



COLEGIO DE POSTGRADUADOS
INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN
EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

FORESTAL

**CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO DE ESPECIES ARBÓREAS
EN UNA PLANTACIÓN DE ENRIQUECIMIENTO DE ACAHUALES
EN EL SUR DE OAXACA**

ROLANDO GALAN LARREA

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2007

La presente tesis titulada “Crecimiento y rendimiento de especies arbóreas en una plantación de enriquecimiento de acahuales en el Sur de Oaxaca”, realizada por el alumno ROLANDO GALAN LARREA, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS
FORESTAL

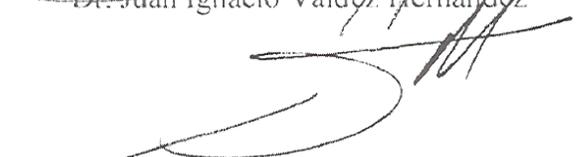
Consejo Particular

CONSEJERO



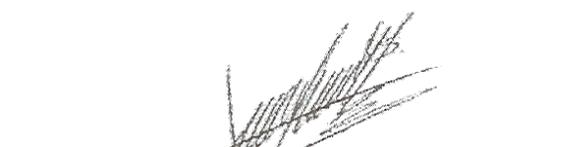
Dr. Juan Ignacio Valdez Hernández

ASESOR



Dr. Héctor Manuel de los Santos Posadas

ASESOR



Dr. José Amador Honorato Salazar

ASESOR



M.C. José Luis López Ayala

Montecillo, Texcoco, Estado de México, junio de 2007

AGRADECIMIENTOS

A Dios, gracias señor por concederme una vida llena, abundante y por el gozo de lograr un objetivo más, sin duda a través de tu sabiduría, sin descuidar uno de los regalos más hermosos que me has dado, mi esposa e hijos.

Al Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología (CONACyT), por el apoyo económico otorgado para realizar mis estudios de postgrado.

Al Colegio de Postgraduados, por ser esa institución educativa a través de la cual fue posible lograr esta meta, y así aportar un grano de arena para el mejoramiento de la calidad de vida de la sociedad.

Al C. José Luís López Pérez, propietario de las plantaciones de San José Chacalapa, por permitir la realización de esta investigación, por donar las rodajas extraídas y por el apoyo económico brindado. Creo que México tiene el potencial para el establecimiento de plantaciones forestales, pero se necesitan muchos empresarios como usted, dispuestos a apostar por la recuperación de los terrenos desprovistos de vegetación. Gracias.

M. C. Celestino Flores López, por ser el vínculo con el propietario y el responsable técnico de la plantación para obtener la autorización de trabajar en dicha plantación.

Al Dr. Juan Ignacio Valdez Hernández, profesor consejero y director de este trabajo, por su apoyo y dedicación, además por la enseñanza que adquirí a través de sus puntos de vista, comentarios, charlas, sobre todo coincidiendo en que no necesariamente la mayoría tiene la razón. Gracias doctor.

Al Dr. Héctor Manuel de los Santos Posada, por su amistad, paciencia y por sus valiosas aportaciones a esta investigación, considerando siempre el impacto positivo de este trabajo a mi crecimiento como profesional forestal. Gracias Héctor.

Al Dr. José Amador Honorato Salazar, por su disposición brindada en la revisión del trabajo de tesis y a través del cual comprendí que la investigación forestal es un gran lazo entre los forestales.

Al M. en C. José Luis López Ayala, maestro gracias por tu amistad y apoyo tanto en el trabajo de campo como en la revisión del documento, por que creo que todos tenemos algo valioso que aportar a la formación de otros.

Al Ing. Juan Morales Hernández, responsable técnico de las plantaciones, por sus atenciones, haciendo más fácil mi estancia en Chacalapa y por todo el apoyo en el trabajo de campo.

A la M. en C. Gricelda Valera Venegas, gracia por tu amor, apoyo incondicional y por que unas palabras tuyas bastaban para continuar esforzándome a lograr las metas.

De manera especial agradezco a cada uno de los trabajadores de campo de las plantaciones por el apoyo brindado, pero particularmente a Ciro y Armando (el abuelito), quienes hicieron mucho más fácil y emotivo el duro trabajo de campo, además por que son la parte fundamental en el cuidado de la plantación y celosos de la misma.

A los profesores Javier López Upton y Gregorio Ángeles, quienes me apoyaron con equipo y material de medición.

A mis compañeros de la Consultoría para el Desarrollo Forestal de Tulancingo, Hgo. Francisco y Mario, gracias por el apoyo.

Al Ing. Adrián Blancas Arana, por las facilidades brindadas para la preparación de las rodajas.

A mis compañeros del postgrado, Alejandra, Pedro, Esau, Tito y Salomón, gracias por la amistad de cada uno, el postgrado fue más agradable con ustedes.

A todos aquellos que omito y formaron parte de esta etapa de mi vida.

A todos ustedes, les reitero, mi agradecimiento.

Por que todos contribuyeron al aprendizaje que no se adquiere en las aulas, esa diversidad de formaciones, vivencias, experiencias, ideas y puntos de vistas, que enriquecen la formación no solo del profesionista sino del ser humano.

DEDICATORIA

A mí amada esposa Gricelda, por ser la ayuda idónea que Dios diseñó para mí, por que en el mundo muchas mujeres hicieron el bien pero tú sobrepasas a todas, mujer virtuosa. A ti por el tiempo que no estuvimos juntos pero que este trabajo es el resultado de mi ausencia.

A mi hijo Rolando, herencia y regalo de Dios, por que en muchas ocasiones el tiempo dedicado no fue de calidad, sin embargo tu corazón sigue intacto y sin mancha, y lo compruebo en cada manifestación de tu amor hacia mí y eso es energía para ser mejor padre cada día.

A mi pequeña, aun en el vientre de tu madre, has sido y eres la respuesta de Dios al anhelo de mi corazón y eso me fortalece para seguir adelante y creo que eres una nueva fuente de aprendizaje que esperamos con mucho amor.

A mis padres, una vez más quiero resaltar que esta meta es la cosecha de aquella semilla que sembraron con amor.

A mis hermanos, que desde sus trincheras se sientan parte de este objetivo logrado, gracias por sus deseos y oraciones.

A mis amigos, que en todo momento me apoyaron y han estado pendientes de mi vida.

A la familia Moreno López (Luís, Silvana y Mariel), gracias, mejor es un amigo cerca que un hermano lejos y ustedes estuvieron ahí.

ROLANDO

CONTENIDO

INDICE DE CUADROS.....	iii
INDICE DE FIGURAS.....	v
RESUMEN.....	vii
ABSTRACT.....	viii
INTRODUCCION GENERAL.....	1
OBJETIVOS	7
CAPITULO 1. CRECIMIENTO EN DIÁMETRO	8
1.1. INTRODUCCION	8
1.2. OBJETIVOS	10
1.3. MATERIALES Y MÉTODOS	10
1.3.1. Área de estudio.....	10
1.3.2. Especies estudiadas	12
1.3.3. Métodos.....	16
1.4. RESULTADOS.....	23
1.4.1. Ajuste del modelo para evaluar el crecimiento entre especies.....	23
1.4.2. Ajuste para evaluar el crecimiento por variable biofísica y especie	26
1.4.2.1. <i>Cedrela odorata</i>	26
1.4.2.2. <i>Tabebuia donnell-smithii</i>	28
1.4.2.3. <i>Cordia alliodora</i>	32
1.4.2.4. <i>Tabebuia rosea</i>	35
1.5. DISCUSION	39
1.6. CONCLUSIONES	44
CAPITULO 2. PERIODICIDAD DEL CRECIMIENTO	45
2.1. INTRODUCCIÓN	45
2.2. OBJETIVO.....	47
2.3. MATERIALES Y METODOS	47
2.4. RESULTADOS.....	49
2.5. DISCUSIÓN	57
2.6. CONCLUSIONES	60

CAPITULO 3. RENDIMIENTO MADERABLE	61
3.1. INTRODUCCIÓN	61
3.2. OBJETIVOS	63
3.3. MATERIALES Y MÉTODOS	63
3.3.1. Área de influencia	63
3.3.2. Obtención de datos.....	64
3.3.2.1. Sitios permanentes de dimensiones fijas.....	64
3.3.2.2. Cubicación de árboles en pie	64
3.3.2.3. Volumen total y comercial por árbol	66
3.3.2.4. Estimación de alturas	68
3.3.3. Sistema de rendimiento maderable	69
3.3.4. Crecimiento en altura dominante	69
3.3.5. Crecimiento en área basal	72
3.3.6. Modelo de volumen total	72
3.3.7. Método de ajuste del SCRM	73
3.4. RESULTADOS.....	74
3.4.1. Modelos para volumen total y comercial.....	74
3.4.2. Crecimiento en altura dominante	76
3.4.3. Ajuste del SCRM	78
3.5. DISCUSIÓN	82
3.6. CONCLUSIONES	84
4. LITERATURA CITADA	85

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Número de árboles por especie y categoría diamétrica medidos con bandas dendrométricas.	17
Cuadro 2. Resumen del análisis de varianza del modelo de Schumacher para construir las curvas de crecimiento de las cuatro especies estudiadas en la costa de Oaxaca.	24
Cuadro 3. Resumen del análisis de varianza del modelo de Schumacher para construir la curva de crecimiento de <i>Cedrela odorata</i> en la costa de Oaxaca.	26
Cuadro 4. Resumen del análisis de varianza del modelo de Schumacher para construir la curva de crecimiento de <i>Tabebuia donnell-smithii</i> en la costa de Oaxaca.....	30
Cuadro 5. Resumen del análisis de varianza del modelo de Schumacher para construir la curva de crecimiento de <i>Cordia alliodora</i> en la costa de Oaxaca.....	32
Cuadro 6. Resumen del análisis de varianza del modelo de Schumacher para construir la curva de crecimiento de <i>Tabebuia rosea</i> en la costa de Oaxaca.	36
Cuadro 7. Resumen de incrementos intranuales en diámetro (cm año ⁻¹) por especie y condición biofísica evaluada en plantaciones de enriquecimiento de acahuales, San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca.	38
Cuadro 8. Tasas de incremento medio anual en diámetro, obtenidas mediante bandas dendrométricas, para algunas especies de árboles tropicales.....	42
Cuadro 9. Número de árboles marcados con incisiones al fuste por especie y categoría diamétrica.	47
Cuadro 10. Resultados del análisis de regresión para valores del ancho de zonas de crecimiento en las cuatro especies estudiadas.....	56
Cuadro 11. Número de árboles de <i>Cedrela odorata</i> y <i>Tabebuia donnell-smithii</i> por categoría diamétrica medidos en pie para obtener el sistema de cubicación.	65

Cuadro 12. Resultados del ajuste para el modelo de volumen total por mínimos cuadrados.....	74
Cuadro 13. Resultados del ajuste para los modelos de volumen comercial por mínimos cuadrados.....	75
Cuadro 14. Resumen del análisis de regresión efectuado con datos de altura–edad en <i>Cedrela odorata</i> y <i>Tabebuia donnell-smithii</i> para conocer el nivel de ajuste de los modelos empleados.....	76
Cuadro 15. Parámetros estimados y bondad de ajuste bajo regresión aparentemente no correlacionada (SUR) para los modelos de altura dominante (<i>A</i>), área basal (<i>AB</i>), y volumen total (<i>V</i>).....	78
Cuadro 16. Edad, altura dominante, área basal, volumen total, incremento medio anual (IMA) e incremento corriente anual (ICA) para cuatro índices de sitio (IS) en plantaciones de <i>Cedrela odorata</i> y <i>Tabebuia donnell-smithii</i> en San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca.....	80

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización geográfica del área de estudio: “El Penjamo” (○), “El Carnizuelo” (□), “Arroyo Rico” (△) y “El Riego” (◇); San José Chacalapa, municipio de Pochutla, estado de Oaxaca.....	11
Figura 2. Crecimiento en diámetro de <i>Cedrela odorata</i> , <i>Cordia alliodora</i> , <i>Tabebuia donnell-smithii</i> y <i>Tabebuia rosea</i> en una plantación de enriquecimiento de acahual, San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca. Note que el origen del eje y corresponde al valor de Y_0 en el modelo 1 (pág. 18).....	25
Figura 3. Crecimiento en diámetro de <i>Cedrela odorata</i> : exposición (A) e inclinación (B) de la pendiente y posición de la copa del árbol (C).	29
Figura 4. Crecimiento en diámetro de <i>Tabebuia donnell-smithii</i> : exposición (A) e inclinación (B) de la pendiente y posición de la copa del árbol (C).	31
Figura 5. Crecimiento en diámetro de <i>Cordia alliodora</i> : exposición (A) e inclinación (B) de la pendiente y posición de la copa del árbol (C).	34
Figura 6. Crecimiento en diámetro de <i>Tabebuia rosea</i> : exposición (A) e inclinación (B) de la pendiente y posición de la copa del árbol (C).	37
Figura 7. Anillos de crecimiento en sección transversal (rodaja) de <i>Cedrela odorata</i> : se observa la periodicidad a través de las cicatrices generadas cada dos meses (mayo 2005 - mayo 2006) por medio de las heridas al cambium (“Ventanas de Mariaux”).	50
Figura 8. Anillos de crecimiento en sección transversal (rodaja) de <i>Cordia alliodora</i> : se observa la periodicidad a través de las cicatrices generadas cada dos meses (mayo 2005 - mayo 2006) por medio de las heridas al cambium (“Ventanas de Mariaux”).	51

Figura 9. Anillos de crecimiento en sección transversal (rodaja) de <i>Tabebuia donnell-smithii</i> : se observa la periodicidad a través de las cicatrices generadas cada dos meses (marzo 2005 - mayo 2006) por medio de las heridas al cambium (“Ventanas de Mariaux”)...	52
Figura 10. Anillos de crecimiento en sección transversal (rodaja) de <i>Tabebuia rosea</i> : se observa la periodicidad a través de las cicatrices generadas cada dos meses (marzo 2005 – mayo 2006) por medio de las heridas al cambium (“Ventanas de Mariaux”).	53
Figura 11. Relación de la precipitación (mm, escala izquierda, línea) con el ancho de las zonas de crecimiento (mm, escala derecha, barras) para 10 árboles de <i>Cedrela odorata</i> en diferentes categorías diamétricas: 20 y 25 cm (a), 15 cm (b), 10 cm (c), 5 cm (d). Periodo de estudio: marzo 2005 – mayo 2006.	54
Figura 12. Relación de la precipitación (mm, escala izquierda, línea) con el ancho de las zonas de crecimiento (mm, escala derecha, barras) para siete árboles (en diferentes categorías diamétricas) de <i>Cordia alliodora</i> (a), <i>Tabebuia rosea</i> (b) y <i>T. donnell-smithii</i> (c). Periodo de estudio: marzo 2005 – mayo 2006.	55
Figura 13. Relación del volumen total por árbol con la variable diámetro normal por las especies estudiadas.	67
Figura 14. Curvas anamórficas de índice de sitio para <i>Cedrela odorata</i> y <i>Tabebuia donnell-smithii</i> (edad base = 10 años) en plantaciones de enriquecimiento San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca.	77
Figura 15. Datos de área basal (A) y volumen (B), por índice de sitio a una edad base de 10 años.	81
Figura 16. Curvas del incremento medio anual (IMA) e incremento corriente anual (ICA) por índice de sitio a una edad base de 10 años.	82

RESUMEN

Para muchas especies arbóreas en áreas de clima cálido húmedo no existe información del crecimiento y su periodicidad, así como de su rendimiento maderable, lo cual impide un buen manejo de los bosques en gran parte del trópico. Por lo anterior, se estudió el crecimiento y su periodicidad en *Cedrela odorata* L., *Tabebuia rosea* (Bertol.) DC, *T. donnell-smithii* Rose y *Cordia alliodora* (Ruíz & Pav.) Oken. en una plantación de enriquecimiento de acahuales en el sur de Oaxaca, México. Para evaluar el crecimiento a nivel árbol se midieron los cambios en diámetro a través de bandas dendrométricas para 32 individuos de *C. odorata*, seis de *T. rosea*, siete de *T. donnell-smithii* y nueve de *C. alliodora*; además, se analizaron macroscópicamente secciones transversales (rodajas) de 17 árboles en las cuatro especies, y se obtuvieron mediciones de diámetro y altura en 14 sitios de muestreo permanente (evaluados en 2005 y 2006) para generar un sistema de crecimiento y rendimiento maderable (SCRM) en *C. odorata* y *T. donnell-smithii*. Los resultados indican que el potencial de crecimiento (PC) en diámetro y la tasa de crecimiento intranual (TCI) mas alta se observó en *T. donnell-smithii* (PC=7.67 cm, TCI=2.82 cm año⁻¹), seguida de *C. odorata* (PC=5.49 cm, TCI=2.02 cm año⁻¹), *T. rosea* (PC=3.55 cm, TCI=1.3 cm año⁻¹) y *C. alliodora* (PC=1.32 cm, TCI=0.48 cm año⁻¹). Diferencias significativas ($p < 0.0001$) del crecimiento intranual en diámetro se obtuvieron para tres exposiciones de la pendiente (cenital, seca, húmeda) en *C. odorata* y *C. alliodora*, para dos inclinaciones de la pendiente (< 10%, >10%) en *C. odorata* y *T. rosea*, y para dos posiciones de copa (baja, alta) en *C. odorata*, *T. rosea* y *C. alliodora*. La formación de anillos de crecimiento fue periódica y anual en las cuatro especies: el ancho de las zonas de crecimiento fue significativamente ($p < 0.001$) mayor en la época de lluvias (3.91 mm/cm/bimestre) que en la sequía (1.03 mm/cm/bimestre). Los resultados del SCRM sugieren que estas dos especies se encuentran en la fase de crecimiento exponencial.

Palabras clave: bandas dendrométricas, características de la pendiente, posición de copa, anillos de crecimiento, estacionalidad en la precipitación, sistema de crecimiento y rendimiento.

ABSTRACT

For many tropical tree species information on growth and their periodicity, as well as their wood yield, is not available, impeding the implementation of proper management strategies. Given those conditions, this study focused on the growth and their periodicity in *Cedrela odorata* L., *Tabebuia rosea* (Bertol.) DC, *T. donnell-smithii* Rose, and *Cordia alliodora* (Ruíz & Pav.) Oken on enrichment plantations of tropical secondary forest in southern Oaxaca, Pacific coast of Mexico. To evaluate growth at tree level changes in diameter at breast height (DBH) were measured through dendrometer bands for 32 individuals of *C. odorata*, six of *T. rosea*, seven of *T. donnell-smithii* and nine of *C. alliodora*; also, cross sections from 17 trees of the four species were macroscopically analyzed, and diameter and height measurements were obtained from 14 permanent sample sites (evaluated in 2005 and 2006) to generate a system of growth and wood yield (SGWY) in *C. odorata* and *T. donnell-smithii*. Results indicate that the growth potential (GP) in diameter and the intra-annual growth (IAG) rate was highest in *T. donnell-smithii* (GP=7.67 cm, IAG=2.82 cm year⁻¹), followed by *C. odorata* (GP=5.49 cm, IAG=2.02 cm year⁻¹), *T. rosea* (GP=3.55 cm, IAG=1.3 cm year⁻¹), and *C. alliodora* (GP=1.32 cm, IAG=0.48 cm year⁻¹) Statistical differences (p<0.0001) in intra-annual growth were found for three slope exposures (zenithal, dry, wet) in *C. odorata* and *C. alliodora*, for two slope inclinations (< 10%, >10%) in *C. odorata* and *T. rosea*, and for two crown positions (low, high) in *C. odorata*, *T. rosea* and *C. alliodora*. Formation of growth rings was annual and periodical in the four species: the width of growth zone in rainy season (3.91 mm/cm/two months) was significantly (p<0.001) higher than that in drought (1.03 mm/cm/two months). Results from the SGWY suggest that *C. odorata* and *T. donnell-smithii* are in the phase of exponential growth.

Key words: dendrometer bands, slope characteristics, crown position, growth rings, rain seasonality, growth and yield system.

INTRODUCCION GENERAL

De los recursos forestales, las selvas constituyen el tercer ecosistema más importante del país ocupando una superficie de 26.4 millones de ha, 13.4 % del territorio nacional, y es aquí donde existe un mayor potencial de productos maderables y no maderables. Este ecosistema, a su vez se clasifica según el tipo de clima (temperatura media anual, precipitación media anual), ubicación geográfica (altitud, latitud, exposición), altura máxima media de los árboles, predominio relativo de plantas leñosas, suculentas, trepadoras o herbáceas, así como existencia y proporción de elementos vegetales caducifolios, entre otras características (Challenger, 1998; SEMARNAP-UACH, 1999).

El conocimiento sobre la dinámica, distribución, tasa de crecimiento, reproducción, fenología, usos y la estimación de la edad de las especies tropicales, son datos necesarios e importantes para lograr una actividad forestal controlada y regulada que evite el cambio de uso del suelo en las selvas (Gómez-Pompa, 1985; Gómez, 1998; Challenger, 1998; Snook, 2000).

Para estimar el crecimiento de los árboles o de una masa es importante conocer su edad. El estudio del crecimiento parte siempre de un postulado biológico; la persistencia de la especie por un tiempo prolongado, lo bastante como para que le sea asignable un número concreto de años (Giménez y Ríos, 1999).

Al respecto los registros de incrementos anuales a largo plazo son relativamente escasos y muestran una fuerte variación del crecimiento entre años, probablemente inducido por la variación de la lluvia (Clark y Clark, 1994), pero son esenciales para la interpretación del crecimiento y productividad en los bosques tropicales.

