - Part 2: Barbecue charcoal and barbecue charcoal briquettes - Requirements and test methods. The British Standards Institution, London, UK, 27 p.
- Bustamante, V., Carrillo-Parra, A., González-Rodríguez, H., Ramírez-Lozano, R.G., Corral-Rivas, J.J., Garza-Ocañas, F., 2013. Evaluation of a charcoal production process from forest residues of *Quercus sideroxylla* Humb., & Bonpl. in a Brazilian beehive kiln. *Ind. Crop. Prod.* 42, 169-174.
- Carrillo, A., Foroughbakhch, R., Bustamante, V., 2013. Calidad del carbón de *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. Ex Willd.) M.C. Johnst. y *Ebenopsis ebanum* (Berland.) Barneby & J.W. Grimes elaborado en horno tipo fosa. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 4, 62-71.
- Dietrichs, H.H., Garves, K., Behrendorf, D., Sinner, M., 1978. Investigation on the carbohydrates of barks of home-grown trees. *Holzforschung* 32, 60-67.
- DIN, 1989. Standard 51749: Grill charcoal and grill charcoal briquettes; requirements, tests. Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin, 4 p.
- Feng, S., Cheng, S., Yuan, Z., Leitch, M., Xu, C.C., 2013. Valorization of bark for chemicals and materials: A review. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 26, 560-578.

- Fengel, D., Wegener, G., 1984. Wood: Chemistry, ultrastructure, reactions. Walter de Gruyter, Berlin.
- Foster, C.E., Martin, T.M., Pauly, M., 2010. Comprehensive compositional analysis of plant cell walls (lignocellulosic biomass) Part II: carbohydrates. J. Vis. Exp. 37, 1837.
- Gandini, A., Neto, C.P., Silvestre, A.J., 2006. Suberin: a promising renewable resource for novel macromolecular materials. Prog. Polym. Sci. 31, 878-892.
- Honorato, J.A., Hernández, J., 1998. Determinación de componentes químicos de la madera de cinco especies de encino del estado de Puebla. Madera Bosques 4, 79-93.
- Honorato, J.A., 2002. Química de la madera de encino. In: Quintanar, O.J. (Ed.), Características, propiedades y procesos de transformación de la madera de los encinos de México. INIFAP-CIRCE. C. E. San Martinito, Puebla, México, pp. 86-106.
- Kofujita, H., Etyu, K., Ota, M., 1999. Characterization of the major components in bark from five Japanese tree species for chemical utilization. Wood Sci. Technol. 33, 223-228.
- Kollman, F., 1959. Tecnología de la Madera. Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias y Servicio de la Madera, Madrid.
- Miranda, I., Gominho, J., Mirra, I., Pereira, H., 2012. Chemical characterization of barks from *Picea abies* and *Pinus sylvestris* after fractioning into different particle sizes. Ind. Crop. Prod. 36, 395-400.
- Miranda, I., Gominho, J., Mirra, I., Pereira, H., 2013. Fractioning and chemical characterization of barks of *Betula pendula* and *Eucalyptus globulus*. Ind. Crop. Prod. 41, 299-305.
- Moya, R., Arce, V., 2006. Estudio del efecto del espaciamiento sobre el peso específico básico y contracciones en plantaciones de teca (*Tectona grandis* L.) de 10 años en Guanacaste, Costa Rica. Revista Forestal Mesoamericana Kurú 3, 1-11.