La formación de anillos de crecimiento anuales en especies de árboles tropicales puede ser causada por inundaciones anuales (Schongart *et al.*, 2002; Dezzeo *et al.*, 2003), variación estacional en la duración del día (Borchert y Rivera, 2001); variación estacional en la intensidad de lluvias (Worbes, 1999; Borchert, 1999); y posiblemente el efecto de ritmos internos no identificados (Alvim and Alvim, 1978). Sin embargo, Coster (1927), Worbes (1999) y Dünisch *et al.* (2002) mencionaron que en la mayoría de las áreas boscosas no sujetas a inundaciones, la formación de anillos de crecimiento es inducida probablemente por la ocurrencia de una estación seca anual que tiene una duración de varios meses. En este periodo, ciertas especies de árboles muestran con frecuencia un crecimiento en diámetro reducido o una dormancia del tejido cambial, debido principalmente al déficit de agua, lo que resulta en la formación de un tejido distintivo visible como un anillo de crecimiento (Worbes, 1999). Sin estacionalidad climática fuerte los árboles no forman anillos de crecimiento distinguibles y por eso no es posible determinar los años contando los anillos de crecimiento (Jacoby, 1989; Pilar-Ibarra, 2000).

En Indonesia, Coster (1927) reportó la presencia de anillos anuales de crecimiento en árboles tropicales. A partir de ese momento se ha estudiado este hallazgo en más de 20 diferentes países y con distintas especies de árboles en diversos bosques tropicales (Worbes, 2002). La ocurrencia de anillos de crecimiento se ha reportado en más de 35 estudios y muchos de estos

estudios han probado que los anillos se forman anualmente. A pesar de estos hallazgos, varios autores sostienen que los árboles tropicales no producen anillos de crecimiento anuales. El concepto de crecimiento continuo de los árboles tropicales y la ausencia de anillos de crecimiento anual es asumido extensamente (Lang y Knight, 1983; Lieberman *et al.*, 1985; Whitmore 1998); y otros autores han enfatizado los problemas que se presentan en el uso de los anillos de crecimiento para el caso de árboles tropicales (Bormann y Berlyn, 1981; Chambers *et al.*, 1998; Martínez-Ramos y Alvarez –Buylla, 1998; Laurance *et al.*, 2004), llevando a una falta de información en los modelos de crecimiento (Ashton, 1981).

Muchas de las especies que forman anillos de crecimiento son deciduas o cambian sus hojas durante el periodo seco (Worbes, 1999; Borchert, 1999). Los anillos de crecimiento de una planta leñosa están influenciados por la estacionalidad favorable / desfavorable de las condiciones de crecimiento (Worbes, 1992).

El análisis de los anillos de crecimiento se emplea con fines múltiples en botánica, climatología, y ciencia forestal, entre otras, (Schweingruber, 1989). Y tiene un gran potencial como herramienta para evaluar las prácticas de manejo, ya que provee información directa sobre la edad de árboles cosechables (Stahle, 1999; Worbes *et al.*, 2003). Además, proporciona datos confiables sobre crecimiento que pueden ser utilizados para proyectar el futuro rendimiento de madera.

La investigación en los bosques tropicales es importante porque su deforestación afecta el cambio global del clima, con una repercusión en la producción de alimentos y en el crecimiento de los árboles. Los sistemas silvícolas basados en el concepto de sustentabilidad,

requieren de conocimientos a cerca de incrementos en diámetro de árboles tropicales a largo plazo y su respuesta al clima. Tal información también ayuda a entender la relación clima – crecimiento de árboles (Fritts, 1976) y los modelos de crecimiento a largo plazo.

Para muchas especies arbóreas y sitios en el trópico húmedo, no existe información previa de su crecimiento y rendimiento; lo que lleva a una falta casi total de información en torno del análisis beneficio-costos, desempeño de especies en sitios específicos y, como consecuencia, la falta de bases técnicas y ecológicas que permitan manejar los bosques en gran parte del trópico.

Con la modelación se puede conocer la dinámica del crecimiento de árboles y masas forestales a partir de una variable de interés y es fundamental en ciencias forestales y ha sido sujeto de muchos artículos. Por ejemplo con la obtención del diámetro se conoce con mayor precisión el incremento anual y la posibilidad de relacionarlo con otras variables tales como el volumen.

El incremento en diámetro de los árboles permite obtener el incremento en área basal con el cual se calcula su edad mediante ecuaciones de predicción (Roig *et al.*, 1992). La información se emplea con otros datos, para explicar los cambios en diámetro y evaluar tasas de producción de madera en diferentes categorías diamétricas a través del año (Worbes, 1995).

La predicción del volumen en un rodal, en cualquier momento de su desarrollo es de gran importancia en el manejo forestal; sin embargo, frecuentemente no existen herramientas para estimar adecuadamente el volumen de madera.

Por lo anteriormente expuesto, y con objeto de garantizar el manejo óptimo de los recursos forestales, es necesario que el técnico responsable de la administración forestal cuente con herramientas de apoyo que le permitan conducir la producción de un rodal o plantación hacia una condición futura deseada y cumplir con los objetivos de manejo previstos. Como parte de estas herramientas, los modelos de crecimiento y rendimiento constituyen un aspecto fundamental para la planificación de las actividades de manejo del bosque (De la Fuente, 1998).

De acuerdo con Vanclay (1994) los modelos se elaboran para: a) efectuar estimaciones confiables del crecimiento y del rendimiento futuro; b) generar la información necesaria que permita mantener las cosechas dentro de la capacidad sustentable del bosque; c) comparar las alternativas de manejo que permitan analizar las mejores opciones de uso de la tierra; d) determinar la edad óptima de cosecha, la programación de las cortas intermedias, la estimación de la producción anual, periódica o total durante el periodo de rotación y las clases de productos a obtener; e) realizar análisis financieros y explorar opciones de manejo y alternativas silviculturales; f) examinar los impactos del manejo forestal y de la cosecha sobre otros valores del bosque; g) determinar un régimen de manejo que maximice el volumen maderable o el valor de la producción.

Para construir modelos de predicción y simulación del rendimiento del arbolado bajo diferentes condiciones de desarrollo, generalmente se usa la información de crecimiento. Estos modelos, resultan ser la herramienta más importante del administrador, por ejemplo en una plantación para identificar las mejores alternativas de manejo según el objetivo de la misma (Torres y Magaña, 2001).

Aunque existen varias clasificaciones es regularmente aceptado que los modelos de crecimiento y rendimiento pueden ser de: rodales completos, clases de tamaño y árboles individuales (Vanclay, 1995). Cada uno presenta sus particularidades en cuanto a necesidades de información, construcción y validación.

La predicción del crecimiento y rendimiento se puede realizar de dos formas: una explícita y otra implícita. La predicción explícita se realiza con modelos que predicen tácitamente la condición futura del rodal y han sido ampliamente usados por su sencillez y precisión; en contraste, la predicción implícita requiere el uso de uno o varios modelos que predicen explícitamente un conjunto de variables, a partir de las cuales es posible recuperar la condición futura del rodal (Torres y Magaña, 2001). Los modelos de predicción explícita del crecimiento se han clasificado en dos categorías (Clutter *et al.*, 1983): a tiempo actual y a tiempo futuro. En el primer caso los modelos son determinísticos y predicen la condición actual de variables como área basal, volumen y número de individuos, entre otras. En el segundo caso, los modelos predicen condiciones futuras de variables básicas (p.ej. área basal, volumen, número de individuos) a partir de condiciones actuales y para un intervalo de tiempo.

En la presente tesis se aplican algunas técnicas con la finalidad de conocer el crecimiento radial y en diámetro de cuatro especies arbóreas nativas de la zona cálido – subhúmeda de México, así como obtener un sistema de rendimiento maderable para dos de esas cuatro especies.

OBJETIVOS

Determinar el crecimiento en diámetro de cuatro especies de árboles comerciales tropicales: *Cedrela odorata* L., *Tabebuia donnell-smithii* Rose, *Cordia alliodora* (Ruíz & Pav.) Oken. y *Tabebuia rosea* (Bertol.) DC. en una plantación de enriquecimiento de acahual en San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca.

Identificar la presencia de anillos de crecimiento y su periodicidad en las especies estudiadas.

Construir un sistema de crecimiento y rendimiento maderable para las especies: *C. odorata* y *T. donnell-smithii*.

CAPITULO 1. CRECIMIENTO EN DIÁMETRO

1.1. INTRODUCCION

El estudio del crecimiento de los árboles tropicales es un tema de gran importancia en varios campos de las ciencias biológicas, pero en especial, en la demografía, teoría sucesional y silvicultura (Del Valle, 1997). El crecimiento diamétrico anual de los árboles es una variable esencial para seleccionar especies a ser utilizadas en las reforestaciones, plantaciones, en proyectos de restauración ecológica, y aún para establecerse en áreas verdes urbanas. Frecuentemente es necesario conocer qué tan rápido crecen los árboles, ya sea para investigar o planear su utilización. A menudo se utiliza la medición de los diámetros para evaluar los tratamientos silviculturales en un bosque con base en el crecimiento de sus árboles (Williams, 1996), además nos permite conocer el incremento en área basal y estimar la edad del mismo mediante ecuaciones de predicción (López, 2004).

El crecimiento diamétrico medio anual varía considerablemente de un sitio a otro, incluso para un mismo tipo de vegetación; por ello, su conocimiento es esencial para proponer el manejo de las especies de árboles maderables (Williams, 1996). Gran parte de los estudios del crecimiento diamétrico en árboles tropicales, que no forman anillos de crecimiento anuales, se ha basado en el seguimiento de numerosos individuos cuyos diámetros se marcan y miden en el mismo lugar durante varios años (Del Valle, 1997).

Para medir el crecimiento en diámetro se cuenta con varios instrumentos que difieren en exactitud, precisión, costo o simplicidad operacional; uno de estos instrumentos son las bandas dendrométricas, y sus primeros intentos de uso iniciaron con MacDougal (1921, 1924) quien

introdujo por primera vez el llamado dendrógrafo. Aunque este instrumento evitó algunos errores asociados con las cintas diamétricas, no fue considerado preciso para algunas especies de maderas duras y lento crecimiento (Fritts y Fritts, 1955). Reineke (1932) introdujo un instrumento mucho más simple y preciso llamado dendrómetro de medición esférica, (“dial-gauge”), y posteriormente Daubenmire (1945) y Reineke (1948) discutieron algunas mejoras en la exactitud de este dendrómetro. Hall (1944) introdujo una técnica que evitaba la medición de puntos múltiples alrededor del árbol llamada banda dendrométrica, la cual consiste en una cinta de metal colocada alrededor del tallo y asegurada con un resorte; ésta banda incluye una escala de vernier que permite mediciones con una precisión de 0.0254 centímetros, y puede hacerse con cintas de acero inoxidable, aluminio u otro metal. Después Liming (1957) describe una técnica parecida a la de Hall (1944) midiendo los cambios en circunferencia a través de una escala sobrepuesta en bandas de metal colocadas alrededor del fuste de árboles; ésta técnica es retomada por Cattelino *et al.* (1986), quienes amplían la metodología básica descrita por Liming (1957) y proporcionan detalles adicionales en materiales, construcción e instalación de las bandas dendrométricas.

Dichas bandas se han convertido en una herramienta popular en varios aspectos de la investigación forestal donde se desea una alta precisión de las mediciones en diámetro. En bosques templados, las bandas dendrométricas han sido usadas desde 1944 para registrar el crecimiento en diámetro (Keeland y Sharitz, 1993). Sin embargo, el uso de estas bandas en bosques tropicales es raro (Da Silva *et al.*, 2002) y en México su utilización es todavía incipiente (Makocki y Valdez Hernández, 2001; López *et al.* 2006a).

Tomando como base lo anterior, y con la finalidad de contribuir a la generación de información para un mejor manejo de plantaciones forestales con especies nativas de México en la región de la costa de Oaxaca, el presente capítulo tuvo los objetivos siguientes:

1.2. OBJETIVOS

a) Determinar el crecimiento en diámetro de cuatro especies de árboles tropicales: *Cedrela odorata* L. (Meliaceae), *Cordia alliodora* (Ruíz & Pav.) Oken. (Boraginaceae), *Tabebuia rosea* (Bertol.) DC. (Bignoniaceae) y *Tabebuia donnell-smithii* Rose (Bignoniaceae), utilizando bandas dendrométricas.

b) Evaluar el efecto de la inclinación y exposición de la pendiente del terreno, así como de la posición de la copa del árbol en el dosel, sobre el crecimiento en diámetro de las cuatro especies.

1.3. MATERIALES Y MÉTODOS

1.3.1. Área de estudio

La presente investigación se llevó a cabo en las plantaciones establecidas en cuatro predios conocidos como “El Penjamo” (96° 28’ 52.59” W a 15° 49’ 52.60” N y 96° 29’ 3.88” W a 15° 50’ 18.75” N), “El Carnizuelo” (96° 28’ 37.10” W a 15° 50’ 40.34” N y 96° 28’ 34.22” W a 15° 50’ 13.04” N), “Arroyo Rico” (96° 27’ 30.73” W a 15° 50’ 25.48” N y 96° 27’ 38.90” W a 15° 50’ 27.88” N) y “El Riego” (96° 26’ 44.77” W a 15° 50’ 0.48” N y 96° 26’ 50.50” W a 15° 50’ 8.94” N), aledaños a la comunidad de San José Chacalapa, perteneciente al municipio de San Pedro Pochutla, en el estado de Oaxaca.

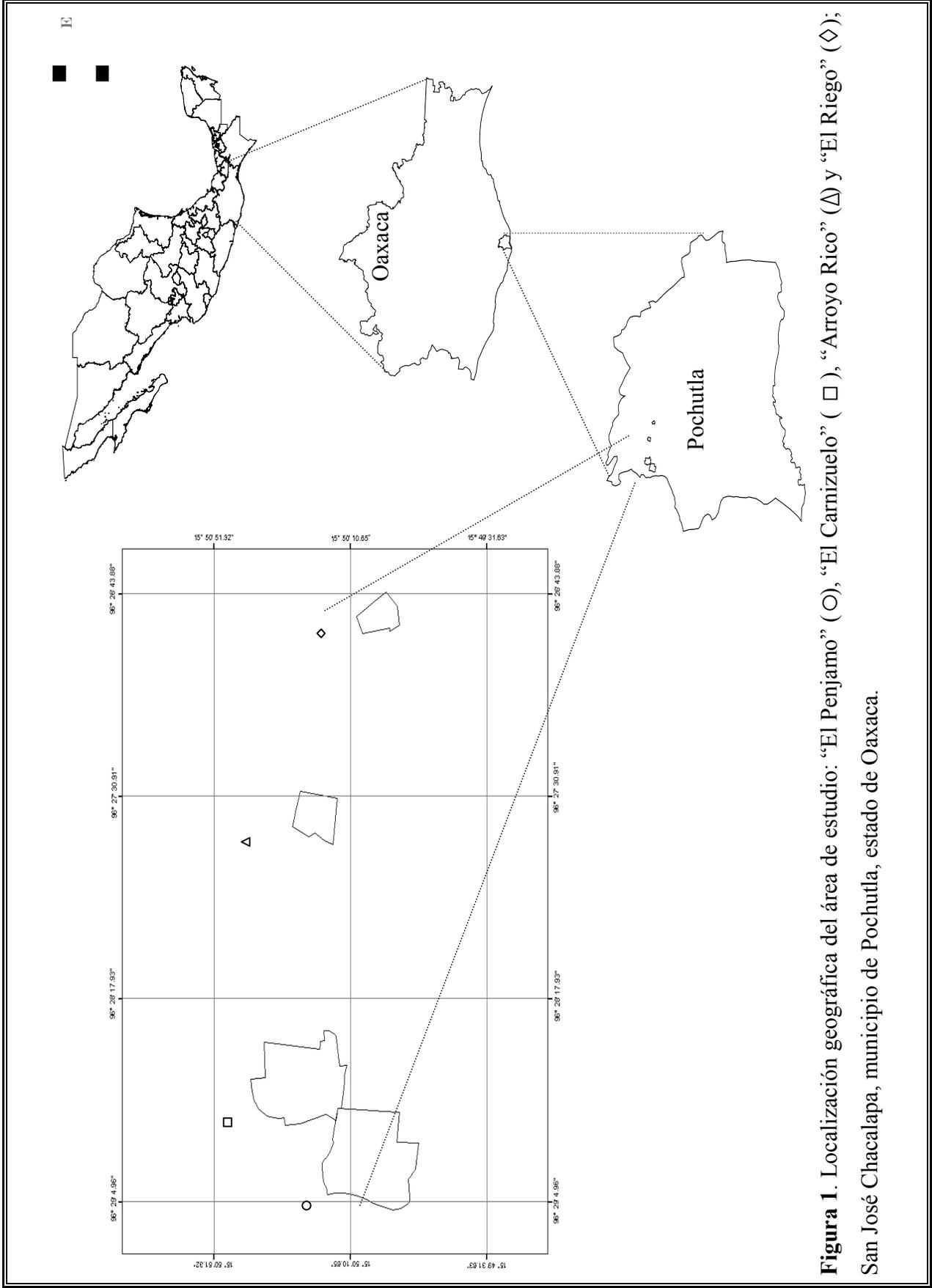


Figura 1. Localización geográfica del área de estudio: "El Penjamo" (○), "Arroyo Rico" (△) y "El Riego" (◇); San José Chacalapa, municipio de Pochutla, estado de Oaxaca.

El clima en el área de estudio, de acuerdo con el sistema de clasificación climática de Köppen modificado por García (1987), corresponde al grupo de climas calidos subhúmedos con lluvias en verano Aw_1 : el intermedio entre Aw_0 y Aw_2 , con una precipitación media anual de 934.7 mm y una temperatura media anual de 26 °C (García, 1987). El suelo predominante en el área de estudio corresponde a un regosol éutrico (INEGI, 1995).

Actualmente el tipo de vegetación, en tres de los cuatro predios (El Penjamo, Carnizuelo y Arroyo Rico), corresponde a acahuales formados como consecuencia de la roza, tumba y quema. Sin embargo, con base en la clasificación de la vegetación de México realizada por Miranda y Hernández (1963), y tomando en cuenta las especies relicto, el tipo de vegetación fue una selva mediana caducifolia: aproximadamente $\frac{3}{4}$ partes de los árboles altos pierden completamente sus hojas en la época de sequía (Miranda y Hernández , 1963).

Para el caso del predio El Riego todavía se observa la estructura tanto vertical como horizontal de la selva mediana caducifolia, aunque de moderada a alta de perturbación; el dosel de las especies vegetales presentes es utilizado como sombra de cafetales.

1.3.2. Especies estudiadas

Son nativas de México e importantes por sus valores ecológicos y comerciales; son descritas a continuación con base en el trabajo realizado por Pennington y Sarukhán (1998).

Cedrela odorata L. (MELIACEAE)

Comúnmente se le conoce como cedro rojo, nombre aplicado en toda su área de distribución; aunque también es llamado como chujté (tzeltal) en la zona lacandona, Chiapas, así como icte (huasteco) y tiocuáhuítl (náhuatl). Este árbol puede llegar a medir hasta 35 m de altura y alcanzar un diámetro normal de 1.7 m, en ocasiones forma pequeños contrafuertes poco prominentes, sus ramas son ascendentes y gruesas, su copa es redonda y densa. Las hojas son dispuestas en espiral, paripinnadas o imparipinnadas, de 15 a 50 cm de largo incluyendo el pecíolo, compuestas por 10 a 22 folíolos opuestos o alternos, además poseen un penetrante olor a ajo cuando se estrujan. Los árboles de esta especie tiran las hojas cuando han madurado totalmente los frutos de la temporada anterior, antes de florecer.

Se encuentra en la vertiente del Golfo desde el sur de Tamaulipas y sureste de San Luis Potosí hasta la península de Yucatán y en la del Pacífico desde Sinaloa hasta Guerrero, así como en la Depresión Central y costa de Chiapas. Alcanza sus máximos tamaños e incrementos en zonas con precipitaciones entre 2,500 y 4,000 mm anuales; en zonas con precipitación pluvial mucho menor el árbol no se desarrolla tan bien y presenta fustes cortos y frecuentemente torcidos.

El cedro después de la caoba es la especie maderable más importante en la industria forestal de México. Su madera de características excelentes, se usa para obtener vigas, tablas, y chapas, así como para fabricar diversos artículos torneados, cajas de puros y hacer tallas. El uso más indicado para esta especie, por el bello jaspeado de su madera, es la fabricación de chapas y madera terciada para exportación.

Tabebuia donnell-smithii Rose. (BIGNONIACEAE)

Comúnmente se le conoce como primavera en toda el área de distribución. Este árbol alcanza hasta 30 m de altura y un diámetro normal de 70 cm con el tronco ligeramente acanalado; ramas ascendentes, copa alargada. Las hojas son decusadas digitado compuestas, de 20 a 70 cm de largo incluyendo pecíolo, compuestas de siete folíolos, ocasionalmente cinco. Las flores se presentan en panículas terminales, piramidales, con ramas cimosas de 15 a 35 cm de largo. El fruto es una cápsula de 25 a 50 cm de largo. Los árboles de esta especie pierden las hojas a fines de marzo, época en que florecen, y las reponen a principios de mayo.

La especie se distribuye en la vertiente del Pacífico desde Nayarit hasta Chiapas y en la del Golfo en Tabasco, formando parte de las selvas medianas subcaducifolias en suelos de origen volcánico y metamórfico o sedimentario.

Su madera, de color claro, es muy apreciada para la fabricación de muebles.

Tabebuia rosea (Bertol.) DC. (BIGNONIACEAE)

Esta especie por su distribución tan amplia presenta una gran diversidad de nombres comunes, algunos de ellos son: Macuilís, palo de rosa, roble, roble blanco, amapa rosa, macuil, amapola, rosa morada, macuelis de bajo, hok'ab y kok'ab. Árbol de hasta 25 m y diámetro normal de hasta 70 cm, tronco recto, a veces ligeramente acanalado, con pocas ramas gruesas y horizontales, ramificación simpódica, con la copa estratificada.