- Penninckx, V., Glineur, S., Gruber, W., Herbauts, J., Meerts, P., 2001. Radial variations in wood mineral element concentrations: a comparison of beech and pedunculate oak from the Belgian Ardennes. *Ann. For. Sci.* 58, 253-260.
- Pereira, H., 1988. Chemical composition and variability of cork from *Quercus suber* L. *Wood Sci. Technol.* 22, 211-218.
- Pereira, H., 2013. Variability of the chemical composition of cork. *Bioresources* 8, 2246-2256.
- Pinto, P.C., Sousa, A.F., Silvestre, A.J., Neto, C.P., Gandini, A., Eckerman, C., Holmbom, B., 2009. *Quercus suber* and *Betula pendula* outer barks as renewable sources of oleochemicals: A comparative study. *Ind. Crop. Prod.* 29, 126-132.
- Pizzi, A., Salvadó, J., 2007. Lignin-based wood panel adhesives without formaldehyde. *Holz Roh. Werkst.* 65, 65-70.
- Rivera, I.P., Uceda, C.M., 1987. Características físico-químicas de la madera y carbón de once especies forestales de la Amazonia Peruana. *Revista Forestal del Perú* 14, 62-73.
- Ruiz-Aquino, F., Valdez-Hernández, J.I., Romero-Manzanares, A., Manzano-Méndez, F., Fuentes-López, M.E., 2014a. Distribución espacial de dos encinos y atributos ecológicos de comunidades cohabitadas en la Sierra Juárez, Oaxaca. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente (Submitted)*.
- Ruiz-Aquino, F., Valdez-Hernández, J.I., Manzano-Méndez, F., Rodríguez-Ortiz, G., Romero-Manzanares, A., Fuentes-López M.E., 2014b. Ecuaciones de biomasa aérea para *Quercus laurina* y *Q. crassifolia* en Oaxaca, México. *Madera Bosques (In press)*.
- Ruiz-Aquino, F., González-Peña, M.M., Valdez-Hernández, J.I., Romero-Manzanares, A., 2014c. Estructura anatómica de la madera de dos encinos de Oaxaca. *Madera Bosques (Submitted)*.

- Rutiaga, J.G., Weiderpass, E., Strobel, C., 2000. Composición química del duramen de la madera de *Quercus candicans* Neé. *Madera Bosques* 6, 73-80.
- Sánchez-Rojas, L., 1997. Métodos de producción de carbón vegetal en México. PhD Thesis. Pacific Western University, Los Angeles, USA, 115 p.
- Şen, A., Miranda, I., Santos, S., Graça, J., Pereira, H., 2010. The chemical composition of cork and phloem in the rhytidome of *Quercus cerris* bark. *Ind. Crop. Prod.* 31, 417-422.
- Siddique, R., 2012. Utilization of wood ash in concrete manufacturing. *Resour. Conserv. Recy.* 67, 27-33
- TAPPI, 1994. Method T249 cm-85: Carbohydrate composition of extractive-free wood and wood pulp by gas-liquid chromatography. TAPPI Test Methods. TAPPI Press, Atlanta, 5 p.
- TAPPI, 1991. Method UM250: Acid-soluble lignin in wood and pulp. TAPPI Useful Methods. TAPPI Press, Atlanta, pp 47-48
- Tello, S.K., Hernández, D.I., González-Peña, M.M., Revilla, U.S., Carrillo, A., Ruiz-Aquino, F., 2014. Fuel characteristics of wood and charcoal of fifteen thornscrub species from Tamaulipas, Mexico. *Biomass Bioenergy*. (*Submitted*).
- Uceda, C.M.E., 1984. Determinación del poder calorífico de 20 especies forestales de la Amazonía Peruana. *Revista Forestal del Perú* 12, 1-15.
- Valencia, A.S., 2004. Diversidad del género *Quercus* (Fagaceae) en México. *Bol. Soc. Bot. Mex.* 75, 33-53
- Valencia, A.S., Nixon, K.C., 2004. Encinos. In: García-Mendoza, A.J., Ordóñez, M.J., Briones-Salas, M. (Eds.), *Biodiversidad de Oaxaca*. Instituto de Biología, UNAM, México, pp. 219-225.
- Vázquez, G., Fontenla, E., Santos, J., Freire, M.S., González-Álvarez, J., Antorrena, G., 2008. Antioxidant activity and phenolic content of chestnut (*Castanea sativa*) shell and eucalyptus (*Eucalyptus globulus*) bark extracts. *Ind. Crop. Prod.* 28, 279–285.

- Villalvazo, N.J., Faix, O., Grellmann, K.A., 1981. Los encinos mexicanos como materia prima para la fabricación de celulosa y papel. IMCyP. Suplemento Técnico No. 1. 8 p.
- Werkelin, J., Lindberg, D., Boström, D., Skrifvars, B.J., Hupa, M., 2011. Ash-forming elements in four Scandinavian wood species part 3: Combustion of five spruce samples. *Biomass Bioenergy*. 35, 725-733.
- Young, H.E., 1971. Preliminary estimates of bark percentage and chemical elements in complete trees of eight species in Maine. *Forest Prod. J.* 21, 56-59.

## DISCUSION GENERAL

El aprovechamiento integral de las especies forestales requiere del conocimiento ecológico y de la productividad de las especies de interés, que aunado al conocimiento tecnológico de la madera, permiten tener los elementos para definir el rumbo conveniente de la producción forestal. Dada la importancia del género *Quercus* en la comunidad de Ixtlán de Juárez, Oaxaca, y derivado de la necesidad de conocer el comportamiento de la madera en diferentes procesos tecnológicos, en el presente estudio se evaluó la estructura de la comunidad donde cohabitan, así como su productividad en términos de biomasa aérea y las propiedades tecnológicas de su madera.

En el bosque de pino-encino de Ixtlán de Juárez, Oaxaca, se encontraron rodales con dominancia de especies del género *Quercus* sobre coníferas y otras latifoliadas. En tres unidades de muestreo (UM) establecidas, se registraron un total de 799 individuos pertenecientes a 19 especies y 11 familias; la familia más abundante fue Fagaceae (628 individuos en cuatro especies), como se esperaba, debido a que las UM se establecieron en rodales de encino. El estrato superior también estuvo dominado fisonómicamente por *Quercus*, a diferencia de lo reportado por Castellanos-Bolaños *et al.* (2008), en el mismo bosque mixto de pino-encino donde dominó el estrato superior de *Pinus* spp. En los rodales de encino, se encontraron densidades totales de 892 a 1208 árboles ha<sup>-1</sup>, en donde los más altos índices de valor de importancia e índices de valor forestal, fueron para *Q. laurina* Humb. & Bonpl. y *Q. crassifolia* Humb. & Bonpl. En la sierra de Coahuila Encina-Domínguez (2009), reportó una densidad mayor para *Q. mexicana* Humb. & Bonpl. (1480 árboles ha<sup>-1</sup> con área basal de 9.00 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>) y para *Q. greggii* Trel. (284 árboles ha<sup>-1</sup> con 5.68 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>). Sin embargo, el promedio de área basal de las tres UM del presente estudio 15.7 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> y 20.2 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> para *Q. laurina* y *Q. crassifolia*, respectivamente, fue mayor a las reportadas en la sierra de Coahuila. Unas condiciones físicas más favorables en el bosque de Ixtlán de Juárez, Oaxaca comparado con las de la sierra de Coahuila, explicarían la presencia de diámetros mayores en *Q. laurina* y *Q. crassifolia*. La importancia forestal y económica en esta zona, ha sido atribuida a la distribución y abundancia de especies de pino como: *Pinus pseudostrobus* var.

*apulcensis* (Lindl.) Martínez, *P. pseudostrobus* Lindl. var *pseudostrobus*, *P. patula* Schiede y Deppe, y *P. rudis* Endl., que alcanzan alturas máximas de entre 30 y 40 m (Álvarez y Rubio, 2013). No obstante, los atributos ecológico-estructurales de estos bosques demostraron que los encinos pueden ser árboles potencialmente útiles si se determina que tienen propiedades de interés para su aprovechamiento y potencial valor agregado. Algunas propiedades de la madera de encinos han sido expuestas por Honorato y Fuentes (2001), De la Paz *et al.* (2006), De la Paz y Dávalos (2008), y Flores *et al.* (2013).

Se comprobó que *Q. laurina* y *Q. crassifolia* alternan sus patrones de distribución entre aleatorio y agregado. Para las especies con el mayor IVI en cada UM, los patrones de distribución espacial fueron aleatorios. El estudio de la distribución espacial representa la base para conocer el estado que guardan las especies dentro del bosque y pueden revelar los mecanismos a los que han estado expuestas (Linzaga-Román *et al.*, 2011). Como en este caso, el patrón agregado de las especies individuales se atribuye a estrategias de regeneración y prácticas silvícolas en la zona, pero ambas especies pueden coexistir en un mismo lugar, modificando su importancia estructural y su patrón de distribución horizontal.