Las hojas son decusadas, digitado compuestas, de 10 a 35 cm de largo incluyendo el pecíolo; cinco folíolos, los dos inferiores mas pequeños y el terminal más grande, lanceolados o elípticos. Las flores son panículas cortas con ramas cimosas. Los árboles de esta especie pierden las hojas de marzo a junio. Los frutos son capsulas estrechas de hasta 35 cm de largo. Se encuentra en la vertiente del Golfo, desde el sur de Tamaulipas y el norte de Puebla y Veracruz hasta el norte de Chiapas y sur de Quintana Roo; en la vertiente del Pacifico desde Nayarit hasta Chiapas preferentemente en comunidades secundarias, también formando parte de selvas altas o medianas subperennifolias y subcaducifolias. Se presenta indiferentemente en suelos de origen calizo, ígneo o aluvial, pero en general con algunos problemas de drenaje; alcanza sus mayores desarrollos en Tabasco, Campeche y Chiapas. Su madera se ha usado para la fabricación de chapa, madera terciada en las caras de vista y fabricación de muebles; es una especie que podría usarse con éxito en plantaciones comerciales con fines forestales.

Cordia alliodora (Ruiz & Pav.) Oken. (BORAGINACEAE)

Esta especie presenta una gran diversidad de nombres comunes: Bojon, bojon prieto (Tabasco, Chiapas, Campeche, Quintana Roo); hormiguero (Michoacán, Guerrero, Oaxaca); amapa prieta (Sinaloa); aguardientillo (Oaxaca); bohum (maya, Yucatán); cueramu (Michoacán); laurel (Chiapas); palo María (Guerrero); rosadillo, solería (Oaxaca); tusa-tioco (mixteco, Oaxaca); palo de viga, popocotle (San Luís Potosí); solerillo (centro de Veracruz).

Este árbol alcanza hasta 25 m y un diámetro normal de 90 cm, tronco derecho, copa redondeada, con ramas ascendentes, verticiladas en la parte superior. Las hojas se presentan dispuestas en espiral, simples de 4.5 x 2 cm a 17 x 5 cm, ovado-lanceoladas, con el margen entero. Las flores se presentan en paniculas axilares o terminales vistosas, de 5 a 15 cm de

largo, que se desarrollan frecuentemente a partir de uno de los hinchamientos huecos de las ramas. Sus frutos maduran de septiembre a abril y son nuececillas con todas las partes florales persistentes; contienen semillas blancas de 4 a 5 mm de largo.

Se distribuye en la vertiente del Golfo desde el sureste de San Luis Potosí hasta Campeche, Yucatán y Quintana Roo, en la vertiente del Pacífico desde Sinaloa hasta Chiapas. Es una especie abundante en la vegetación secundaria proveniente de selvas altas o medianas perennifolias a subcaducifolias; en zonas con climas más húmedos presenta un crecimiento notablemente rápido. Su intervalo altitudinal va desde el nivel del mar hasta los 500 m.

La madera es de muy buena calidad y con buenas características de aserrío, secado y torneado; actualmente se utiliza para la fabricación de mangos de herramientas y otros artículos de esta naturaleza, o bien como madera aserrada para muebles de trabajo. Puede usarse favorablemente en un futuro para la fabricación de chapas y madera terciada con fines decorativos o para parquet.

1.3.3. Métodos

Tomando en cuenta la distribución de las edades de plantación (3 a 9 años), así como la superficie plantada por especie, se localizaron un total de 54 árboles muestra para tres especies plantadas: 32 individuos de *C. odorata*, 6 individuos de *T. rosea*, 7 individuos de *T. donnell-smithii*, y una especie establecida de forma natural como parte del acahual: 9 individuos de *C. alliodora*; en los cuales se instalaron bandas dendrométricas considerando cinco categorías de diámetro a la altura del pecho (DAP = 1.30 m) para *C. odorata*, tres categorías para *C.*

alliodora y dos categorías para *T. rosea* y *T. donnell-smithii*: $2.5 \text{ cm} \leq \text{DAP(I)} < 7.5 \text{ cm}$, $7.5 \text{ cm} \leq \text{DAP(II)} < 12.5 \text{ cm}$, $12.5 \text{ cm} \leq \text{DAP(III)} < 17.5 \text{ cm}$, $17.5 \text{ cm} \leq \text{DAP(IV)} < 22.5 \text{ cm}$ y $22.5 \text{ cm} \leq \text{DAP (V)} < 27.5 \text{ cm}$ (Cuadro 1). Estas bandas fueron elaboradas en campo con cintas metálicas de acero inoxidable, siguiendo la metodología propuesta por Cattelino *et al.* (1986). Las lecturas en las bandas se realizaron cada dos meses, desde mayo del 2005 hasta julio del 2006, aunque en el análisis solamente se emplearon los datos de un año (mayo 2005 – mayo del 2006).

Con la finalidad de identificar posibles diferencias significativas en la variación del crecimiento en diámetro entre especies, así como dentro de especies, se efectuaron análisis de regresión ajustando modelos no lineales de efectos mixtos.

Cuadro 1. Número de árboles por especie y categoría diamétrica medidos con bandas dendrométricas.

Categoría diamétrica Especie	I (2.6–7.5 cm)	II (7.6–12.5 cm)	III (12.6–17.5 cm)	IV (17.6–22.5 cm)	V (22.6–27.5 cm)	Total
<i>Cedrela odorata</i>	9	9	6	5	3	32
<i>Cordia alliodora</i>	3	3	3			9
<i>Tabebuia rosea</i>	3	3				6
<i>Tabebuia donnell-smithii</i>	4	3				7

El modelo ajustado para describir el incremento intranual fue del tipo Schumacher con intercepto bajo efectos mixtos, usando el paquete estadístico S-Plus 2000 (MathSoft, 1999), donde se separó el parámetro específico, que para este caso fue el diámetro del árbol. La forma general del modelo propuesto y empleado fue la siguiente:

$$d_{ij} = \beta_0 e^{-\beta_1/T_{ij}} + (Y_0 + b_{0i}) + \varepsilon_{ij} \quad (1)$$

$$b_{0i} \sim N(0, \phi^2) \quad \varepsilon_{ij} \sim N(0, \sigma^2)$$

Donde:

- d_{ij} = Diámetro del *i-ésimo* árbol en la *j-ésima* medición intranual
- β_0 = Potencialidad máxima de crecimiento intranual
- β_1 = Tasa de crecimiento intranual
- e = Base del logaritmo natural
- Y_0 = Diámetro inicial promedio para el grupo de datos
- b_{0i} = Parámetro específico por árbol
- T_{ij} = Tiempo de medición en bimestres del *i-ésimo* árbol en la *j-ésima* medición intranual
- ε_{ij} = Error del *i-ésimo* árbol en la *j-ésima* medición intranual

Dentro del modelo (1) general, el parámetro β_1 representa la tasa de incremento intranual en diámetro; sin embargo, también representa el tiempo en que el incremento marginal es igual al incremento promedio, punto en que la productividad del árbol llega a su máximo crecimiento intranual y esta dado en bimestres.

El modelo se aplica primero para evaluar sus condiciones de ajuste al total de la población y, posteriormente, se vuelve a escribir para comparar tasas de crecimiento entre especies y evaluar la influencia de la inclinación y exposición de la pendiente, así como de la posición de la copa del árbol.

Para evaluar el efecto de éstas variables en la tasa de crecimiento en diámetro de las cuatro especies, se tomó como base el modelo general (1) derivando la siguiente ecuación general:

$$d_{ij} = (Y_0 + y_i) + (\beta_0 + \beta_{01}I_1 + \beta_{02}I_2 + \dots + \beta_{0k}I_k) \times e^{\left(-(\beta_1 + \beta_{11}I_1 + \beta_{12}I_2 + \dots + \beta_{1k}I_k) / T_{ij} \right)} + \varepsilon_{ij} \quad (2)$$

Donde: I_{ik} es la variable indicadora que define la i -ésima especie en la k -ésima condición ambiental, las demás variables fueron definidas anteriormente.

Para evaluar y comparar las tasas de crecimiento en diámetro entre especies se tomó como base la ecuación (2), la cual quedó de la siguiente forma:

$$d_{ij} = (\alpha_{01} + \alpha_{02}I_2 + \alpha_{03}I_3 + \alpha_{04}I_4) \times e^{\left(-(\alpha_{11} + \alpha_{12}I_2 + \alpha_{13}I_3 + \alpha_{14}I_4) / T_{ij} \right)} + (Y_0 + b_{ij}) + \varepsilon_{ij} \quad (3)$$

Donde:

α_{01} = parámetro de referencia que representa la potencialidad máxima para *Cedrela odorata*

α_{02} = parámetro de adicionalidad que sumado a α_{01} representa la potencialidad máxima de *Tabebuia donnell-smithii*

α_{03} = parámetro de adicionalidad que sumado a α_{01} representa la potencialidad máxima de *Cordia alliodora*

α_{04} = parámetro de adicionalidad que sumado a α_{01} representa la potencialidad máxima de *T. rosea*

α_{11} = parámetro de referencia que representa la tasa de crecimiento intranual para *Cedrela odorata*

α_{12} = parámetro de adicionalidad que sumado a α_{11} representa la tasa de crecimiento intranual de *Tabebuia donnell-smithii*

α_{13} = parámetro de adicionalidad que sumado a α_{11} representa la tasa de crecimiento intranual de *Cordia alliodora*

α_{14} = parámetro de adicionalidad que sumado a α_{11} representa la tasa de crecimiento intranual de *T. rosea*

En particular, para evaluar el efecto de exposición de la pendiente, se consideraron tres tipos: cenital, que comprendió 0 % de inclinación de la pendiente, y se consideró como variable de referencia dentro del modelo; húmeda, que incluyó las exposiciones norte (N, NE y NW), y seca las exposiciones sur (S, SE y SW). La ecuación general (2) quedó por tanto de la siguiente forma:

$$d_{ij} = (\lambda_{01} + \lambda_{02}I_2 + \lambda_{03}I_3) \times e\left(-\frac{(\lambda_{11} + \lambda_{12}I_2 + \lambda_{13}I_3)}{T_{ij}}\right) + (Y_0 + b_{ij}) + \varepsilon_{ij} \quad (4)$$

Donde:

λ_{01} = parámetro de referencia que representa la potencialidad máxima para la exposición cenital

λ_{02} = parámetro de adicionalidad que sumado a λ_{01} representa la potencialidad máxima en la exposición seca

λ_{03} = parámetro de adicionalidad que sumado a λ_{01} representa la potencialidad máxima en la exposición húmeda

λ_{11} = parámetro de referencia que representa la tasa de crecimiento intranual para la exposición cenital

λ_{12} = parámetro de adicionalidad que sumado a λ_{11} representa la tasa de crecimiento intranual en la exposición seca

λ_{13} = parámetro de adicionalidad que sumado a λ_{11} representa la tasa de crecimiento intranual en la exposición húmeda

De la misma manera, para evaluar el efecto de inclinación de la pendiente, se consideraron dos clases: menores de 10 % y mayores de 10%, debido a que existe una gran amplitud en intervalos de inclinación de la pendiente y muy pocos datos representativos en dichos intervalos; la ecuación general (2) quedó definida de la siguiente forma:

$$d_{ij} = (\phi_{01} + \phi_{02}I_2) \times e^{\left(\frac{-(\phi_{11} + \phi_{12}I_2)}{T_{ij}}\right)} + (Y_0 + b_{ij}) + \varepsilon_{ij} \quad (5)$$

Donde:

ϕ_{01} = parámetro de referencia que representa la potencialidad máxima para inclinaciones menores o iguales al 10 %

ϕ_{02} = parámetro de adicionalidad que sumado a ϕ_{01} representa la potencialidad máxima en inclinaciones mayores al 10 %

ϕ_{11} = parámetro de referencia que representa la tasa de crecimiento intranual para inclinaciones menores ó iguales al 10 %

ϕ_{12} = parámetro de adicionalidad que sumado a ϕ_{11} representa la tasa de crecimiento intranual en inclinaciones mayores al 10 %

Finalmente, para evaluar el efecto de la posición de copa en el dosel se consideraron, según la incidencia de luz solar sobre las copas de los árboles, tres situaciones: alta, cuando no se presentó algún obstáculo que impidiera recibir directamente la luz; media, cuando se presentó algún obstáculo que impidió recibir directamente la luz; baja, cuando se recibió la luz sólo indirectamente. La ecuación general (2) se definió de la siguiente manera:

$$d_{ij} = (\delta_{01} + \delta_{02}I_2 + \delta_{03}I_3) \times e^{\left(\frac{-(\delta_{11} + \delta_{12}I_2 + \delta_{13}I_3)}{T_{ij}} \right)} + (Y_0 + b_{ij}) + \varepsilon_{ij} \quad (6)$$

Donde:

δ_{01} = parámetro de referencia que representa la potencialidad máxima para la incidencia de luz alta

δ_{02} = parámetro de adicionalidad que sumado a δ_{01} representa la potencialidad máxima con incidencia de luz media

δ_{03} = parámetro de adicionalidad que sumado a δ_{01} representa la potencialidad máxima con incidencia de luz baja

δ_{11} = parámetro de referencia que representa la tasa de crecimiento intranual para la incidencia de luz alta

δ_{12} = parámetro de adicionalidad que sumado a δ_{11} representa la tasa de crecimiento intranual para la incidencia de luz media

δ_{13} = parámetro de adicionalidad que sumado a δ_{11} representa la tasa de crecimiento intranual para la incidencia de luz baja

Una vez ajustadas estas ecuaciones generales, los parámetros de adicionalidad que no fueron estadísticamente diferentes, fueron eliminados del modelo y se reajustó el modelo de manera sucesiva hasta que todos los parámetros incluidos fueran estadísticamente diferentes de cero.

1.4. RESULTADOS

1.4.1. Ajuste del modelo para evaluar el crecimiento entre especies

En el Cuadro 2 se muestran los resultados del ajuste del modelo (3) empleado para evaluar el incremento en diámetro de las especies estudiadas. La condición inicial promedio de diámetro fue 10.73 cm, representada por Y_0 .

De las cuatro especies, *T. donnell-smithii* presentó el mayor potencial de crecimiento bajo condiciones óptimas con 7.67 cm ($\alpha_{01} + \alpha_{02}$), es decir que en el año puede llegar a crecer hasta 7.67 cm en condiciones óptimas. La segunda especie con mejor crecimiento fue *C. odorata* quien muestra un potencial máximo de crecimiento de 5.49 cm, representado por α_{01} , el cual fue el parámetro base de referencia; mientras que *C. alliodora* y *T. rosea* presentan un potencial de crecimiento de 1.32 cm ($\alpha_{01} + \alpha_{03}$) y 3.55 cm ($\alpha_{01} + \alpha_{04}$), respectivamente (Cuadro 2, Figura 2).

Cuadro 2. Resumen del análisis de varianza del modelo de Schumacher para construir las curvas de crecimiento de las cuatro especies estudiadas en la costa de Oaxaca.

Parámetro	Estimado	Error Estándar	g.l.	Valor de t calculado	Valor de rechazo (pr> t)
Y_0	10.72742	0.7172806	263	14.95568	<.0001***
α_{01}	5.49637	0.3167171	263	17.3542	<.0001***
α_{02}	2.17933	0.8746349	263	2.4917	0.0133*
α_{03}	-4.17561	0.5794363	263	-7.20633	<.0001***
α_{04}	-1.94692	0.6732767	263	-2.8917	0.0042**
α_{11}	3.9028	0.2188971	263	17.82937	<.0001***
α_{12}	1.2549	0.5978769	263	2.09892	0.0368*

p<0.05; **p<0.01; ***p<0.001

Para obtener la tasa de crecimiento intranual fue necesario aplicar el modelo (7) al sustituir los valores de los parámetros dentro del modelo obtenemos que *C. odorata* tiene un crecimiento intranual de 2.02 cm en 3.9 bimestres, representado por α_{11} , mientras que *T. donnell-smithii* crece 2.82 cm en 5.2 bimestres, representado por $\alpha_{11} + \alpha_{12}$ ambos resultados son estadísticamente diferentes de cero ($p < 0.0001$) (Cuadro 2); *C. alliodora* y *T. rosea* no presentaron diferencias estadísticamente significativas respecto al crecimiento intranual de *C. odorata*.

Para obtener los valores de crecimiento intranual se empleó una fracción del modelo 1 que representa este crecimiento y es:

$$\Delta d_i = \beta_0 e^{-\beta_i / T_{ij}} \quad (7)$$

Donde Δd_i es la tasa de crecimiento intranual en diámetro, β_0 es la asíntota, e es la función exponencial, β_i es el tiempo de culminación del crecimiento y T_{ij} es el tiempo en que la especie crece durante el año.

Así, la tasa de crecimiento intranual en diámetro promedio para *C. odorata* quedaría como

$$\Delta d_i = 5.49 \times e^{-3.9/T_{ij}}, \quad T. \text{ donnell-smithii} \quad \Delta d_i = 7.67 \times e^{-5.2/T_{ij}}, \quad C. \text{ alliodora}$$

$$\Delta d_i = 1.32 \times e^{-3.9/T_{ij}} \text{ y para } T. \text{ rosea } \Delta d_i = 3.54 \times e^{-3.9/T_{ij}}, \text{ todas evaluadas en seis bimestres.}$$

Con base en los resultados obtenidos se observa que *T. donnell-smithii* tuvo un periodo de crecimiento mas largo y un crecimiento intranual mas alto que *C. odorata*, mientras que *C. alliodora* y *T. rosea* presentaron un crecimiento intranual estadísticamente similar a *C. odorata*.

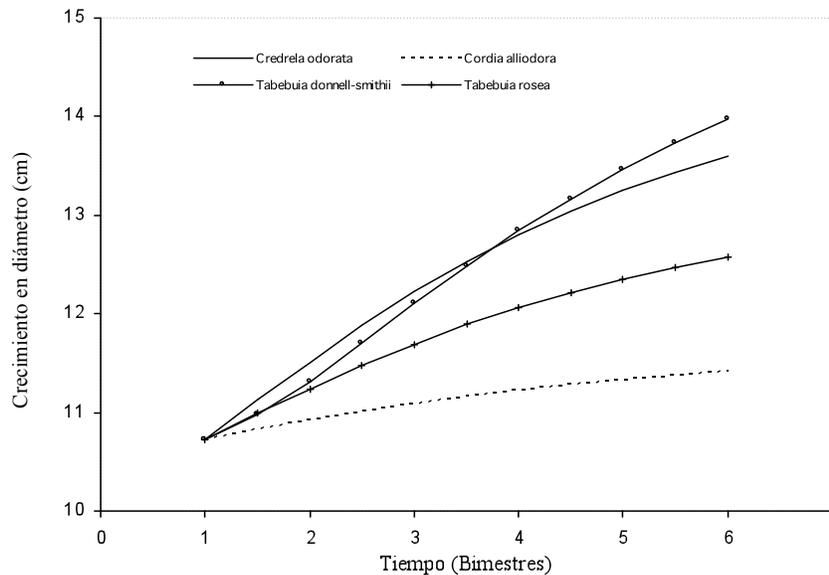


Figura 2. Crecimiento en diámetro de *Cedrela odorata*, *Cordia alliodora*, *Tabebuia donnell-smithii* y *Tabebuia rosea* en una plantación de enriquecimiento de acahual, San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca. Note que el origen del eje y corresponde al valor de Y_0 en el modelo 1 (pág. 18).

1.4.2. Ajuste para evaluar el crecimiento por variable biofísica y especie

1.4.2.1. *Cedrela odorata*

En el Cuadro 3 se muestran los resultados del ajuste de las ecuaciones empleadas para evaluar el efecto de la inclinación y exposición de la pendiente, así como de la posición de la copa del árbol, en el crecimiento en diámetro de *C. odorata*.

Los árboles de esta especie presentaron diámetros en categorías desde 5 hasta 25 cm y el análisis de evaluación parte de una condición inicial promedio del diámetro igual a 12.26 cm, representada por Y_0 (Cuadro 3).

Cuadro 3. Resumen del análisis de varianza del modelo de Schumacher para construir la curva de crecimiento de *Cedrela odorata* en la costa de Oaxaca.

Variable	Parámetro	Estimado	Error Estándar	g. l.	Valor de t calculado	Valor de rechazo (pr> t)
Exposición	Y_0	12.25913	1.094612	156	11.19952	<.0001***
	λ_{01}	5.45967	0.343677	156	15.88606	<.0001***
	λ_{02}	1.48273	0.466271	156	3.17997	0.0018**
	λ_{11}	4.07634	0.393096	156	10.36985	<.0001***
Inclinación	Y_0	12.2582	1.114653	156	10.99732	<.0001***
	θ_{01}	6.20947	0.392322	156	15.82746	<.0001***
	θ_{02}	-1.07196	0.399915	156	-2.68046	0.0081**
	θ_{11}	4.09317	0.39704	156	10.30922	<.0001***
Posición de copa	Y_0	12.24252	1.069677	156	11.44507	<.0001***
	δ_{01}	6.42799	0.330677	156	19.43889	<.0001***
	δ_{03}	-3.03381	0.425554	156	-7.12908	<.0001***
	δ_{11}	4.02723	0.340784	156	11.81756	<.0001***

* p<0.05; **p<0.01; ***p<0.001

El potencial máximo de crecimiento que puede tener la especie en la exposición cenital durante un año fue de 5.46 cm (λ_{01}), mientras que su potencial máximo de crecimiento en la exposición seca durante un año fue de 6.9 cm ($\lambda_{01} + \lambda_{02}$), siendo estadísticamente diferente a la exposición cenital ($p < 0.001$) (Cuadro 3). El potencial máximo de crecimiento en la exposición húmeda no presentó diferencia estadísticamente significativa respecto al crecimiento en la exposición cenital (parámetro base o de referencia dentro del modelo).