En las tres UM se midieron un total de 312 árboles de *Q. laurina* y 314 de *Q. crassifolia*. La biomasa aérea total para *Q. laurina* se estimó en 100.15 Mg ha<sup>-1</sup> y para *Q. crassifolia* en 129.97 Mg ha<sup>-1</sup>; en ambos casos, estos valores se estimaron mediante la ecuación exponencial  $y = e^{[-\beta_0 + \beta_1 \ln(DN^2 \times AT)]}$  que, comparada con ecuaciones generadas para diferentes especies de *Quercus*, fue la que presentó los mejores coeficientes de ajuste. Estudios anteriores agruparon a especies del género *Quercus* en una sola ecuación (Ayala-López *et al.* 2001; Rodríguez-Laguna *et al.*, 2007 y Domínguez-Cabrera *et al.*, 2009). Sin embargo, al utilizarlas con los datos que se generaron en el presente estudio, sobreestimaron la acumulación de biomasa en 62.9% o subestimaron en 21.8%, debido a que su utilización está restringida a los grupos para los que fueron establecidas. Es importante mencionar que las ecuaciones que se generaron en este estudio pueden ser utilizadas en bosques que

compartan las mismas condiciones de crecimiento y son aplicables a las especies aquí descritas.

La distribución proporcional de biomasa por compartimento de *Q. laurina* fue 82.9, 14.9 y 2.2% para fustes, ramas y follaje, respectivamente, mientras que para *Q. crassifolia* la distribución fue similar con 82.3, 16.0 y 1.7% en el mismo orden. Los valores de biomasa obtenidos se relacionaron con promedios altos de área basal ( $24.7 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ ), altura total (14.5 m) y densidad arbórea ( $835 \text{ árboles ha}^{-1}$ ), parámetros asociados con condiciones ambientales favorables, como alta humedad relativa y suelos fértiles. Vale la pena destacar que la biomasa aérea por unidad de superficie acumulada por estas especies, supera ampliamente la biomasa reportada para el género *Quercus* en diferentes bosques de la República Mexicana, de acuerdo con la información publicada por Rojas-García y Villers-Ruiz (2008), Rodríguez-Laguna *et al.* (2009), y Silva-Arredondo y Navar-Chaidez (2010).

La importancia potencial de estos hallazgos conlleva a proponer a *Q. laurina* y *Q. crassifolia*, como especies que pueden ser consideradas para el mercado del carbono para el pago por servicios ambientales, como una medida de conservación para las áreas forestales en las que habitan. Por otro lado, los factores de expansión de biomasa obtenidos para estas especies permitieron realizar estimaciones confiables de biomasa por unidad de área, al incorporar variables registradas en operaciones de inventarios forestales.

En general, la retención de carbono por un tiempo prolongado, principalmente en su fuste, favorece para darle un uso apropiado a la madera, con la seguridad de ofrecer una vida útil larga, suficiente razón para aprovecharla en construcción, mobiliario, artículos deportivos, etc., aunque las aplicaciones al final, están en función de las propiedades tecnológicas de la madera *e.g.*, composición química, estructura anatómica y propiedades físico-mecánicas; como las referidas para encinos de México por Quintanar (2002) y Flores *et al.* (2013).

Para descubrir ese potencial tecnológico, se procedió a trabajar en la madera de los encinos de interés. La madera de *Q. laurina* presentó una tonalidad más clara con respecto a *Q. crassifolia*, y el atractivo veteado de estos dos encinos también reportado por De la Paz *et al.* (2006) y De la Paz y Dávalos (2008), permite disponer

su utilización en productos decorativos. Las dos especies mostraron semejanza en todos sus caracteres microscópicos, aunque en *Q. crassifolia* se encontraron fibras septadas, algo que no se había reportado antes para esta especie. Sin embargo, en muy pocas fibras de *Q. crassifolia* se observaron septos, por lo que no deberá tomarse como un parámetro que pueda caracterizar a esta especie. Estadísticamente se determinaron diferencias significativas entre las dos especies para el ancho de los radios uniseriados en albura y duramen, número de poros por mm<sup>2</sup> en duramen y en el diámetro de poros menores a 150 µm en albura y duramen. Se determinaron altas correlaciones del espesor de pared de las fibras con la densidad básica en *Q. laurina* y con la contracción volumétrica en *Q. crassifolia*, así como entre la contracción volumétrica y el diámetro de las fibras para ambas especies. Lo anterior confirma lo reportado por De la Paz (2000), quien señala que las dimensiones de las fibras junto con los radios multiseriados son las variables que más influyen el comportamiento físico y son las determinantes de la estabilidad dimensional de la madera.

Por otra parte, la dureza alta indica que la madera de estas especies puede utilizarse en la fabricación de pisos de tráfico pesado, una utilidad de valor agregado para estas especies. Aunque, con una posible desventaja, por las altas contracciones volumétricas y en particular, por la alta relación de anisotropía, condiciones indicadoras de que la madera de estos encinos será susceptible a presentar defectos al secado y mucho movimiento en servicio, debido a la inestabilidad dimensional causada por cambios en la humedad ambiental, situación que podría ser minimizada empleando madera a un contenido de humedad equilibrado con el ambiente y con un recubrimiento que disminuya el intercambio de humedad relativa con el medio. También, es factible la utilización de esta madera tanto en interiores como en exteriores, en estados del país donde se observen déficits en la humedad ambiental, como Chihuahua, Coahuila, Nuevo León y Durango (Capel-Molina, 1980; SMN, 2011). Lo que implicaría el traslado de la madera fuera de la comunidad de Ixtlán de Juárez, Oaxaca y con esto se lograría una mayor comercialización de la madera de encinos.

La resistencia mecánica y las propiedades físicas de la madera de *Q. laurina* y *Q. crassifolia* son comparables con las de otros encinos. Por ejemplo, *Quercus laeta* Liemb. de Durango (Nájera *et al.*, 2005), cinco especies de Guanajuato (Honorato y Fuentes, 2001) y 24 especies de *Quercus* en México (De la Paz y Dávalos, 2008). En todas las formas de esfuerzo, la resistencia en condición seca fue más alta que en condición verde. Las propiedades físicas y mecánicas de la madera de las dos especies tuvieron una marcada correlación con la densidad y con las propiedades que relacionan su contenido de humedad con la estabilidad dimensional (punto de saturación de la fibra, contracción volumétrica y tangencial). En este mismo sentido, Carrillo *et al.* (2011) encontraron que para 14 especies del noreste de México, la densidad fue un buen indicador de la calidad de la madera en términos de su resistencia mecánica. La madera de *Q. laurina* fue en general más densa y resistente que la de *Q. crassifolia*, pero el incremento de la resistencia de *Q. laurina* fue proporcional al incremento de su densidad, excepto por la dureza. Los modelos estadísticamente significativos para predecir parámetros mecánicos a partir de propiedades físicas de fácil evaluación, ayudarán a identificar las posibilidades de agregar valor a la madera de las dos especies de encino estudiadas.

La composición de la madera de los dos encinos fue típica comparada con 12 especies del mismo género, donde se resalta un alto contenido de carbohidratos (Honorato, 2002). El contenido de polímeros estructurales no presentó diferencias estadísticas significativas entre la madera de *Q. laurina* y *Q. crassifolia*; la diferencia entre ambas especies se limitó a la concentración de extractivos. Algunos estudios sobre caracterización química en la corteza de encinos se han realizado para especies como: *Q. robur* L. de Europa (Dietrichs *et al.*, 1978), *Q. suber* L. en Portugal (Pereira 1988; Pereira, 2013) y *Q. cerris* L. en Turquía (Sen *et al.*, 2010). Sin embargo, para la corteza de *Q. laurina* y *Q. crassifolia*, y en general para especies mexicanas de encinos no se tienen reportes sobre la caracterización química de la corteza. Por lo anterior, el presente estudio, sentará las bases para un aprovechamiento integral y un valor agregado de la corteza. Se determinó que la corteza externa de *Q. laurina* y *Q. crassifolia*, podría evaluarse para la obtención de materiales poliméricos debido a su alto contenido de suberina. La suberina destaca

como una fuente importante de ácidos hidroxigrasos y dicarboxílicos Gandini *et al.* (2006), que no es abundante en la naturaleza y sólo se encuentra a gran escala en las semillas de *Ricinus communis* L. y *Lesquerella* spp (Pinto *et al.*, 2009). En las especies del presente estudio el contenido más alto de suberina se encontró en la corteza externa (20.1-26.6%), con valores similares a la del corcho de *Q. cerris* (28.5%; Şen *et al.*, 2010), pero menor al del corcho de *Q. suber* (41.0%; Pereira, 2013).