Sustituyendo el valor del parámetro λ_{11} en la ecuación 6, que representa la tasa de crecimiento intranual en la exposición seca, *C. odorata* creció 2.55 cm de diámetro en un periodo de cuatro bimestres en el año (ocho meses), mientras que en la exposición cenital y húmeda creció 1.97 cm durante el mismo periodo (cuatro bimestres), siendo estadísticamente diferentes ($p < 0.001$) (Cuadro 3). El crecimiento intranual en la exposición húmeda no presentó diferencias estadísticamente significativas respecto a la exposición cenital.

La evaluación del crecimiento en diámetro de *C. odorata* para inclinaciones de la pendiente partió de una condición inicial promedio del diámetro de 12.26 cm, representada por Y_0 . Su potencial máximo de crecimiento en inclinaciones de la pendiente menores al 10 % fue de 6.2 cm (θ_{01}), significativamente ($p < 0.01$) superior que en las pendientes mayores al 10 %, el cual fue de 5.13 cm ($\theta_{01} + \theta_{02}$) (Cuadro 3).

El crecimiento intranual en inclinaciones de la pendiente menores al 10% fue de 2.28 cm en un periodo también de cuatro bimestres (ocho meses), significativamente diferentes ($p < 0.001$) superior al observado en inclinaciones mayores al 10 % que fue de 1.88 cm.

Finalmente, el potencial máximo de crecimiento de los árboles con posición de copa alta ($\delta_{01} = 6.42$ cm) fue significativamente ($p < 0.001$) mayor que el de los árboles con posición de copas baja ($\delta_{03} = 3.39$ cm) (Cuadro 3); el potencial máximo de crecimiento de los árboles con posición de copa alta fue estadísticamente igual que los de posición de copa media. El crecimiento intranual en diámetro de los árboles con posición de copa alta (2.35 cm) se puede considerar estadísticamente diferente ($p < 0.001$) de aquellos con posición de copa baja (1.24 cm).

El crecimiento intranual en diámetro de *C. odorata* se observa gráficamente en la Figura 3, donde el crecimiento en la exposición seca fue significativamente mayor ($p < 0.001$) respecto al crecimiento en la exposición húmeda (Figura 3A) y cenital.

El crecimiento intranual en terrenos con pendientes menores al 10 % fue significativamente ($p < 0.001$) superior que en los terrenos con pendientes mayores a 10 % (Figura 3B); y los árboles que recibieron luz directamente (posiciones de copas alta y media) presentaron un crecimiento significativamente ($p < 0.001$) mayor comparados con los árboles que recibieron luz en forma indirecta (posición de copa baja) (Figura 3C).

1.4.2.2. *Tabebuia donnell-smithii*

El análisis para evaluar el crecimiento parte de una condición inicial promedio en diámetro de 7.22 cm (Y_0), con un potencial de crecimiento en la exposición húmeda ($\lambda_{01} = 8.03$ cm) estadísticamente diferente ($p < 0.001$) al potencial de crecimiento en la exposición seca ($\lambda_{01} + \lambda_{02} = 5.81$ cm) (Cuadro 4). Esta especie no presentó individuos en la exposición cenital.

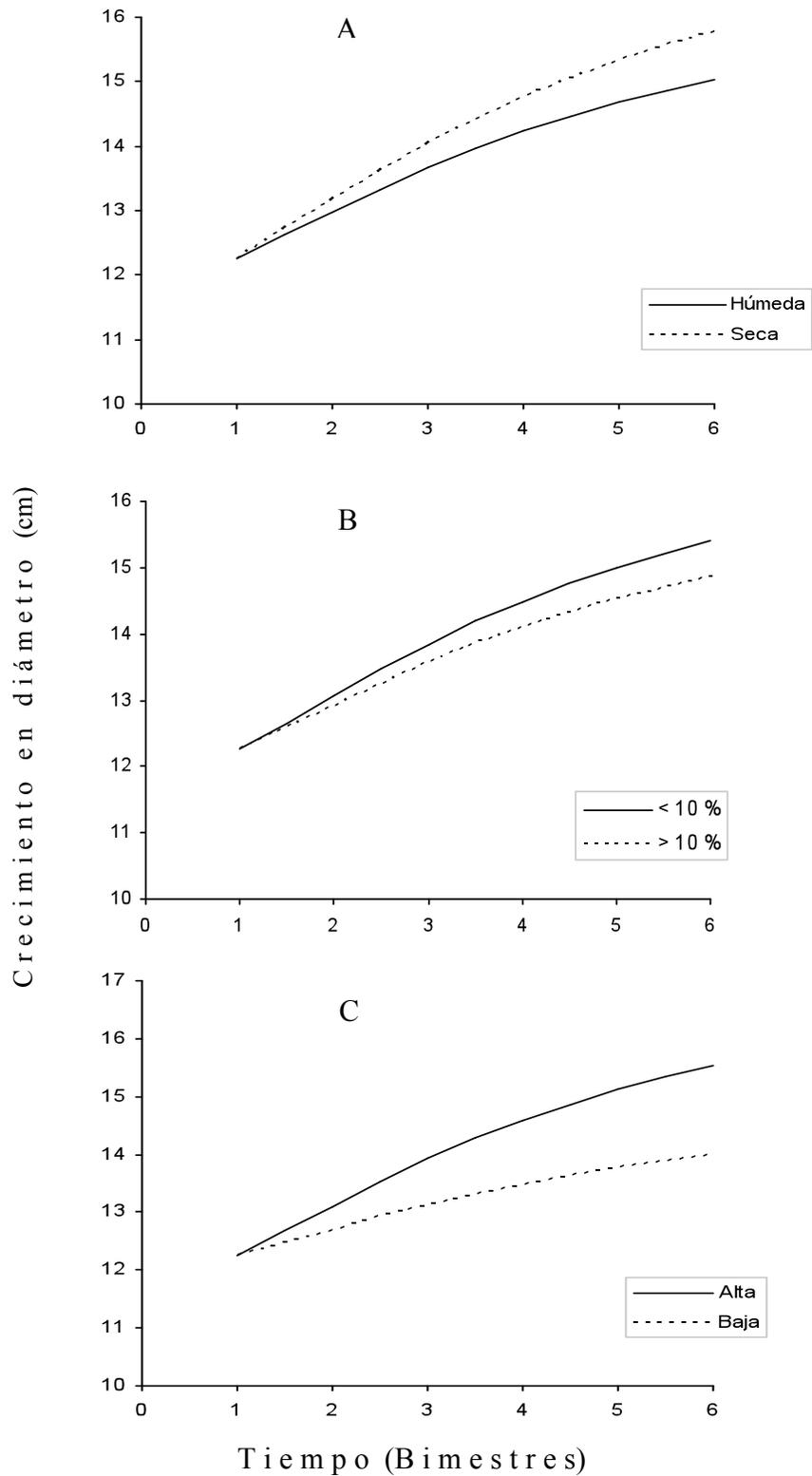


Figura 3. Crecimiento en diámetro de *Cedrela odorata*: exposición (A) e inclinación (B) de la pendiente y posición de la copa del árbol (C).

El crecimiento intranual en la exposición húmeda (2.95 cm) no fue estadísticamente diferente ($p>0.05$) de aquel en la exposición seca (2.13 cm) para un periodo de crecimiento de 5.3 bimestres (λ_{11}) (Cuadro 4), lo cual sugiere que esta especie tiene la capacidad de crecer casi todo el año (10 meses) (Figura 4A).

Cuadro 4. Resumen del análisis de varianza del modelo de Schumacher para construir la curva de crecimiento de *Tabebuia donnell-smithii* en la costa de Oaxaca.

Variable	Parámetro	Estimado	Error Estándar	g. l.	Valor de t calculado	Valor de rechazo ($pr> t $)
Exposición	Y_0	7.222659	0.6017723	32	12.00231	<.0001***
	λ_{01}	8.035583	0.5586751	32	14.38328	<.0001***
	λ_{02}	-2.225248	0.5015018	32	-4.43717	<.0001***
	λ_{11}	5.305065	0.4222785	32	12.56295	<.0001***
Inclinación	Y_0	7.220128	0.6518802	33	11.07585	<.0001***
	θ_{01}	7.379628	0.6374994	33	11.5759	<.0001***
	θ_{11}	5.28662	0.5350254	33	9.88106	<.0001***
Posición de copa	Y_0	7.220128	0.6518802	33	11.07585	<.0001***
	δ_{01}	7.379628	0.6374994	33	11.5759	<.0001***
	δ_{11}	5.28662	0.5350254	33	9.88106	<.0001***

* $p<0.05$; ** $p<0.01$; *** $p<0.001$

El potencial de crecimiento de *T. donnell-smithii* en inclinaciones de la pendiente menores al 10% fue de 7.38 cm, estadísticamente igual ($p>0.05$) al potencial de crecimiento en inclinaciones mayores (Figura 4B). El crecimiento intranual de los árboles en estas condiciones fue de 2.56 cm, los cuales se logran en 5.3 bimestres del año (Cuadro 4).

Esta especie tuvo un potencial de crecimiento de 7.38 cm en árboles con posición de copa alta, estadísticamente similar ($p>0.05$) al potencial de crecimiento de aquellos árboles con posiciones de copa media y baja (Figura 4C). El crecimiento intranual de los árboles en estas posiciones fue de 2.56 cm en un periodo de 5.3 (Cuadro 4).

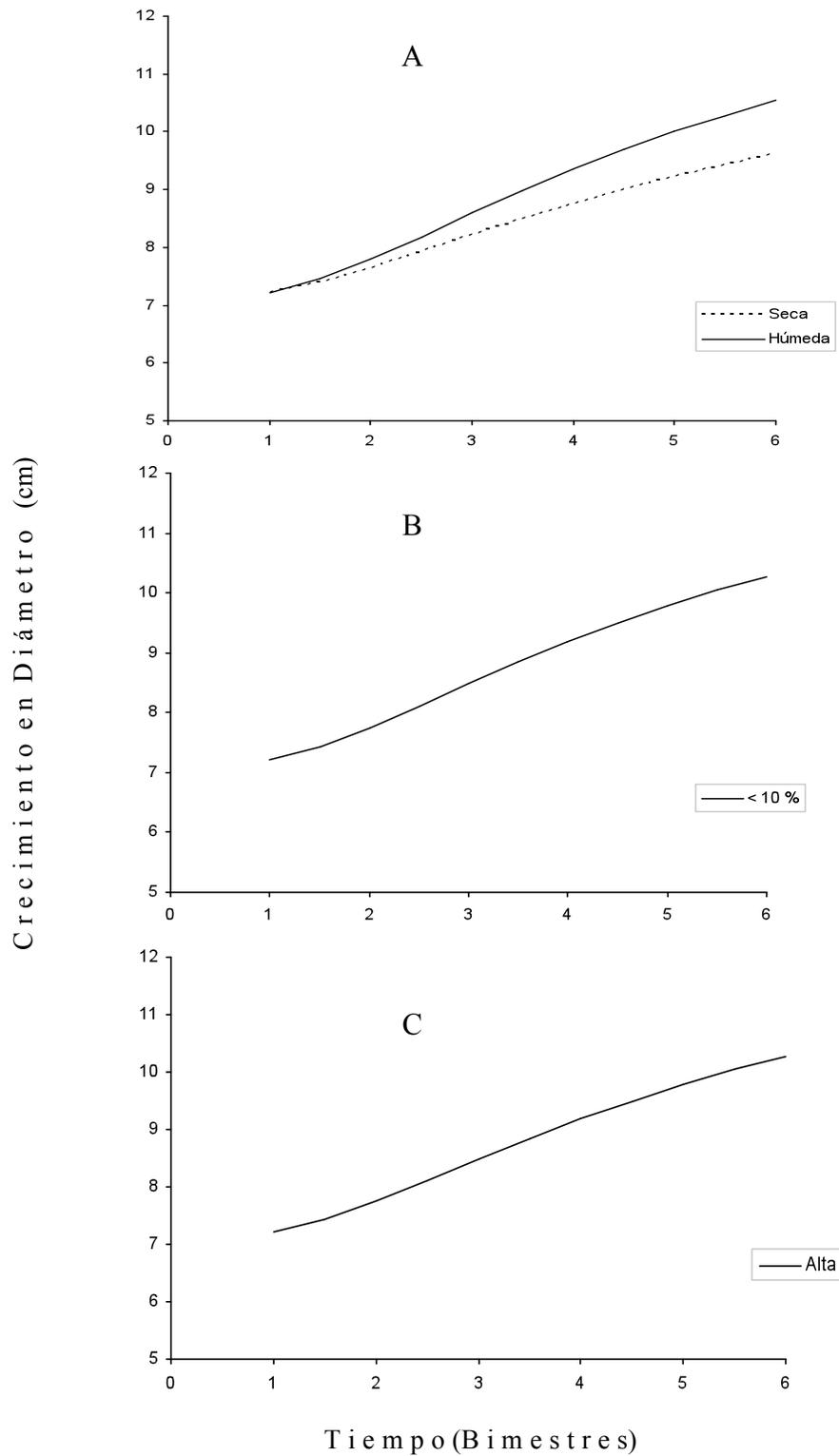


Figura 4. Crecimiento en diámetro de *Tabebuia donnell-smithii*: exposición (A) e inclinación (B) de la pendiente y posición de la copa del árbol (C).

1.4.2.3. *Cordia alliodora*

Los árboles de esta especie presentaron diámetros en tres categorías (5, 10 y 15 cm) y para la evaluación de su crecimiento respecto a la exposición de la pendiente la condición inicial promedio fue igual a 9.97 cm de diámetro (Y_0) (Cuadro 5).

Cuadro 5. Resumen del análisis de varianza del modelo de Schumacher para construir la curva de crecimiento de *Cordia alliodora* en la costa de Oaxaca.

Variable	Parámetro	Estimado	Error Estándar	g.l.	Valor de t calculado	Valor de rechazo (pr> t)
Exposición	Y_0	9.969719	1.193073	41	8.356334	<.0001***
	λ_{01}	1.842857	0.37977	41	4.852568	<.0001***
	λ_{02}	-0.8653	0.386956	41	-2.236172	0.0308 *
	λ_{11}	2.906008	1.283047	41	2.264928	0.0289 *
	λ_{12}	3.917377	1.760127	41	2.225622	0.0316 *
Inclinación	Y_0	9.918522	1.214682	8	8.165528	<.0001***
	θ_{01}	1.118169	0.156564	44	7.141936	<.0001***
	θ_{11}	2.91304	1.131323	44	2.574897	0.0135*
Posición de copa	Y_0	9.922231	1.170369	8	8.477862	<.0001***
	δ_{01}	1.364005	0.153263	43	8.899745	<.0001***
	δ_{03}	-1.089181	0.264948	43	-4.110918	0.0002***
	δ_{11}	2.957196	0.893716	43	3.308877	0.0019**

* p<0.05; **p<0.01; ***p<0.001

El potencial máximo de crecimiento estimado de *C. alliodora* en la exposición cenital fue de 1.84 cm (λ_{01}), significativamente ($p<0.05$) mayor que en la exposición seca: 0.97 cm ($\lambda_{01} + \lambda_{02}$) (Cuadro 5) pero no se encontraron diferencias estadísticamente significativas, entre las exposiciones húmeda y cenital.

El crecimiento intranual de los árboles en la exposición cenital fue de 0.69 cm en 2.9 bimestres (λ_{11}) (aproximadamente seis meses: mayo–octubre), mientras que en la exposición seca fue de 0.18 cm en 6.8 bimestres (12 meses) ($\lambda_{11} + \lambda_{12}$), significativamente ($p < 0.0001$) mayor. El crecimiento máximo en la exposición húmeda no presentó diferencias significativas ($p > 0.05$) respecto al crecimiento en las otras dos exposiciones.

C. alliodora tuvo un potencia máximo de crecimiento un año de 1.12 cm (θ_{01} : Cuadro 5) para inclinaciones de la pendiente menores al 10%, con un crecimiento intranual de 0.42 cm en un periodo de 2.9 bimestres. El crecimiento en inclinaciones de pendiente mayores al 10% no presentó diferencias significativas ($p > 0.05$) respecto al crecimiento en inclinaciones de pendiente menores al 10%.

El crecimiento máximo que alcanzaron los árboles con posiciones de copa altas en un año fue de 1.36 cm (δ_{01}), con una tasa de crecimiento intranual de 0.51 cm en un periodo aproximado de tres bimestres. En comparación, los árboles con posiciones de copa bajas presentaron un potencial máximo de crecimiento significativamente ($p < 0.001$) menor: 0.27 cm ($\delta_{01} + \delta_{03}$) (Cuadro 5), con una tasa de crecimiento intranual de 0.27 cm.

El crecimiento en diámetro de *C. alliodora* se observa gráficamente en la Figura 5, donde la exposición cenital presentó una tasa de crecimiento significativamente ($p < 0.001$) mayor respecto al crecimiento en las exposiciones seca y húmeda (Figura 5A); no se encontraron diferencias significativas ($p > 0.05$) entre porcentajes de inclinación de la pendiente (Figura 5B); y los árboles con posición de copa alta presentaron un crecimiento significativamente ($p < 0.001$) mayor que los de posición de copa baja, el crecimiento en la posición de copa media fue estadísticamente similar que al crecimiento en la posición de copa alta (Figura 5C).

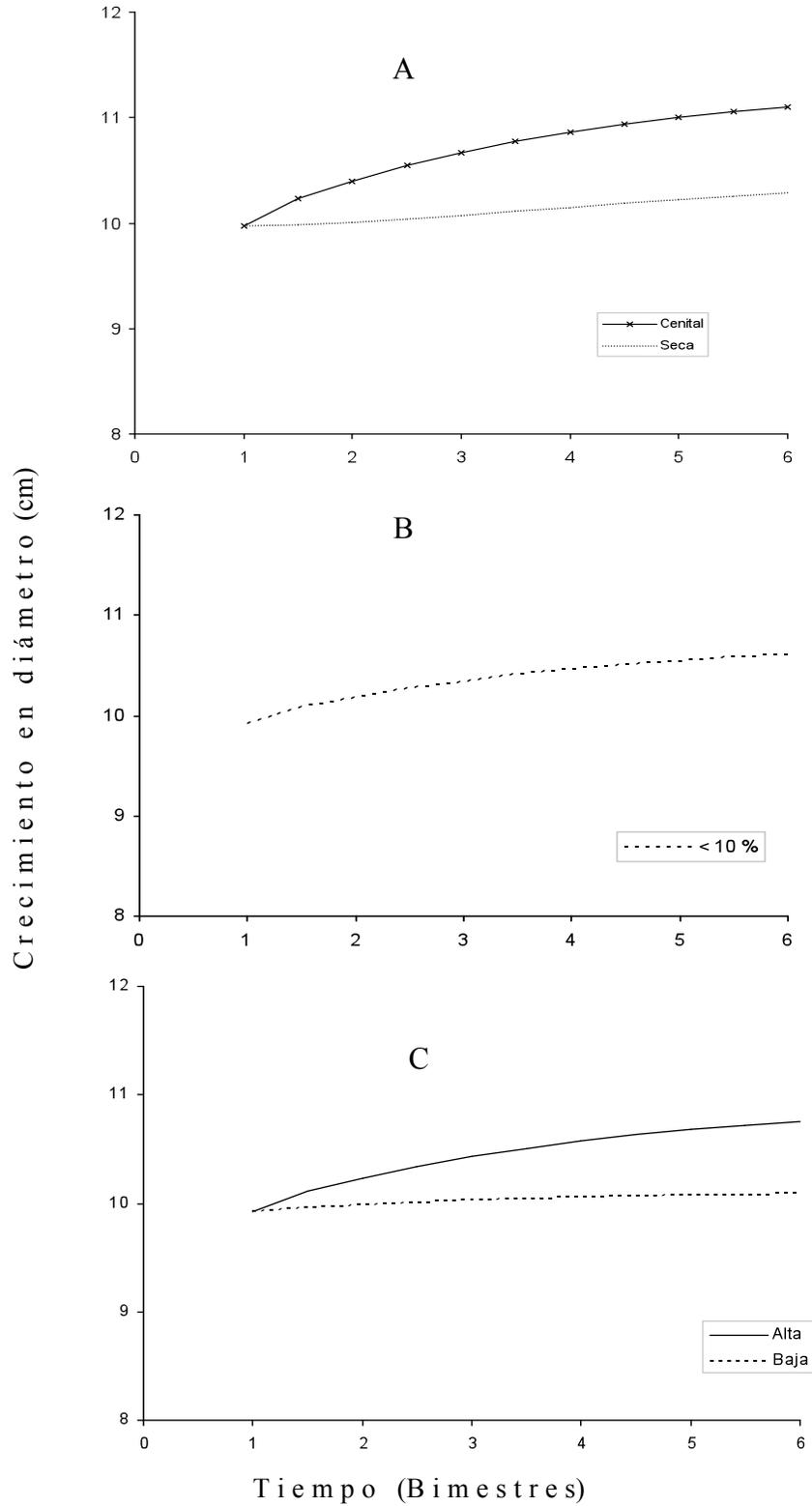


Figura 5. Crecimiento en diámetro de *Cordia alliodora*: exposición (A) e inclinación (B) de la pendiente y posición de la copa del árbol (C).