La caracterización energética mostró que el poder calorífico superior (PCS) de las dos maderas es mayor al reportado por Kollman (1959) para maderas latifoliadas de clima templado ( $18.8 \text{ MJ kg}^{-1}$ ), comparables con los  $19.8 \text{ MJ kg}^{-1}$  de 20 especies de la Amazonia Peruana (Uceda, 1984), y con los  $19.7 \text{ MJ kg}^{-1}$  de 15 maderas del matorral espinoso tamaulipeco (Tello *et al.* 2014). Además, por el bajo contenido de cenizas y extractivos, y por la acumulación de biomasa aérea, es factible la utilización de las dos especies como biocombustibles en calderas industriales. Respecto al carbón de las dos especies, el PCS varió de 32.0 a  $33.3 \text{ MJ kg}^{-1}$ ; estos valores cumplen con el requerimiento del PCS para carbón vegetal de las normas alemana DIN 51749 ( $27.8 \text{ MJ kg}^{-1}$ ) (DIN, 1989), y europea EN 1860-2 ( $29.1 \text{ MJ kg}^{-1}$ ) (BSI, 2005). El promedio de carbono fijo en el carbón de *Q. laurina* (72.9%) y de *Q. crassifolia* (74.0%), es apenas inferior al requerido para el carbón vegetal en Norteamérica (75%) (Sánchez-Rojas, 1997) y Alemania (75%) (DIN, 1989). Esto sugiere que a partir de la información generada en el presente estudio, con una pirólisis controlada, es posible obtener un carbón vegetal que cumpla con los estándares comerciales internacionales.

## REFERENCIAS

- Álvarez S. y Rubio A. 2013. Carbon baseline in a mixed pine-oak forest in the Juarez Mountain range (Oaxaca, Mexico). Using the CO2FIX V.3.2 model. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 19 (1): 125-137.
- Ayala-López R., B. H. De Jong y H. Ramírez-Maldonado. 2001. Ecuaciones para estimar biomasa en la meseta central de Chiapas. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 7(2): 153-157.
- BSI, 2005. European Norm EN 1860-2. Appliances, solid fuels and firelighters for barbecuing - Part 2: Barbecue charcoal and barbecue charcoal briquettes - Requirements and test methods. The British Standards Institution, London, UK, 27 p.
- Capel-Molina J. J. 1980. La humedad relativa en los Estados Unidos Mexicanos. *Paralelo* 37(4): 175-190.
- Carrillo A., M. Garza, M. J. Nañez, F. Garza, R. Foroughbakhch y S. Sandoval. 2011. Physical and mechanical wood properties of 14 timber species from Northeast Mexico. *Annals of Forest Science* 68: 675-679.
- Castellanos-Bolaños J. F., Treviño-Garza, E. J., Aguirre-Calderón, O. A. Jiménez-Pérez, J., Musalem-Santiago, M. R. López-Aguillón. 2008. Estructura de bosques de pino pátula bajo manejo en Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México. *Madera y Bosques* 14(2): 51-63.
- De la Paz P.-O. C y R. Dávalos S. 2008. Algunas características anatómicas y tecnológicas de la madera de 24 especies de *Quercus* (encinos) de México. *Madera y Bosques* 14(3): 43-80.
- De la Paz P.-O. C. 2000. Relación estructura propiedades físico-mecánicas de la madera de algunas especies de encinos (*Quercus*) mexicanas. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias. UNAM. 266 p.
- De la Paz P.-O. C., S. V. Jiménez, y J. C. Romero. 2006. Anatomía de la madera de ocho especies de *Quercus* (Fagaceae) de Oaxaca, México. *Madera y Bosques* 12(1): 63-94.