1.4.2.4. *Tabebuia rosea*

El diámetro inicial promedio para evaluar el crecimiento según la exposición de la pendiente fue de 8.16 cm (Y_0), con un potencial de crecimiento en la exposición cenital de 5.59 cm (λ_{01}) en un año bajo condiciones óptimas y una tasa de crecimiento intranual de 1.9 cm durante 5.4 bimestres en el año (Cuadro 6); lo cual fue significativamente ($p < 0.001$) diferente a lo obtenido en la exposición seca: máximo crecimiento de 2.33 cm ($\lambda_{01} + \lambda_{02}$) en el año y tasa real de crecimiento intranual de 0.79 cm en 5.3 bimestres. El crecimiento en la exposición húmeda no presentó diferencias estadísticamente significativas ($p > 0.05$) respecto al crecimiento en la exposición cenital.

El potencial máximo de crecimiento de los árboles en terrenos con inclinaciones de la pendiente mayores del 10 % fue de 4.78 cm ($\theta_{01} + \theta_{02}$), significativamente ($p < 0.01$) mayor respecto a aquellos en terrenos con pendiente menores al 10 % que fue de 2.5 cm (θ_{01}) (Cuadro 6); la tasa de crecimiento intranual también fue mayor en pendientes mayores al 10 % (1.63 cm) que en pendientes menores al 10% (0.86 cm) ambas durante 5.4 bimestres.

El crecimiento máximo de *T. rosea* con posición de copa alta fue de 4.04 cm (δ_{01}) (Cuadro 6), con una tasa de crecimiento intranual de 1.47 cm en 5.4 bimestres (δ_{11}); no se encontraron diferencias estadísticas significativas ($p > 0.05$) respecto al crecimiento de los árboles con posiciones de copa media y baja.

Cuadro 6. Resumen del análisis de varianza del modelo de Schumacher para construir la curva de crecimiento de *Tabebuia rosea* en la costa de Oaxaca.

Variable	Parámetro	Estimado	Error Estándar	g.l.	Valor de t calculado	Valor de rechazo (pr> t)
Exposición	Y_0	8.163534	1.029053	5	7.933054	0.0005***
	λ_{01}	5.594965	0.656544	27	8.521842	<.0001***
	λ_{02}	-3.260394	0.544867	27	-5.98384	<.0001***
	λ_{11}	5.386425	0.713461	27	7.549709	<.0001***
Inclinación	Y_0	8.157972	1.100859	26	7.41055	<.0001***
	θ_{01}	2.502068	0.675721	26	3.702813	0.001**
	θ_{02}	2.279927	0.764494	26	2.982269	0.0061**
	θ_{11}	5.362992	1.097899	26	4.884775	<.0001***
Posición de copa	Y_0	8.164838	1.180535	27	6.916219	<.0001***
	δ_{01}	4.044756	0.888625	27	4.551701	0.0001***
	δ_{11}	5.439147	1.350416	27	4.027755	0.0004***

* p<0.05; **p<0.01; ***p<0.001

Gráficamente el crecimiento en diámetro de *T. rosea* se observa en la Figura 6, donde la exposición cenital presentó una tasa de crecimiento significativamente ($p < 0.001$) mayor respecto a las exposiciones seca y húmeda (Figura 6A); los árboles en terrenos con inclinaciones de la pendiente superiores al 10 %, proyectaron crecimientos significativamente ($p < 0.001$) mayores que los árboles en terrenos con pendientes menores al 10 % (Figura 6B); y las posiciones de la copa media y baja no presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p > 0.05$) respecto a la posición de copa alta (Figura 6C).

Cuadro 7. Resumen de incrementos intranuales en diámetro (cm año⁻¹) por especie y condición biofísica evaluada en plantaciones de enriquecimiento de acahuals, San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca.

Especie	Exposición de la Pendiente			Inclinación de la Pendiente		Posición de Copa		
	Cenital	Húmeda	Seca	< 10%	> 10%	Alta	Media	Baja
<i>C. odorata</i>	1.97	--	2.55	2.28	1.88	2.34	--	1.24
<i>T. donnell-smithii</i>	ne	2.95	2.13	2.56	--	2.56	--	--
<i>C. alliodora</i>	0.69	--	0.17	0.42	--	0.50	--	0.27
<i>T. rosea</i>	1.90	--	0.79	0.85	1.63	1.47	--	--

-- = no presentó diferencias significativas respecto a la exposición cenital y posición de copa alta, ne =no se encontraron individuos

El mayor crecimiento en diámetro de *C. odorata* fue en la exposición seca (2.5 cm año⁻¹) seguido por la posición de copa alta (2.34 cm año⁻¹) y las inclinaciones de la pendiente menores al 10 % (2.28 cm año⁻¹) (Cuadro 7).

T. donnell-smithii presentó su mayor crecimiento intranual en diámetro en la exposición húmeda, seguido por las inclinaciones de la pendiente menores al 10 % y la posición de copa alta; *C. alliodora* tuvo su mayor crecimiento en la exposición cenital, seguido por la posición de copa alta y las inclinaciones de la pendiente menores al 10 %. Finalmente el crecimiento de *T. rosea* fue mayor en la exposición cenital (similar a *Cordia*), seguido por las inclinaciones de la pendiente mayores al 10% y la posición de copa alta.

1.5. DISCUSION

De las cuatro especies estudiadas, *T. donnell-smithii* presentó el mayor crecimiento en diámetro, resultado similar al reportado por López *et al.* (2006a), quienes estudiaron el crecimiento en diámetro de tres especies tropicales: *Bursera simaruba*, *Cordia elaeagnoides* y *Tabebuia donnell-smithii* en una selva mediana subcaducifolia (Colima, México), obteniendo para esta última una tasa de crecimiento promedio anual de 0.72 cm año^{-1} , mucho menor que la registrada en el presente estudio (Cuadro 7). Esto puede ser atribuido a condiciones diferentes en los sitios comparados: plantación de enriquecimiento en vegetación secundaria (Pochutla, Oaxaca) y selva natural poco perturbada (Colima); los árboles adultos en la segunda condición crecen, en general lenta pero constantemente y son afectados por la densidad natural del rodal en cuanto a la recepción de luz (Worbes, 1999).

En el presente estudio, el crecimiento en diámetro de los árboles de *C. odorata* con posición de copa alta fue mayor en los árboles con posición de copa baja; resultados similares fueron reportados para la misma especie en Nayarit, México donde la tasa de incremento promedio anual fue 1.4 cm mayor en árboles dominantes respecto a los suprimidos (Makocki, 2000).

Lo anterior puede explicarse en términos de lo sugerido por Pennington *et al.* (1981) y confirmado por Ricker *et al.* (2000), quienes señalan que *C. odorata* (Meliaceae) es una especie fuertemente demandante de luz solar.

La luz es el principal factor que limita el crecimiento en los árboles tropicales (Chazdon *et al.*, 1996). Y las especies difieren en sus respuestas a niveles altos de luz, así como su capacidad de soportar periodos con baja disponibilidad de la misma. Estas diferencias interespecíficas en cuanto a requerimientos de luz han sido frecuentemente utilizadas para explicar la gran diversidad de especies en bosques tropicales (Canham, 1989).

También *Swietenia macrophylla* King (Meliaceae) y *Brosimum alicastrum* Swartz (Moraceae), creciendo en áreas con un bosque secundario de 10 años de edad (Veracruz, México), han sido catalogadas como especies fuertemente demandantes de luz (Ramos y Del Amo, 1992).

La variabilidad en tasas de incremento de las especies es una característica común de las selvas, donde factores como calidad de sitio, ontogenia del árbol y competencia por espacio y luz originan una estructura irregular en dimensiones y edades (Clark y Clark, 1999).

Esta variabilidad también indica el potencial de una especie para reaccionar a cambios en las condiciones ambientales (Korning y Balsev, 1994).

De las cuatro especies estudiadas, *C. alliodora* y *T. donnell-smithii* no presentaron diferencias estadísticas de su crecimiento intranual entre las inclinaciones de pendiente evaluadas (<10 % y >10 %); estos resultados fueron similares a los reportados por Bellingham y Tanner (2000), quienes estudiaron el crecimiento de *Clethra occidentalis* y *C. alexandri* en terrenos con y sin inclinación. Para las mismas especies, estos autores registraron un mayor crecimiento medio en exposiciones sur que en exposiciones norte, lo cual coincide con lo obtenido para *C. odorata* en el presente trabajo.

Los árboles de *C. alliodora* que recibieron luz en forma directa (posición de copa alta) presentaron mayores crecimientos respecto de los que solo la recibieron de manera indirecta (posición de copa baja), lo cual se atribuye a que esta especie es intolerante a la sombra y fuertemente demandante de luz solar (Ramos y Del Amo, 1992). Sin embargo en el presente estudio *C. alliodora* presentó los valores más bajos de crecimiento en diámetro en comparación con las otras especies (Cuadro 7); esto se puede explicar considerando que esta especie forma parte de la vegetación secundaria (acahual) de la selva original en el lugar y está siendo afectada por la densidad natural de la vegetación: el diámetro decrece conforme la densidad incrementa, es decir una relación inversa entre el crecimiento en diámetro y la densidad (Hummel, 2000).

Estos resultados coinciden con los reportados por López *et al.* (2006a) para *C. elaeagnoides*, especie considerada como de madera dura (Pennington y Sarukhán, 1998), que presentó una tasa de crecimiento muy reducida comparada con otras especies tropicales (Cuadro 8); pero contrastan con lo obtenido por Lozada *et al.* (2003), quienes evaluaron el crecimiento de ocho especies tropicales en plantaciones de enriquecimiento en fajas (4 a 7 años de edad) en la Guayana Venezolana, siendo *C. alliodora* la especie que creció más rápidamente con una tasa de crecimiento de 0.81 cm año^{-1} (Cuadro 8).

Cuadro 8. Tasas de incremento medio anual en diámetro, obtenidas mediante bandas dendrométricas, para algunas especies de árboles tropicales.

Especie	Incremento (cm año ⁻¹)	Tipo de Ecosistema	País	Fuente
<i>Tabebuia neochrysantha</i>	1.05	Bn	Costa Rica	Daubenmire (1972)
<i>Cordia alliodora</i>	2.41			
<i>Tabebuia barbata</i> (70 años)	0.11	Bn	Venezuela	Worbes (1989)
<i>Tabebuia barbata</i> (17 años)	0.47			
<i>Cedrela odorata</i>	0.18	Bn	Venezuela	Worbes (1999)
<i>Swietenia macrophylla</i>	0.12			
<i>Cordia apurensis</i>	0.13			
<i>Bursera simaruba</i>	0.44	Bn	México	Makocki y Valdez Hernández (2001)
<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	1.27			
<i>Cedrela odorata</i>	1.33			
<i>Bursera simaruba</i>	0.13	Bn	México	López <i>et al.</i> (2006a)
<i>Tabebuia donnell-smithii</i>	0.41			
<i>Cordia elaeagnoides</i>	0.06			
<i>Tabebuia rosea</i>	0.57	Pe	Venezuela	Corredor (2001)
<i>Cordia alliodora</i>	0.22			
<i>Cedrela odorata</i>	0.67	Pe	Venezuela	Lozada <i>et al.</i> (2003)
<i>Cordia alliodora</i>	0.81			
<i>Tabebuia serratifolia</i>	0.46			
<i>Cedrela odorata</i>	2.02	Pe	México	Presente estudio
<i>Tabebuia donnell-smithii</i>	2.82			
<i>Cordia alliodora</i>	0.42			
<i>Tabebuia rosea</i>	1.35			

Bn = Bosque natural; Pe = Plantaciones de enriquecimiento

A pesar de lo anterior, las tasas anuales de crecimiento de *T. rosea* y *C. alliodora* en el presente estudio fueron en promedio de 1.35 y 0.42 cm año⁻¹, respectivamente, las cuales son mayores que las reportadas para *T. rosea* (0.57 cm año⁻¹) y *C. alliodora* (0.22 cm año⁻¹) en plantaciones de enriquecimiento en fajas (24 años de edad) en Caimital, Estado de Barinas, Venezuela (Corredor, 2001). Estos resultados deben de enmarcarse en la condición anual del estudio ya que para hacer verdaderamente comparables estos resultados, nuestro estudio necesita de datos de varios años.

La variabilidad en tasas de incremento en diámetro de especies arbórea según su desarrollo en bosques naturales o plantaciones de enriquecimiento, como se observa en el Cuadro 8, podría atribuirse a diferencias ecológicas entre sitios evaluados, mantenimiento inadecuado, y técnicas ineficientes de plantación, así como falta de labores complementarias.

El manejo de plantaciones de enriquecimiento es complejo debido al control del régimen de luz que requiere cada especie, ya que los árboles adyacentes a la faja cierran el dosel a una cierta altura (Montagnini *et al.*, 1997; Appanah *et al.*, 2000); esto podría explicar el crecimiento inferior de árboles con posiciones de copa baja, como el caso de *C. odorata*, *C. alliodora* y *T. rosea*, comparado con el crecimiento superior de árboles cuya copa es alta.

1.6. CONCLUSIONES

Tabebuia donnell-smithii presentó el mayor potencial de crecimiento en diámetro y la tasa más alta de crecimiento intranual, seguida por *Cedrela odorata*, *Tabebuia rosea*; y *Cordia alliodora*.

La exposición seca de la pendiente favoreció el crecimiento en diámetro de *Cedrela odorata*, mientras que las exposiciones húmeda y cenital beneficiaron el de *T. donnell-smithii*, *T. rosea* y *C. alliodora*.

T. rosea creció mejor en pendientes mayores al 10 %, mientras que el crecimiento de las otras tres especies fue superior en pendientes menores al 10 %.

El crecimiento de los individuos con posición de copa baja fue el menor en las cuatro especies estudiadas, debido a la insuficiente luz recibida; esto debe ser considerado en la aplicación de futuras labores silviculturales (podas y raleos).

CAPITULO 2. PERIODICIDAD DEL CRECIMIENTO

2.1. INTRODUCCIÓN

En la mayoría de las especies de árboles tropicales, alcanzar el dosel en una selva natural puede tomar más de 50 años. Este lapso de tiempo es largo si lo comparamos con la duración de la mayoría de los estudios de crecimiento de árboles que se realizan en sitios permanentes de muestreo (<20 años) (Condit, 1995). Los periodos de tiempo son cortos si se pretende realizar el seguimiento de árboles en forma individual, desde su estado de plántula hasta que alcancen el dosel. Hasta ahora no existen datos empíricos que describan la trayectoria de crecimiento de árboles tropicales hasta alcanzar el dosel (Clark y Clark, 2001).

El análisis de los anillos de crecimiento puede ser una herramienta muy útil para llenar este vacío y permitir la reconstrucción de patrones históricos de crecimiento a lo largo de la existencia de los árboles. Estos datos de crecimiento a largo plazo pueden revelar diferencias entre especies en cuanto a patrones temporales de crecimiento hacia el dosel, como indicadores de diferencias en historias de desarrollo de los árboles. El análisis de los anillos de crecimiento ha contribuido significativamente a entender mejor la ecología de los árboles y la dinámica de los bosques en climas templados (Canham, 1985; Orwig y Abrams, 1994; Lusk y Smith, 1998; Cao y Ohkubo, 1999; Wright *et al.*, 2000), y se espera una contribución similar para los bosques en climas tropicales.

Actualmente se puede observar un gran avance en el campo de la investigación de anillos de crecimiento en los trópicos. Los primeros estudios (antes de 1990) fueron realizados con el propósito de describir y clasificar las diferentes zonas de crecimiento (e.g., Coster, 1927;

Worbes, 1995), así como para probar la naturaleza anual de los anillos (e.g., Mariaux, 1967; Bass y Vetter, 1989). Posteriormente, muchos investigadores utilizaron los anillos de crecimiento de árboles tropicales para estudiar las relaciones entre crecimiento y clima, así como para desarrollar cronologías de anillos de crecimiento sensibles a cambios climáticos (Jacoby y D'Arrigo, 1990; Pumijumnong *et al.*, 1995; Buckley *et al.*, 1995; Stahle *et al.*, 1999; Enquist y Leffler, 2001). En los últimos cinco años, los anillos de crecimiento han sido utilizados en forma intensiva para obtener información sobre la edad de los árboles, la dinámica del bosque y su historia (e.g. Worbes *et al.*, 2003; Dezzeo *et al.*, 2003; Fichtler *et al.*, 2003; Baker *et al.*, 2005; Brienen y Zuidema, 2006).

En manejo forestal, el conocimiento de la edad de los árboles es importante para determinar turnos, ciclos de corta y el tiempo durante el cual se renueva una masa forestal (Mendoza, 1993). Una forma de conocer la edad en los árboles es por recuento de sus anillos de crecimiento; sin embargo, para ello es necesario identificar su existencia, verificar que realmente correspondan a un año de crecimiento, para no confundirlos con anillos falsos, o que sean éstos visibles en las especies de interés (López *et al.*, 2006b). Recientemente se ha descrito la utilidad de estudiar los anillos de crecimiento como herramienta para evaluar las prácticas de manejo forestal, ya que proveen información valiosa sobre la edad de los árboles cosechables; a pesar de ello, estos son escasamente utilizados en las regiones tropicales (Stahle *et al.*, 1999; Worbes *et al.*, 2003, Brienen y Zuidema, 2006). En el trópico de México aún es incipiente su investigación y solamente en algunas especies se ha comprobado que los anillos de crecimiento se forman cada año (Makocky y Valdez-Hernández, 2001); pero considerando la estacionalidad climática en las zonas tropicales de nuestro país, se espera que una gran cantidad de especies formen anillos de crecimiento anual.

En este capítulo se pretende generar información que apoye un mejor manejo de las cuatro especies forestales estudiadas en la costa de Oaxaca, a través de conocer la periodicidad con que forman sus anillos de crecimiento en la madera.

2.2. OBJETIVO

Determinar la presencia de anillos de crecimiento y su periodicidad en cuatro especies arbóreas: *Cedrela odorata* L., *Tabebuia donnell-smithii* Rose, *Tabebuia rosea* (Bertol.) DC. y *Cordia alliodora* (Ruíz & Pav.) Oken., y su relación con la precipitación pluvial del área de estudio.

2.3. MATERIALES Y METODOS

Para conocer la periodicidad de los anillos de crecimiento se provocaron heridas en el cambium de las especies estudiadas, seleccionando un total de 17 árboles en cinco categorías diamétricas (Cuadro 9).

Cuadro 9. Número de árboles marcados con incisiones al fuste por especie y categoría diamétrica.

Categoría diamétrica Especie	I (2.5–7.5 cm)	II (7.6–12.5 cm)	III (12.6–17.5 cm)	IV (17.6–22.5 cm)	V (22.6–27.5 cm)	Total
<i>Cedrela odorata</i>	3	3	2	1	1	10
<i>Cordia alliodora</i>	1	1	1			3
<i>Tabebuia rosea</i>	1	1				2
<i>Tabebuia donnell-smithii</i>	1	1				2

En cada árbol se realizaron heridas con una navaja en el fuste a 1.30 m de altura (DAP), con objeto de generar cicatrices en fechas conocidas. Esta técnica, que consiste en destruir el cambium vascular, es conocida como “Ventanas de Mariaux” (Mariaux, 1967) y se ha adoptado como un método sencillo y práctico para conocer la periodicidad del crecimiento en árboles tropicales (Worbes, 1989; Makocki, 2000; López *et al.*, 2006b). Las heridas fueron de 5 mm de ancho por 20 cm de largo y se realizaron cada dos meses alrededor del fuste durante 14 meses (marzo 2005 – mayo 2006). Estos árboles fueron derribados en julio del 2006 para extraer secciones transversales (rodajas) de aproximadamente 10 cm de grosor a la altura donde se hicieron las heridas, con la finalidad de observar la periodicidad en la formación de la madera a través de observaciones macroscópicas. Para lograr una mejor visibilidad de las zonas de crecimiento fue necesario pulir las rodajas utilizando lijas con varios grados de textura (100 a 600).

Con la finalidad de relacionar el incremento en diámetro de las especies estudiadas con las épocas de lluvia y sequía en la región, se midieron con la ayuda de un vernier y por rodaja los anchos de las zonas de crecimiento para cada herida bimensual al cambium; posibles diferencias significativas en el ancho de estas zonas de crecimiento respecto a las dos épocas del año mencionadas se identificaron con un análisis de regresión lineal simple empleando el siguiente modelo estadístico:

$$Y = \beta_h + \beta_s I_s + \varepsilon \quad (7)$$

Donde: Y es el incremento relativo; obtenido al dividir el incremento radial, entre el diámetro, de la rodaja multiplicado por 10 como factor de escala; β_h es el promedio del incremento radial

relativo durante la época de lluvias, I_s es la variable indicadora igual a 1 para la época seca, cero de otra forma, β_s es el parámetro que representa el efecto de la época seca sobre β_h y ε es el error del modelo.

2.4. RESULTADOS

Las cicatrices formadas por las incisiones realizadas se presentaron de manera notoria en las rodajas de las cuatro especies y para las cinco categorías diamétricas. Sin embargo la distinción de los anillos de crecimiento, varió considerablemente entre especies: *C. odorata* y *T. donnell-smithii* mostraron sus anillos claramente visibles a simple vista, mientras que *T. rosea* y *C. alliodora* requirieron de la ayuda de una lupa.

En las cuatro especies la formación de los anillos de crecimiento fue periódica y anual: un anillo completo de mayo del 2005 a mayo del 2006 en *C. odorata* (Figura 7) y *C. alliodora* (Figura 8) y de marzo del 2005 a marzo del 2006 en *T. donnell-smithii* (Figura 9) y *T. rosea* (Figura 10). Considerando la separación observada entre cicatrices, los periodos de mayor crecimiento fueron diferentes en las cuatro especies estudiadas: julio a noviembre (4 meses) en *C. odorata* (Figura 7), mayo a marzo (10 meses) en *T. donnell-smithii* (Figura 9), julio a septiembre (2 meses) en *C. alliodora* (Figura 8) y septiembre a enero (4 meses) en *T. rosea* (Figura 10).

El crecimiento fue generalmente mayor durante la época de lluvias que durante la sequía. *C. odorata* disminuyó notablemente su crecimiento cuando la precipitación llegó a cero mm en enero del 2006 (Figura 11), mientras que *T. donnell-smithii* (Figura 12C) y *T. rosea* (Figura 12 b) continuaron su crecimiento dos meses después, hasta marzo del 2006.

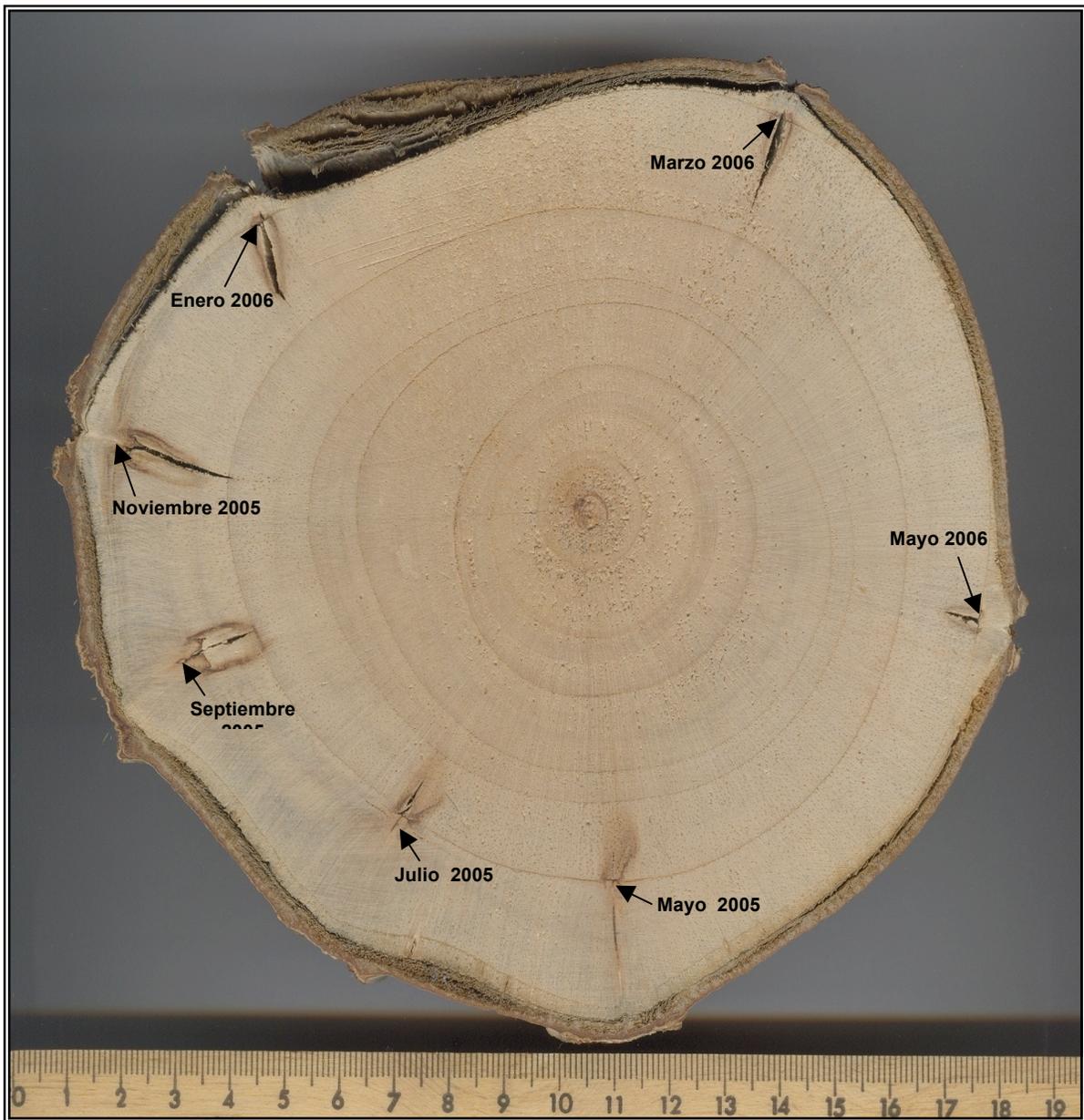


Figura 7. Anillos de crecimiento en sección transversal (rodaja) de *Cedrela odorata*: se observa la periodicidad a través de las cicatrices generadas cada dos meses (mayo 2005 - mayo 2006) por medio de las heridas al cambium (“Ventanas de Mariaux”).

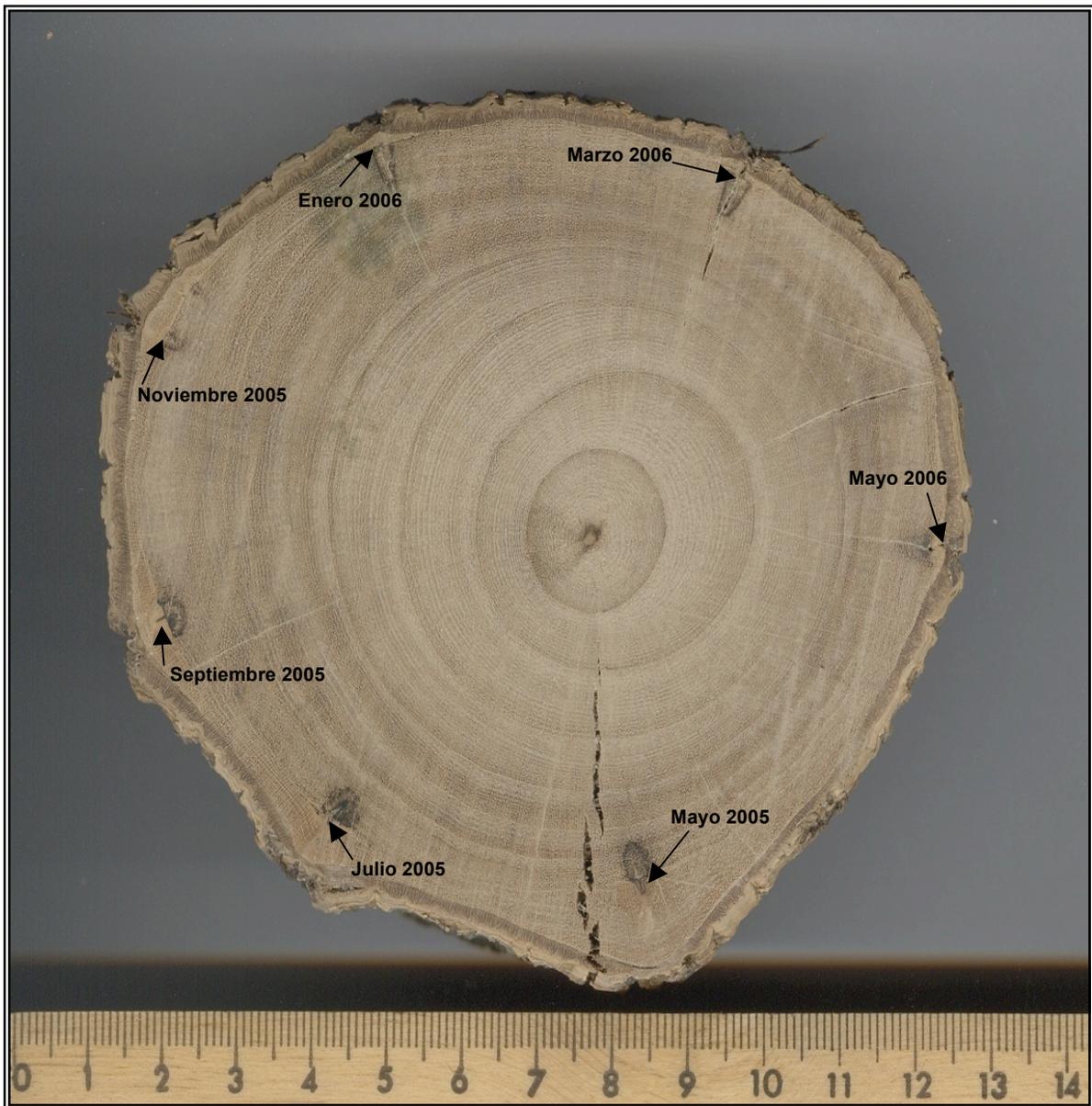


Figura 8. Anillos de crecimiento en sección transversal (rodaja) de *Cordia alliodora*: se observa la periodicidad a través de las cicatrices generadas cada dos meses (mayo 2005 - mayo 2006) por medio de las heridas al cambium (“Ventanas de Mariaux”).

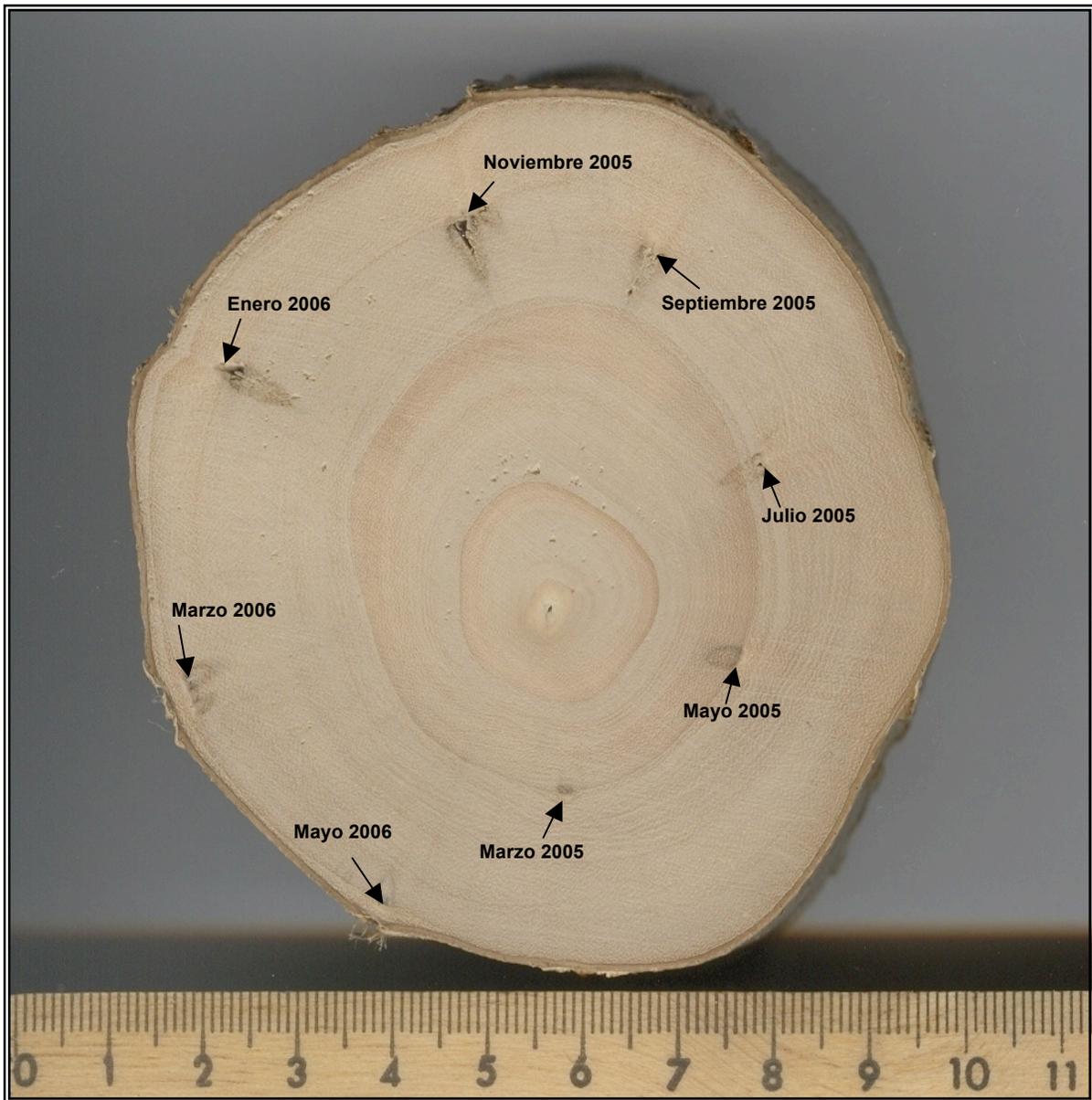


Figura 9. Anillos de crecimiento en sección transversal (rodaja) de *Tabebuia donnell-smithii*: se observa la periodicidad a través de las cicatrices generadas cada dos meses (marzo 2005 - mayo 2006) por medio de las heridas al cambium (“Ventanas de Mariaux”).

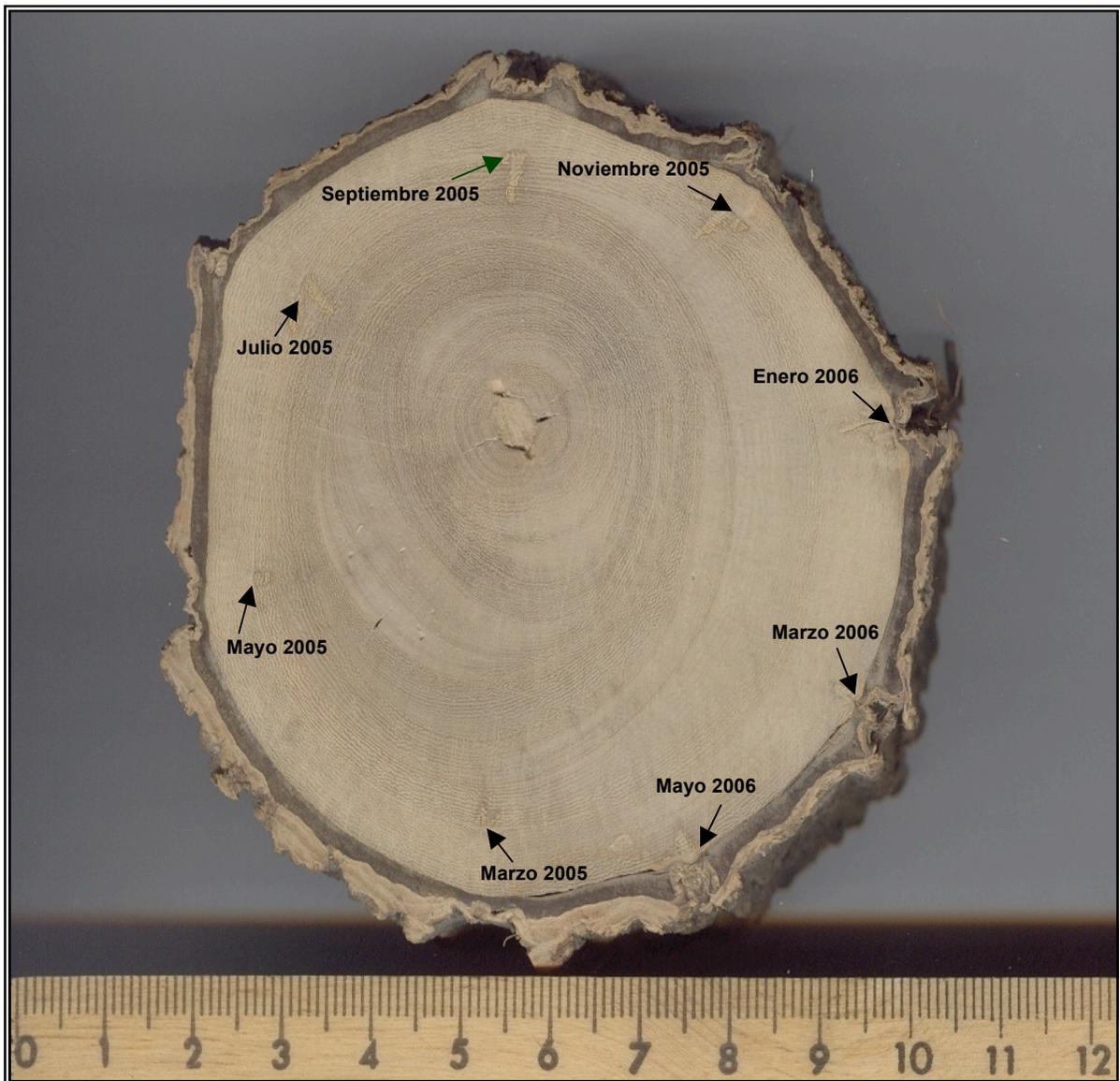


Figura 10. Anillos de crecimiento en sección transversal (rodaja) de *Tabebuia rosea*: se observa la periodicidad a través de las cicatrices generadas cada dos meses (marzo 2005 – mayo 2006) por medio de las heridas al cambium (“Ventanas de Mariaux”).

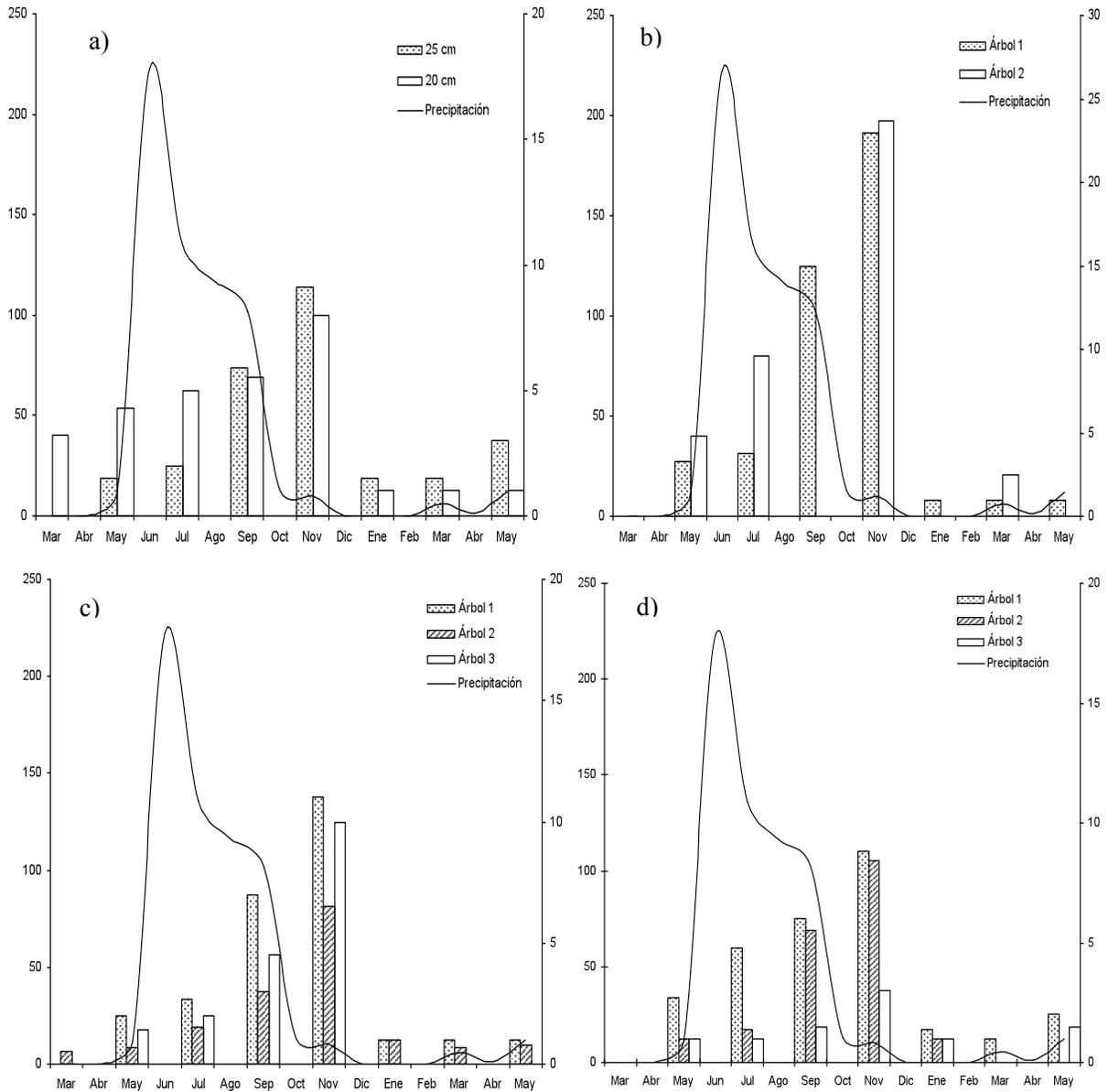


Figura 11. Relación de la precipitación (mm, escala izquierda, línea) con el ancho de las zonas de crecimiento (mm, escala derecha, barras) para 10 árboles de *Cedrela odorata* en diferentes categorías diamétricas: 20 y 25 cm (a), 15 cm (b), 10 cm (c), 5 cm (d). Periodo de estudio: marzo 2005 – mayo 2006.