- Dietrichs H.H., Garves, K., Behrens Dorf, D., Sinner, M., 1978. Investigation on the carbohydrates of barks of home-grown trees. *Holzforschung* 32, 60-67.
- DIN. 1989. Standard 51749: Grill charcoal and grill charcoal briquettes; requirements, tests. Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin, 4 p.
- Domínguez-Cabrera G., O. Aguirre-Calderón, J. Jiménez-Pérez, R. Rodríguez-Laguna y J. A. Díaz-Balderas. 2009. Biomasa aérea y factores de expansión de especies arbóreas en bosques del sur de Nuevo León. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 15(1): 59-64.
- Encina-Domínguez J. A., Zárate-Lupercio, A., Estrada-Castillón, E., Valdés-Reyna, J. y J. Villarreal-Quintanilla. 2009. Composición y aspectos estructurales de los bosques de encino de la sierra de Zapalinamé, Coahuila, México. *Acta Botánica Mexicana* 86: 71-108.
- Flores V. R., M. E. Fuentes L., J. Quintanar O. y J. C. Tamarit U. 2013. Maquinado de cuatro especies maderables de encino de la sierra de Juárez, Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 4(16): 22-33.
- Gandini A., Neto, C.P., Silvestre, A.J., 2006. Suberin: a promising renewable resource for novel macromolecular materials. *Progress in Polymer Science* 31: 878-892.
- Honorato S. J. A. 2002. Química de la madera de encino. In: Quintanar, O.J. (Ed.), *Características, propiedades y procesos de transformación de la madera de los encinos de México*. INIFAP-CIRCE. C. E. San Martinito, Puebla, México, pp. 86-106.
- Honorato S. J. A. y M. E. Fuentes L. 2001. Propiedades físico-mecánicas de la madera de cinco especies de encino del estado de Guanajuato. *Revista Ciencia Forestal en México* 26(90): 5-28.
- Kollman F. 1959. *Tecnología de la Madera*. Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias y Servicio de la Madera, Madrid.
- Linzaga-Román B. E., G. Ángeles-Pérez, C. Catalán-Heverástico y P. Hernández de la Rosa. (2011). Estructura espacial de *Pachycereus weberi* (Coult.) Backeb. en la Cañada del Zopilote, Guerrero. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 17(2): 189–198.

- Nájera J. A., A. Vargas, J. Méndez y J. Graciano. 2005. Propiedades físicas y mecánicas de la madera en *Quercus laeta* Liemb. de El Salto, Durango. *Ra Ximhai* 1: 559-576.
- Pereira H. 1988. Chemical composition and variability of cork from *Quercus suber* L. *Wood Science and Technology* 22: 211-218.
- Pereira H., 2013. Variability of the chemical composition of cork. *Bioresources* 8: 2246-2256.
- Pinto P.C., A. F. Sousa, A. J. Silvestre, C. P. Neto, A. Gandini, C. Eckerman y B. Holmbom. 2009. *Quercus suber* and *Betula pendula* outer barks as renewable sources of oleochemicals: A comparative study. *Industrial Crops and Products* 29: 126-132.
- Quintanar O. J. 2002. Características, propiedades y procesos de transformación de la madera de los encinos de México. INIFAP-CIRCE. C. E. San Martinito. Puebla, México. Libro técnico No. 2. 194 p.
- Rodríguez-Laguna R., J. Jiménez-Pérez, O. Aguirre-Calderón y E. Jurado-Ibarra. 2007. Ecuaciones alométricas para estimar biomasa aérea en especies de encino y pino en Iturbide, N. L. *Ciencia Forestal en México* 32(101): 39-56.
- Rodríguez-Laguna R., J. Jiménez-Pérez, O. Aguirre-Calderón, E. J. Treviño-Garza y R. Razo-Zárate. 2009. Estimación de carbono almacenado en el bosque de pino-encino en la Reserva de la Biósfera el Cielo, Tamaulipas, México. *Ra Ximhai* 5(3): 317-327.
- Rojas-García F. y L. Villers-Ruiz. 2008. Estimación de la biomasa forestal del Parque Nacional Malinche Tlaxcala-Puebla. *Ciencia Forestal en México* 33(104): 59-86.
- Sánchez-Rojas L., 1997. Métodos de producción de carbón vegetal en México. PhD Thesis. Pacific Western University, Los Angeles, USA, 115 p.
- Şen A., I. Miranda, S. Santos, J. Graça y H. Pereira. 2010. The chemical composition of cork and phloem in the rhytidome of *Quercus cerris* bark. *Industrial Crops and Products* 31: 417-422.

- Servicio Meteorológico Nacional. 2011. Reporte anual. Gerencia de meteorología y climatología. Comisión Nacional del agua. Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/climatologia/analisis/reporte/Anual2011.pdf>
- Silva-Arredondo F. M. y J. Navar-Cháidez. 2010. Factores de expansión de biomasa en comunidades forestales templadas del norte de Durango, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 1(1): 55-62.
- Tello S.K., D. I. Hernández, M. M. González-Peña, U. S. Revilla, A. Carrillo y F. Ruiz-Aquino. 2014. Fuel characteristics of wood and charcoal of fifteen thornscrub species from Tamaulipas, Mexico. *Biomass and Bioenergy* (*Submitted*).
- Uceda C.M.E., 1984. Determinación del poder calorífico de 20 especies forestales de la Amazonía Peruana. *Revista Forestal del Perú* 12: 1-15.