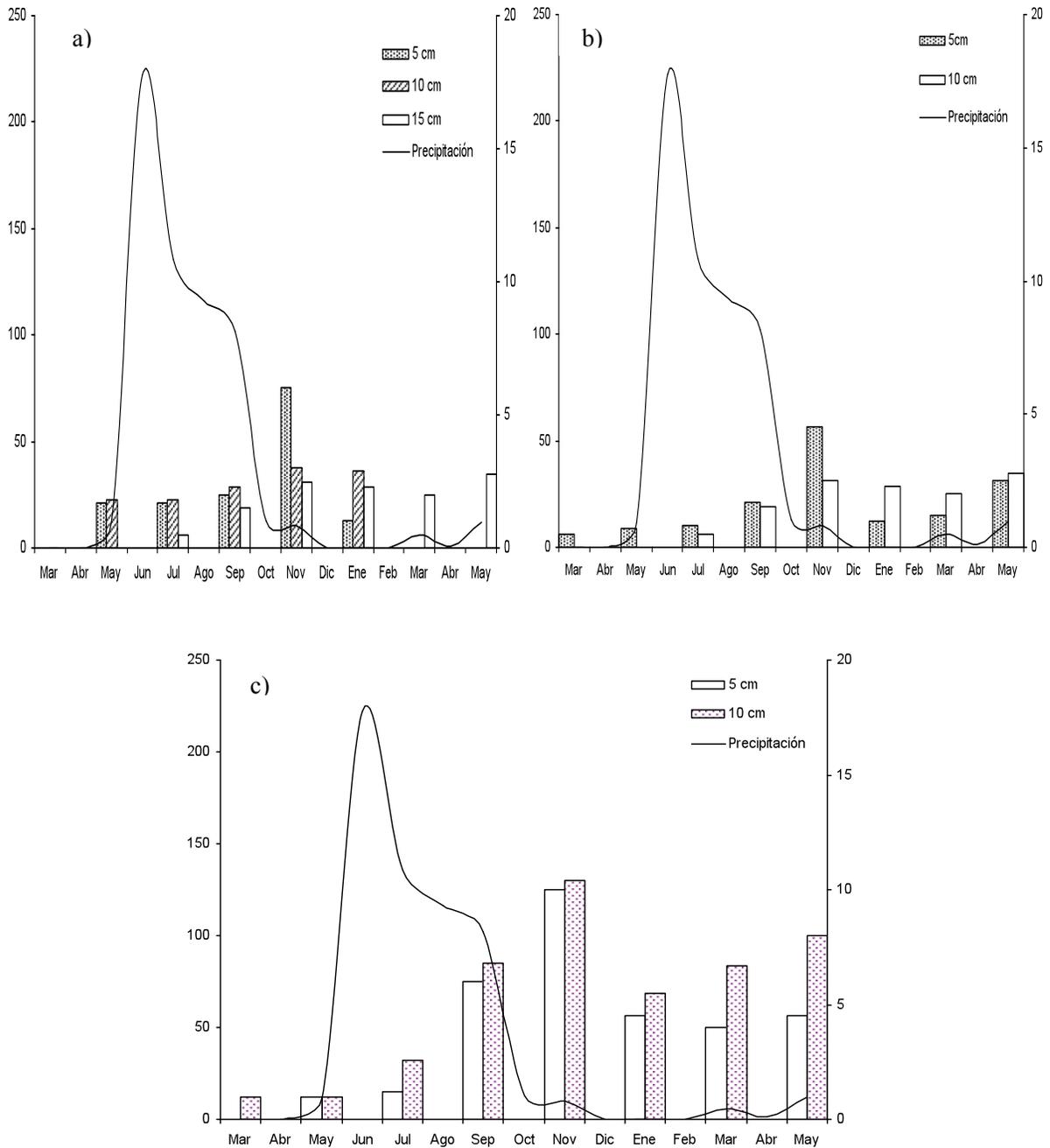


Figura 12. Relación de la precipitación (mm, escala izquierda, línea) con el ancho de las zonas de crecimiento (mm, escala derecha, barras) para siete árboles (en diferentes categorías diamétricas) de *Cordia alliodora* (a), *Tabebuia rosea* (b) y *T. donnell-smithii* (c). Periodo de estudio: marzo 2005 – mayo 2006.

No obstante que el crecimiento de las cuatro especies estudiadas fue muy sensible al aumento de la precipitación en junio (222.2 mm), el máximo de incremento en ancho de anillos se obtuvo en noviembre, aun cuando la cantidad de precipitación disminuyó hasta 10.2 mm (Figuras 11 y 12).

Gráficamente se observa que los árboles en *C. odorata* de categorías de 15 cm de diámetro presentaron los mayores incrementos en sus zonas de crecimiento (Figura 11b), seguidos de aquellos en las categorías de 10 cm (Figura 11c), 20 y 25 cm (Figura 11a) y 5 cm (Figura 11d).

Tabebuia donnell-smithii, fue la segunda especie (Figura 12c), después de *C. odorata*, con los mayores incrementos en sus zonas de crecimiento, seguida por *T. rosea* (Figura 12b) y *C. alliodora* (Figura 12a).

El incremento promedio de las zonas de crecimiento en la época de lluvias (3.91 mm/cm/bimestre) (β_h), fue significativamente ($p < 0.001$) mayor comparado con aquel durante la sequía (1.03 mm/cm/bimestre) (β_s) (Cuadro 10).

Cuadro 10. Resultados del análisis de regresión para valores del ancho de zonas de crecimiento en las cuatro especies estudiadas.

Concepto	Valor	Error Estándar	Valor de t	Valor de P
Época de lluvias (β_h)	0.391393902	0.03558877	10.99767994	0.0001***
Época de sequía (β_s)	-0.287397208	0.058116218	-4.945215243	0.0001***

*** $p < 0.001$

2.5. DISCUSIÓN

Cedrela odorata presentó anillos de crecimiento anual, similar a lo encontrado en la misma especie por Worbes (1999) en Venezuela, por Makocki y Valdez-Hernández (2001) en Nayarit, México; por Dünisch *et al.* (2002) en Brasil y por Brien y Zuidema (2005) en Bolivia. De acuerdo con Makocki (2000), los anillos en *C. odorata* son claramente visibles gracias a su porosidad anular y a las bandas de parénquima que, junto con los vasos de mayor tamaño, constituyen el borde entre dos anillos sucesivos.

Dünisch *et al.* (2002) evaluaron zonas de incremento en rodajas de árboles con edad conocida (provenientes de una plantación) y confirmaron que *C. odorata* forma anillos anuales tanto en su etapa juvenil como adulta. La formación periódica de estos anillos se relaciona con la presencia de temporadas de lluvia o sequía (Jacoby, 1989; Worbes, 1999).

La disponibilidad de agua tiene gran influencia en el crecimiento de los árboles tropicales, no solamente como resultado del déficit de precipitación durante ciertas estaciones del año, sino también debido a la variación de la misma entre años (Worbes, 1999; Brien y Zuidema, 2005). *Tabebuia donnell-smithii* y *T. rosea* mostraron anillos de crecimiento anual en sus secciones transversales (rodajas), similar a lo encontrado por Callado *et al.* (2004) en Río de Janeiro, Brasil, para *T. umbellata* (Sond.) en la cual sus anillos están delimitados por bandas de parénquima marginal asociadas a capas de fibras: gruesa en la madera tardía y delgada en la madera temprana.

En contraste, Barajas-Morales y León (1989) mencionan que en *T. crysantha* (Jacq.) Nichol y *T. impetiginosa* (Mart.) Standl. la delimitación de los anillos está dada por un acomodo de fibras aplanadas y parénquima marginal; mientras que López *et al.* (2006b) para *T. donnell-smithii* en Colima, México, apreciaron fibras aplanadas pero no parénquima marginal.

Según Woodcock (1994), señala que el 40% de las especies tropicales en México tienen porosidad anular, como *C. odorata* y *T. donnell-smithii*, debido a la presencia de una estacionalidad en la precipitación (sequía).

Los resultados obtenidos en este estudio para *Cordia alliodora* coinciden con los reportados por Tschinkel (1966) y Devall *et al.* (1995), quienes mencionan que los anillos en esta especie son anuales; resultados similares fueron reportados por Vetter y Botosso (1989) para *C. goeldiana* en Brasil y por López *et al.* (2006b) para *C. elaeagnoides* en Colima, México, ésta última presentó una porosidad semianular y anillos de crecimiento delineados generalmente por fibras de pared aplanada radialmente y por escaso parénquima marginal.

La formación de anillos de crecimiento en los árboles marcados puede atribuirse a una disminución de la precipitación en el área de estudio (Figuras 11 y 12) durante la época seca (octubre – mayo: con 54.2 mm). Worbes (1999) menciona que durante la estación seca, y debido al déficit de agua, ciertas especies de árboles muestran con frecuencia un crecimiento en diámetro reducido o una dormancia en el tejido del cambium, lo que resulta en la formación de un tejido distintivo visible como anillo de crecimiento. De la misma forma, Brienen y Zuidema (2005) mencionan que en dicha época seca el crecimiento de los árboles es periódicamente limitado por una carencia de agua resultando en la formación de anillos anuales.

En las cuatro especies estudiadas, la variación en el crecimiento (ancho de anillos) de año a año fue determinada por la variación en la precipitación interanual. Es decir, se observó una relación estrecha entre el crecimiento y la cantidad de precipitación: mayor crecimiento en meses relativamente más húmedos y menor crecimiento en meses secos, lo cual indica que la precipitación puede ser un factor limitante en el crecimiento de los árboles.

El crecimiento en la etapa inicial de la época de lluvias depende fuertemente de la precipitación, mientras que el crecimiento en la etapa final de esta época es menos limitado por la precipitación (Brienen y Zuidema, 2005). Situación similar a lo encontrado en las cuatro especies estudiadas y particularmente en *T. donnell-smithii* (Figura 12c), donde el crecimiento no fue dependiente de la cantidad de precipitación durante los meses de transición de la época de lluvias a la sequía (octubre - noviembre) (Figura 1). Esto puede deberse a la capacidad de acumulación de reservas de esta especie durante este periodo, las cuales pueden ser utilizadas para aumentar su crecimiento durante la próxima época seca. Lo anterior muestra que el crecimiento en árboles tropicales puede ser limitado por patrones en la precipitación, así como por una baja disponibilidad de agua en el suelo y que las especies pueden diferir en su respuesta a estos patrones (Dünisch *et al.*, 2002; Brienen y Zuidema, 2005).

2.6. CONCLUSIONES

En las cuatro especies estudiadas (*Cedrela odorata*, *Cordia alliodora*, *Tabebuia donnell-smithii* y *T. rosea*) se identificaron anillos de crecimiento distinguibles a nivel macroscópico, los cuales fueron periódicos y anuales.

El grado de visibilidad de estos anillos fue mayor en *C. odorata* y *T. donnell-smithii* que en *C. alliodora* y *T. rosea*.

La formación de los anillos de crecimiento en las cuatro especies estudiadas estuvo estrechamente relacionada con la precipitación: el ancho de las zonas de crecimiento fue significativamente mayor en la época de lluvias que en la sequía.

CAPÍTULO 3. RENDIMIENTO MADERABLE

3.1. INTRODUCCIÓN

A pesar de existir una serie de investigaciones encaminadas a generar nuevas técnicas para lograr un manejo óptimo de los recursos forestales, como los modelos de crecimiento y rendimiento, en México aun se tienen muchas carencias para el desarrollo, implementación y ejecución de estas herramientas, las cuales se han estudiado principalmente en especies arbóreas de bosques naturales en clima templado como las coníferas.

Para muchas especies arbóreas en los trópicos no existe información científica previa acerca de su crecimiento y rendimiento, recurriendo comúnmente a estimaciones realizadas por los dueños del bosque. Esto lleva a su vez a una falta de información objetiva sobre el análisis beneficio/costo para la relación especie–sitio de plantación y, como consecuencia, a la inexistencia de un verdadero manejo en la mayoría de los bosques tropicales (Ricker y Del Río, 2004).

Las especies nativas de clima cálido en México, a pesar de su importancia económica y ecológica, carecen en su mayoría de información cuantitativa acerca de su crecimiento y desarrollo, básica para su manejo. Una alternativa para obtener dicha información es mediante el estudio de plantaciones establecidas, en las cuales se conoce la edad de las especies plantadas.

Conocer la edad en especies tropicales es una de las mayores limitantes para su manejo, por ello en los últimos años se han realizado una serie de estudios relacionados con el crecimiento de especies arbóreas tropicales en plantaciones establecidas; en México, se han llevado a cabo trabajos relativos a sistemas de crecimiento y rendimiento maderable en plantaciones de *Swietenia macrophylla* (García *et al.*, 1998), y *Eucalyptus* spp (Gómez *et al.*, en revisión; Reyes *et al.*, en revisión).

En la región de la costa de Oaxaca, fueron establecidas plantaciones forestales de enriquecimiento de acahual, con especies de alto valor comercial. Estas plantaciones siguen una distribución sistemática, regular y ordenada, en líneas, fajas o grupos dentro del bosque ó acahual, y se consideran un método adecuado para regenerar bosques sobre-explotados donde la regeneración natural es insuficiente y se puede incrementar el volumen maderable con especies de alto valor comercial (Adjers *et al.*; 1995 Montagnini *et al.*, 1997). Sin embargo, actualmente no se cuenta con información sobre el crecimiento y rendimiento maderable de estas especies tropicales, sea en bosques naturales o en plantaciones.

Considerando lo anterior, se propone el desarrollo de un sistema de crecimiento y rendimiento maderable para las especies *Cedrela odorata* (cedro) y *Tabebuia donnell-smithii* (primavera) en la región, a partir de datos de diámetro y altura obtenidos de remediciones en sitios de muestreo permanentes en plantaciones de enriquecimiento de acahual.

3.2. OBJETIVOS

Objetivo general

Construir un sistema de crecimiento y rendimiento maderable en plantaciones de enriquecimiento de acahual en San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca.

Objetivos específicos

- 1) Determinar un sistema de cubicación de volumen total del fuste para *Cedrela odorata* L. y *Tabebuia donnell-smithii* Rose mediante modelos matemáticos.
- 2) Evaluar la productividad de las especies estudiadas mediante la elaboración de un índice de sitio basado en el crecimiento de altura dominante.
- 3) Construir un sistema de crecimiento y rendimiento maderable a través de modelos de predicción explícita (totalidad de rodal) para volumen por hectárea.

3.3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.3.1. Área de influencia

La presente investigación se llevó a cabo en plantaciones de enriquecimiento de acahual con edades comprendidas de tres a 10 años en los predios: El Penjamo, El Carnizuelo, Arroyo Rico y El Riego, ubicados en las inmediaciones del poblado San José Chacalapa, perteneciente al municipio de Pochutla, estado de Oaxaca (ver Capítulo 1, pág. 10, para descripción del área de estudio).

3.3.2. Obtención de datos

3.3.2.1. Sitios permanentes de dimensiones fijas

En marzo del 2005 se establecieron 14 sitios permanentes de dimensiones fijas: 20 x 20 metros (400 m²), los cuales se ubicaron en el terreno utilizando cintas métricas, brújula (Suunto), machetes para limpiar límites y estacas de madera, las cuales fueron marcadas con pintura vinílica. Los árboles ubicados dentro de los sitios fueron medidos en marzo del 2005 y remedidos al año siguiente (marzo del 2006). Cada árbol se identificó con pintura mediante un número secuenciado de control y se le registró su diámetro a la altura del pecho (DAP), altura total y edad con base en los registros existentes de la plantación, asegurándose que correspondieran al paraje de estudio; además, se obtuvieron datos como nombre del predio, número de sitio, especie, grado o porcentaje de inclinación de la pendiente, exposición de la pendiente y ubicación geográfica.

3.3.2.2. Cubicación de árboles en pie

Cedrela odorata se encuentra plantada en tres de los cuatro predios comprendidos para este estudio: El Penjamo, El Carnizuelo y Arroyo Rico, en ellos se encontraron cinco, tres y dos categorías diamétricas de 5 cm, respectivamente; mientras que *Tabebuia donnell-smithii* solamente se encuentra establecida en el predio El Riego, con dos categorías diamétricas de 5 cm. Se seleccionaron ocho árboles por categoría diamétrica y en cada predio (Cuadro 11).

Cuadro 11. Número de árboles de *Cedrela odorata* y *Tabebuia donnell-smithii* por categoría diamétrica medidos en pie para obtener el sistema de cubicación.

Categoría diamétrica Especie	I (2.5–7.5 cm)	II (7.6–12.5 cm)	III (12.6–17.5 cm)	IV (17.6–22.5 cm)	V (22.6–27.5 cm)	Total
<i>Cedrela odorata</i>	24	24	16	8	8	80
<i>Tabebuia donnell-smithii</i>	8	8				16

Ante la falta de información referente a modelos de volumen de fuste para la zona, se midieron los diámetros normal con corteza, utilizando cinta diamétrica con un nivel de precisión de 3.14 mm (Forestry Suppliers, 1992), así como diámetros a diferentes alturas del fuste, iniciando en 0.30 cm y posteriormente cada metro. Los diámetros superiores fueron tomados de manera directa con ayuda de una escalera de madera de tres metros de alto, mientras que las alturas de fuste limpio y total del árbol se registraron con una baliza de madera graduada cada 50 cm.

La cubicación de árboles en pie es un procedimiento no destructivo; es decir, no es necesario derribar los árboles para cubicarlos ya que se recurre a la medición de alturas parciales y de diámetros en aquellos puntos seleccionados como divisiones entre troza y troza (Romahn *et al.*, 1994). Se escogió este método por tratarse de especies con alto valor comercial y representar una de las primeras plantaciones establecidas en la zona.

El volumen del fuste se estimó a partir de la cubicación de cada una de las trozas o segmentos en los que se dividió el árbol sumando al final todos los segmentos; para la cubicación de cada segmento (troza): y tanto para volúmenes total como volumen comercial, se utilizó la fórmula de Smalian (Romahn *et al.*, 1994).

3.3.2.3. Volumen total y comercial por árbol

Para obtener el volumen total con corteza, y tomando en cuenta la forma estructural de los datos representada en la Figura 13, se empleó el modelo no lineal de Schumacher y Hall (1933) ajustando el modelo de volumen total a través de las variables diámetro y altura, mediante análisis de regresión usando el paquete estadístico SAS (Statistical Analysis System, 2001). Este modelo es una formulación que permite expresar el volumen de varios sólidos de revolución como el cono, paraboloides, neiloides y cilindro (Fang y Bailey, 1999):

$$V_t = \alpha_0 \times D^{\alpha_1} \times H^{\alpha_2} \quad (8)$$

Donde: V_t es el volumen total de fuste en m^3 , D es el diámetro normal ó a la altura del pecho (DAP) en cm, H es la altura total en m, α_0, α_1 y α_2 son los parámetros a estimar.

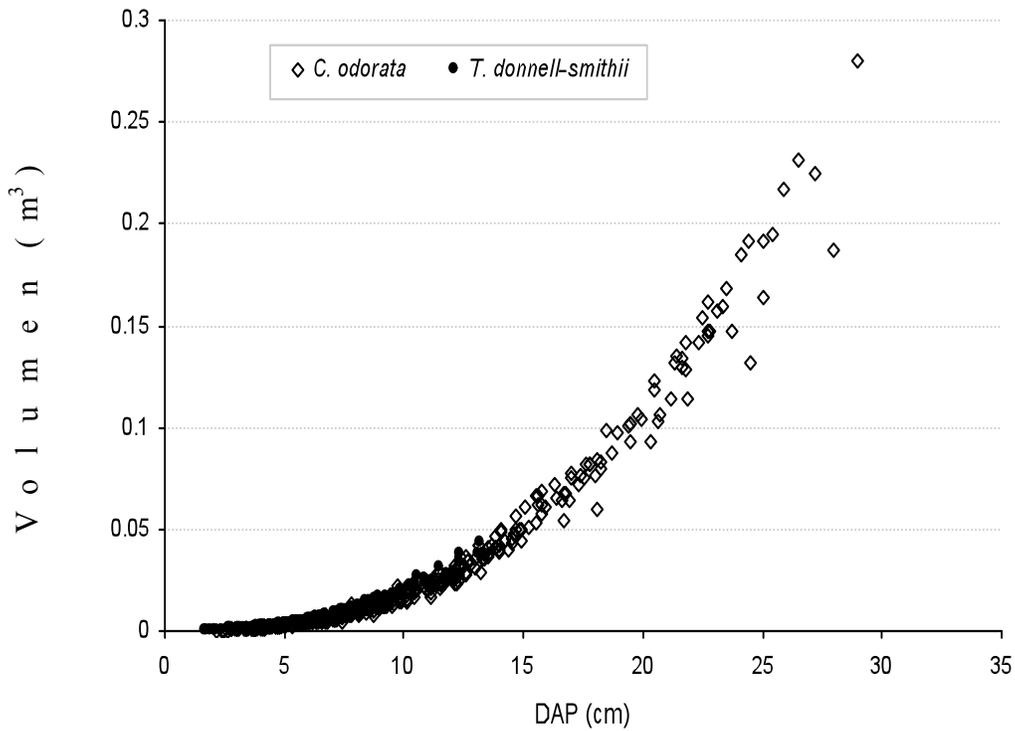


Figura 13. Relación del volumen total por árbol con la variable diámetro normal para las especies estudiadas.

Para obtener el volumen comercial se ajustaron tres modelos matemáticos: Clutter, 1980 (9); Fang y Bailey, 1999 (10) y Pienaar y Rheney, 1988 (11), los cuales involucran la estimación simultánea del volumen total y comercial. Estos modelos de volumen comercial ajustan simultáneamente con el modelo de volumen total de Schumacher y Hall que implica un modelo de ahusamiento.

$$V_c = V_t \times \left(1 - \beta_0 \times \frac{d^{\beta_1}}{D^{\beta_2}} \right) \quad (9)$$

$$V_c = V_t - \beta_0 \times d^2 \times (H - h) \quad (10)$$

$$V_c = V_t - \beta_0 \times \left(\frac{d^{\beta_1}}{D^{\beta_1-2}} \right) \times (H - 1.3) \quad (11)$$

Donde V_c es el volumen comercial en m^3 , d es el diámetro en cm de punta comercial a la altura h considerada como la altura comercial en m a partir del tocón; β_0 , β_1 y β_2 corresponden a los parámetros a estimar para la punta no comercial, las demás variables fueron definidas en el modelo (8).

La elección del modelo que presentó mejor ajuste fue basada en los criterios tomados de Rentería (1995): alto valor de R^2 o pseudo R^2 (cercano a 1), valor bajo del Cuadrado Medio del Error, parsimonia, y significancia estadística de los parámetros estimados.