## CONCLUSIONES GENERALES

- En el bosque de pino-encino de Ixtlán de Juárez, Oaxaca, *Q. laurina* Humb. & Bonpl. y *Q. crassifolia* Humb. & Bonpl., resaltan por su importancia ecológica y estructural, dominando fisonómicamente el estrato superior del bosque y alternando sus patrones de distribución horizontal entre aleatorio (especie con el mayor IVI en cada UM) y agregado (atribuido a las estrategias de repoblación y prácticas silvícolas en la zona), demostrando así su coexistencia en la comunidad vegetal.
- La cantidad de biomasa aérea por unidad de superficie acumulada en *Q. laurina* y *Q. crassifolia*, indica un gran potencial para que estas especies puedan ingresar al mercado del carbono como una alternativa para propósitos de conservación forestal. Además, si el destino final es el aserrío se sugiere el uso de la madera en productos con una vida útil prolongada e.g. pisos, estructuras de madera, muebles, etc., en esta forma también se mantiene por más tiempo el carbono acumulado.
- Desde el punto de vista tecnológico y con base en los resultados obtenidos, es evidente que los encinos estudiados tienen alto potencial para ser aprovechados con fines industriales: en productos decorativos para beneficiarse de su atractivo vetado; en pisos de tráfico pesado para aprovechar la dureza lateral de la madera; en estructuras de madera donde se manifiestan sus favorables propiedades de resistencia; en mangos para herramientas por su buena resistencia al impacto, etc. Sin embargo, los retos tecnológicos principales para el aprovechamiento con fines maderables se concentran en el proceso de secado, debido a la inestabilidad dimensional y la alta tendencia a presentar defectos durante este proceso, en especial, por la presencia de rayos multiseriados. Los modelos significativos para predecir propiedades mecánicas a partir de las propiedades físicas, coadyuvan a identificar las posibilidades de agregar valor a la madera de las dos especies.
- Es factible la utilización de las ramas y trozas no aptas para el aserrío, como combustible, ya sea como madera o en la fabricación de carbón, que por sus

excelentes características de este último, puede fácilmente competir con el carbón de calidad de exportación.

- Es importante el potencial que tiene la corteza de ambos encinos para la producción de resinas sintéticas y adhesivos (materiales poliméricos), debido al alto contenido de suberina, fuente importante de ácidos hidroxigrasos y dicarboxílicos. Los productos derivados incrementarían notablemente el valor agregado de la corteza de *Q. laurina* y *Q. crassifolia* especies que actualmente están siendo subutilizadas a nivel local, en Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México.

## RECOMENDACIONES

- Evaluar los patrones de distribución espacial para árboles de *Quercus laurina* y *Q. crassifolia* tanto en periodo de desarrollo juvenil como en adulto, para determinar la correlación espacial de ambos estadios de desarrollo.
- Desarrollar y validar ecuaciones que requieran un menor número de muestras para la estimación de biomasa aérea sin perder confiabilidad.
- Establecer patrones de corte en el aserrío que disminuyan la producción de piezas de corte tangencial, debido a que en éstas, se acentúan los defectos en la madera durante el proceso de secado.
- Se recomienda evaluar la calidad y el tiempo de secado de ambas especies bajo un mismo programa de secado.
- Evaluar la influencia que tienen las sustancias orgánicas de bajo peso molecular sobre las propiedades físicas y mecánicas de la madera.
- Promover estudios sobre la caracterización de la corteza de diferentes especies, y proponer nuevos usos de acuerdo con los resultados obtenidos.
- Continuar con investigaciones sobre la composición química y las propiedades energéticas de especies latifoliadas del bosque de Ixtlán de Juárez, Oaxaca, para identificar la posibilidad de utilizarlas como dendroenergéticos.
- Con base en la calidad del carbón vegetal de los encinos estudiados, se recomienda verificar la factibilidad de utilizarlo a escalas industriales.
- Establecer una secuela de fabricación de carbón vegetal que optimice el rendimiento y cumpla con los parámetros requeridos por las normas internacionales.