3.3.2.4. Estimación de alturas

Para obtener la cubicación por sitio de muestreo es necesario medir el diámetro y altura total de todos los árboles presentes. Por razones de costo y tiempo, así como en ocasiones por condiciones del terreno: alta inclinación de la pendiente, cárcavas y vegetación competidora (p. ej. malezas) ésta medición frecuentemente no se realiza.

Ante tal situación, la altura total de una sub-muestra es utilizada en modelos de regresión para estimar las alturas del resto de la población en función del diámetro normal. La relación existente entre estas dos variables es muy estrecha generalmente las alturas aumentan con el

diámetro; sin embargo, llega un momento en que la altura se mantiene constante y el diámetro continua aumentando (García, 1995). En el presente estudio, durante la primera medición (marzo del 2005) fueron tomadas solamente las alturas de los árboles más altos (dominantes) estimando las alturas de aquellos árboles no medidos a través del siguiente modelo:

$$\hat{H} = \varphi_0 \times D^{\varphi_1} \quad (12)$$

Donde: φ_0 y φ_1 son los parámetros a estimar.

3.3.3. Sistema de rendimiento maderable

Los modelos de predicción explícita han sido ampliamente usados por su sencillez y precisión, requiriendo información básica como diámetro (DAP) y altura para su construcción. Tienen la desventaja de proporcionar información muy general de la plantación de interés; sin embargo, algunas modificaciones y ampliaciones de estos modelos pueden usarse para proporcionar información más detallada de la misma (Torres y Magaña, 2001). Por lo anterior, y considerando que en la región no se cuenta con información básica de estas especies, se utilizaron modelos de predicción explícita para construir un sistema de crecimiento y rendimiento maderable (SCRM), el cual permitirá generar datos a cerca de la dinámica del crecimiento en volumen de la plantación y como base para trabajos posteriores.

3.3.4. Crecimiento en altura dominante

A la altura dominante evaluada a una edad de referencia se le denomina Índice de Sitio (IS), y es una forma de identificar los sitios forestales. El índice de sitio es uno de los métodos más usados para determinar la calidad de estación en masas coetáneas preferentemente puras. La

calidad de estación refleja la productividad de un sitio forestal, la cual se puede clasificar cualitativamente en tipos de sitios, a través de su clima, suelo y vegetación, o cuantitativamente en clases de sitio, a través de su potencial para producir madera. Los índices de sitio se han convertido en el método directo más popular y práctico para la evaluación de la productividad forestal (Clutter *et al.*, 1983; Zepeda y Rivero, 1984).

Para la construcción de las curvas de índice de sitio se utilizaron datos de altura y edad de árboles dominantes y codominantes en 14 sitios permanentes de muestreo, ubicados de tal modo que cubrieran los intervalos de edad (3 – 10 años) y calidad de sitio. Primeramente se ajustó el modelo de la curva guía y posteriormente se seleccionaron dos modelos a través de la estrategia denominada Método de la Diferencia Algebraica, finalmente se ajustaron simultáneamente los modelos de predicción y proyección, generando una familia de curvas de IS de tipo anamórficas: la altura guarda la misma proporción a diferentes edades, haciendo que las curvas aparenten tener la misma forma (Clutter *et al.*, 1983).

Para la elaboración de estas curvas de índice de sitio, mediante el método de mínimos cuadrados, se ajustaron los modelos de Schumacher y Chapman–Richards, por sencillos y muy utilizados al modelar altura dominante y construir este tipo de curvas (Ramírez, 1981); además, mostraron buenos resultados de ajuste para modelar la altura dominante en *Swietenia macrophylla* mediante análisis de regresión (García *et al.*, 1998). La selección del modelo más adecuado para describir la relación altura dominante – edad se hizo mediante los criterios de pseudo R^2 , cuadrado medio del error (CME), valor de F, intervalos de confianza y error estándar de los estimadores.

Las expresiones matemáticas, para los modelos promedio (13) y diferencia algebraica (14) muestran una familia de curvas anamórficas tipo Schumacher usados para estimar el IS y la proyección de alturas en las plantaciones:

$$A_1 = \delta_0 \times \exp\left(-\frac{\delta_1}{E}\right) \quad (13)$$

$$A_2 = A_1 \times \frac{\exp\left(\frac{-\delta_1}{E_2}\right)}{\exp\left(\frac{-\delta_1}{E_1}\right)} \quad (14)$$

Las expresiones para los modelos promedio (15) y diferencia algebraica (16) muestran una familia de curvas anamórficas tipo Chapman-Richards empleados para estimar el IS y la proyección de alturas en las plantaciones:

$$A_1 = \delta_0 \times (1 - \exp(-\delta_1 \times E))^{\delta_2} \quad (15)$$

$$A_2 = A_1 \times \left(\frac{1 - \exp(-\delta_1 \times E_2)}{1 - \exp(-\delta_1 \times E_1)}\right)^{\delta_2} \quad (16)$$

Donde: A_1 es la altura dominante inicial en metros; A_2 es la altura dominante a proyectar en metros; E es la edad en años; E_1 es la edad inicial, E_2 es la edad de proyección; δ_0 , δ_1 y δ_2 son los parámetros a estimar.

En el presente estudio se seleccionaron curvas de tipo anamórficas por presentar los mejores ajustes estadísticos y las mejores representaciones gráficas del crecimiento de las especies en los índices de sitio definidos.

3.3.5. Crecimiento en área basal

El área basal es una medida directa de la densidad que involucra tanto el número de individuos como el tamaño de éstos y es, quizá la variable más utilizada para modelar el efecto de la densidad en el crecimiento del arbolado, tanto a nivel poblacional como individual.

Para obtener el área basal actual se utilizó el siguiente modelo no lineal (Torres y Magaña, 2001):

$$AB_1 = \exp\left(\frac{-\phi_1}{E_1}\right) \times A_1^{\phi_2} \quad (17)$$

La proyección del área basal se realizó con el siguiente modelo:

$$AB_2 = AB_1 \times \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^{\phi_2} \times \exp\left(\frac{-\phi_1}{E_2} + \frac{\phi_1}{E_1}\right) \quad (18)$$

Donde AB_1 y A_1 corresponden al área basal y altura dominante, respectivamente, a la edad inicial E_1 (edad de referencia); AB_2 y A_2 son área basal y altura dominante, respectivamente, a la edad E_2 (edad de proyección); ϕ_1 y ϕ_2 son los parámetros a estimar del modelo.

3.3.6. Modelo de volumen total

Para predecir y obtener el volumen total actual se empleó el siguiente modelo que utiliza el área basal y la edad:

$$V_1 = \gamma_0 \times AB_1^{\gamma_2} e^{\left(-\gamma_1/E_1\right)} \quad (19)$$

También fue posible proyectar el volumen a través del modelo siguiente:

$$V_2 = V_1 \times \left(\frac{AB_2}{AB_1} \right)^{\gamma_2} \times \exp\left(\frac{-\gamma_1}{E_2} + \frac{\gamma_1}{E_1} \right) \quad (20)$$

Donde V_1 y AB_1 son el volumen y área basal, respectivamente, a la edad inicial E_1 (edad de referencia); V_2 y AB_2 corresponden al volumen y área basal, respectivamente, a la edad E_2 (edad de proyección); γ_0, γ_1 y γ_2 son los parámetros a estimar.

3.3.7. Método de ajuste del SCRM

Antes de ajustar el sistema de crecimiento y rendimiento maderable, se partió del ajuste de modelos promedio para obtener buenos estimadores iniciales de los parámetros; posteriormente, se ajustaron los modelos promedio y de proyección como un sistema de ecuaciones bajo la técnica de regresión aparentemente no correlacionada (SUR por sus siglas en inglés) (Borders, 1989).

La técnica de estimación de parámetros SUR proporciona una mejor ganancia en la estimación de parámetros cuando los componentes del error se correlacionan para un sistema de ecuaciones (Rose y Lynch, 2001); además permite compatibilidad total entre el modelo de estimación promedio y el de proyección de forma que los parámetros estimados son los mismos mientras se cumple con el criterio minimización de cuadrados.

3.4. RESULTADOS

3.4.1. Modelos para volumen total y comercial

En el Cuadro 12 se observan las estadísticas de ajuste y parámetros estimados para el modelo de volumen total sugerido por Schumacher y Hall (1933), con datos de remediciones en sitios permanentes de muestreo; el modelo presentó un ajuste significativo ($p < 0.0001$) y valores altos de R^2 .

Cuadro 12. Resultados del ajuste para el modelo de volumen total por mínimos cuadrados.

Modelo	R^2	SCE	CME	Parámetros	Valores estimados de α_i	Error estándar	Prob>T
8	0.9946	0.00173	0.000022	α_0	0.000032	3.31E-06	<.0001
				α_1	1.942372	0.054	<.0001
				α_2	0.911162	0.058	<.0001

Al ajustar simultáneamente los modelos de volumen comercial con el modelo de volumen total se obtuvieron los valores de los estimadores que se muestran en el cuadro 13. El ajuste sugiere que el modelo de Fang y Bailey (1999) es el más adecuado para estimar el volumen comercial y total, con una mayor R^2 y menores valores en la suma de cuadrados del error (SCE), aunque el valor del cuadrado medio del error (CME) obtenido en este modelo es igual al del modelo de Clutter (1980); sin embargo, se toma el modelo de Fang y Bailey por ser más sencillo en su estructura y con sólo cuatro parámetros a estimar.

Durante el proceso de ajuste de los modelos para volumen total y comercial no se detectaron diferencias estadísticas significativas ($p > 0.05$) entre *C. odorata* y *T. donnell-smithii*, por lo que se tiene un solo modelo para ambas especies; esto puede ser atribuido a los pocos datos dasométricos de *T. donnell-smithii* ($n=8$) comparado con *C. odorata*, ($n=20$) como para detectar un efecto debido a la especie.

Cuadro 13. Resultados del ajuste para los modelos de volumen comercial por mínimos cuadrados.

Modelo	R ²	SCE	CME	Parámetros	Valores estimados	Error Estándar	Prob>T
9	0.9814	0.0244	0.000025	α_0	0.000039	2.49E-06	<.0001
				α_1	2.204731	0.0296	<.0001
				α_2	0.546288	0.0302	<.0001
				β_0	0.35699	0.0223	<.0001
				β_1	2.199037	0.0304	<.0001
				β_2	-1.94498	0.0331	<.0001
10	0.9817	0.0241	0.000025	α_0	0.000036	1.17E-06	<.0001
				α_1	1.947527	0.0164	<.0001
				α_2	0.825099	0.0174	<.0001
				β_0	0.000016	1.13E-07	<.0001
11	0.9809	0.0251	0.000026	α_0	0.000037	1.09E-06	<.0001
				α_1	1.975793	0.0148	<.0001
				α_2	0.832565	0.0157	<.0001
				β_0	0.000019	1.70E-07	<.0001
				β_1	2.185891	0.0303	<.0001

3.4.2. Crecimiento en altura dominante

El modelo Chapman-Richards presentó el mejor ajuste para predecir y explicar el crecimiento en altura de *C. odorata* y *T. donnell-smithii* (Cuadro 14), obteniendo el mayor valor de Pseudo- R^2 , así como los valores más pequeños en la suma de cuadrados del error (SCE) y en el cuadrado medio del error (CME).

Cuadro 14. Resumen del análisis de regresión efectuado con datos de altura–edad en *Cedrela odorata* y *Tabebuia donnell-smithii* para conocer el nivel de ajuste de los modelos empleados.

Modelo	R^2	SCE	CME	Parámetros	Valores estimados de δ_i	Error Estándar	Prob>T
(13)	0.8707	21.8289	1.7463	δ_0	21.4092	1.5001	<.0001
				δ_1	3.923788	0.3478	<.0001
(15)	0.919	17.2047	1.3764	δ_0	29.6996	2.3474	<.0001
				δ_1	0.08	-	-
				δ_2	1.241143	0.09	<.0001

Al parámetro δ_i en el modelo (15) de Chapman-Richards le fue asignado un valor constante probando entre valores positivos menores de 1, y se observó que el valor de 0.08 fue el que mejor contribución tuvo al ajuste del modelo. Con el ajuste del modelo de Chapman–Richards se generaron familias de curvas anamórficas de IS para 14, 18, 22 y 26 m a una edad base de 10 años (Figura 14).

El modelo de Chapman–Richards tiende a subestimar el crecimiento en sitios de menor calidad (IS = 14) para edades tempranas y lo sobreestima en sitios de mejor calidad tanto para edades tempranas como posteriores (IS = 26) (Figura 14). Sin embargo, estas curvas muestran que las especies estudiadas aun están en la fase acelerada de crecimiento en altura.

La predicción del crecimiento en altura dominante no presentó diferencias estadísticas significativas ($p > 0.05$) entre las especies estudiadas, por lo que las curvas de índice de sitio pueden ser utilizadas indistintamente para *C. odorata* y *T. donnell-smithii*. Sin embargo gráficamente ésta última especie muestra ligeramente un mejor índice de sitio a edades tempranas (IS = 26).

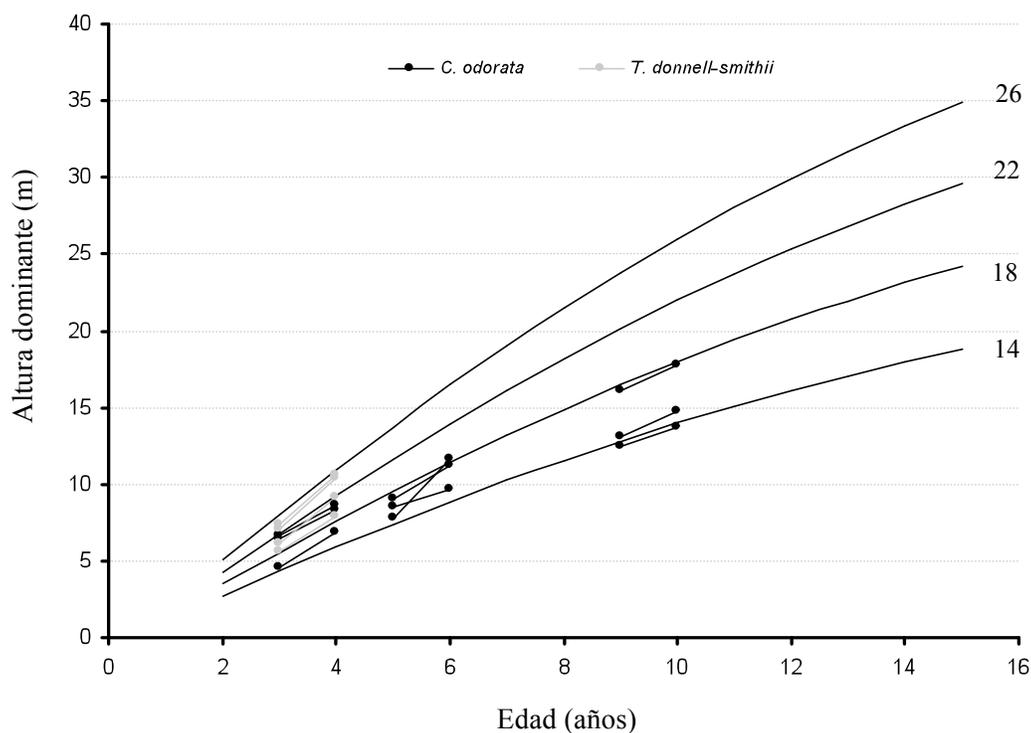


Figura 14. Curvas anamórficas de índice de sitio para *Cedrela odorata* y *Tabebuia donnell-smithii* (edad base = 10 años) en plantaciones de enriquecimiento de acahuales, San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca.

3.4.3. Ajuste del SCRM

Una vez definida la familia de curvas para altura dominante (A) se decidió realizar el ajuste simultáneo de ésta así como del área basal (AB) y volumen (V) bajo la técnica SUR (Cuadro 15), la cual mostró un mejor ajuste en comparación con los mínimos cuadrados ordinarios; los modelos de proyección presentaron una alta R^2 , así como valores bajos de la SCE y del CME respecto a los modelos de predicción (Cuadro 15).

Cuadro 15. Parámetros estimados y bondad de ajuste bajo regresión aparentemente no correlacionada (SUR) para los modelos de altura dominante (A), área basal (AB) y volumen total (V).

Modelo	Elemento	G.L. modelo	G.L. error	SCE	CME	R^2	R^2 -ajustada
15	A_1	1.5	12.5	17.0802	1.3664	0.8961	0.8920
16	A_2	0.5	13.5	12.3438	0.9144	0.9173	0.9204
17	AB_1	1	13	11.8424	0.911	0.8767	0.8767
18	AB_2	1	13	7.0121	0.5394	0.9484	0.9484
19	V_1	2	12	9.021	0.7517	0.9926	0.9919
20	V_2	1	13	7.0558	0.5428	0.9968	0.9968

Parámetro	Valor Estimado SUR	Error Estándar Aproximado SUR	Valor de t MCO ¹	Valor de t SUR	Valor de Rechazo SUR
δ_0	29.64687	2.1303	13.48	13.92	<.0001
δ_2	1.227985	0.0852	9.94	14.41	<.0001
σ_0	5.233294	0.5179	7.80	10.11	<.0001
σ_1	0.988604	0.0284	29.07	34.76	<.0001
γ_0	1.986471	0.2116	6.67	9.39	<.0001
γ_1	1.105139	0.3638	2.79	3.04	0.0103
γ_2	1.293258	0.0346	27.70	37.38	<.0001

¹Mínimos cuadrados ordinarios

El cuadro 16 presenta una tabla de producción para las especies estudiadas a densidades iniciales variables entre los sitios de muestreo; donde se representan, las alturas dominantes, así como el área basal y volumen por hectárea, además del incremento medio anual y corriente anual por hectárea por año a diferentes índices de sitio (Cuadro 16).

El crecimiento en volumen y área basal continúa de forma ascendente (Figura 15), situación similar muestran las curvas del incremento medio anual (IMA) e incremento corriente anual (ICA) en volumen. Es lógico pensar que debido a las edades jóvenes en las que se evaluaron las plantaciones, éstas todavía se encuentran en una etapa de crecimiento casi exponencial. Remedios de estas parcelas sin duda arrojarán información muy valiosa sobre la duración de este comportamiento.

Cuadro 16. Edad, altura dominante, área basal, volumen total, incremento medio anual (IMA) e incremento corriente anual (ICA) para cuatro índices de sitio (IS) en plantaciones de *Cedrela odorata* y *Tabebuia donnell-smithii* en San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca.

Edad (meses/años)	Altura dominante por IS																			
	(m edad base 10 años)				Área basal por IS (m ² ha ⁻¹)				Volumen por IS (m ³ ha ⁻¹)				IMA volumen por IS (m ³ ha ⁻¹ año ⁻¹)				ICA volumen por IS (m ³ ha ⁻¹ año ⁻¹)			
	14	18	22	26	14	18	22	26	14	18	22	26	14	18	22	26	14	18	22	26
24	2.7	3.5	4.3	5.1	0.3	0.4	0.4	0.5	0.2	0.3	0.4	0.5	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5
36	4.3	5.5	6.8	8.0	0.9	1.1	1.4	1.6	1.2	1.6	2.1	2.6	0.3	0.4	0.5	0.6	1.0	1.3	1.7	2.1
48	5.9	7.6	9.2	10.9	1.8	2.2	2.7	3.2	3.1	4.3	5.5	6.7	0.5	0.7	0.9	1.1	1.9	2.6	3.4	4.2
60	7.4	9.5	11.6	13.8	2.8	3.5	4.2	5.0	5.9	8.0	10.3	12.7	0.8	1.1	1.4	1.7	2.8	3.8	4.8	5.9
72	8.9	11.4	13.9	16.5	3.8	4.8	5.9	6.9	9.3	12.7	16.2	20.0	1.0	1.4	1.8	2.2	3.4	4.6	5.9	7.3
84	10.3	13.2	16.1	19.1	4.9	6.2	7.5	8.8	13.1	17.9	22.9	28.2	1.3	1.7	2.2	2.7	3.8	5.2	6.7	8.2
96	11.6	14.9	18.2	21.5	5.9	7.5	9.1	10.7	17.2	23.5	30.1	37.0	1.5	2.0	2.6	3.2	4.1	5.6	7.2	8.8
108	12.8	16.5	20.2	23.8	6.9	8.8	10.7	12.5	21.5	29.4	37.6	46.2	1.7	2.3	2.9	3.6	4.3	5.9	7.5	9.2
120	14.0	18.0	22.0	26.0	7.9	10.1	12.2	14.3	25.9	35.3	45.3	55.6	1.8	2.5	3.2	4.0	4.4	6.0	7.6	9.4
132	15.1	19.4	23.7	28.0	8.9	11.3	13.7	16.0	30.3	41.3	52.9	65.0	2.0	2.7	3.5	4.3	4.4	6.0	7.7	9.4
144	16.1	20.7	25.3	29.9	9.8	12.4	15.1	17.7	34.6	47.2	60.5	74.3	2.1	2.9	3.8	4.6	4.3	5.9	7.6	9.3
156	17.1	22.0	27	31.7	10.6	13.5	16.4	19.2	38.9	53.0	67.9	83.5	2.3	3.1	4.0	4.9	4.2	5.8	7.4	9.1
168	18.0	23.1	28	33.4	11.5	14.6	17.6	20.7	43.0	58.6	75.1	92.4	2.4	3.3	4.2	5.1	4.1	5.6	7.2	8.9
180	18.8	24.2	30	34.9	12.2	15.5	18.8	22.1	47.0	64.1	82.1	101.0	2.5	3.4	4.4	5.4	4.0	5.5	7.0	8.6

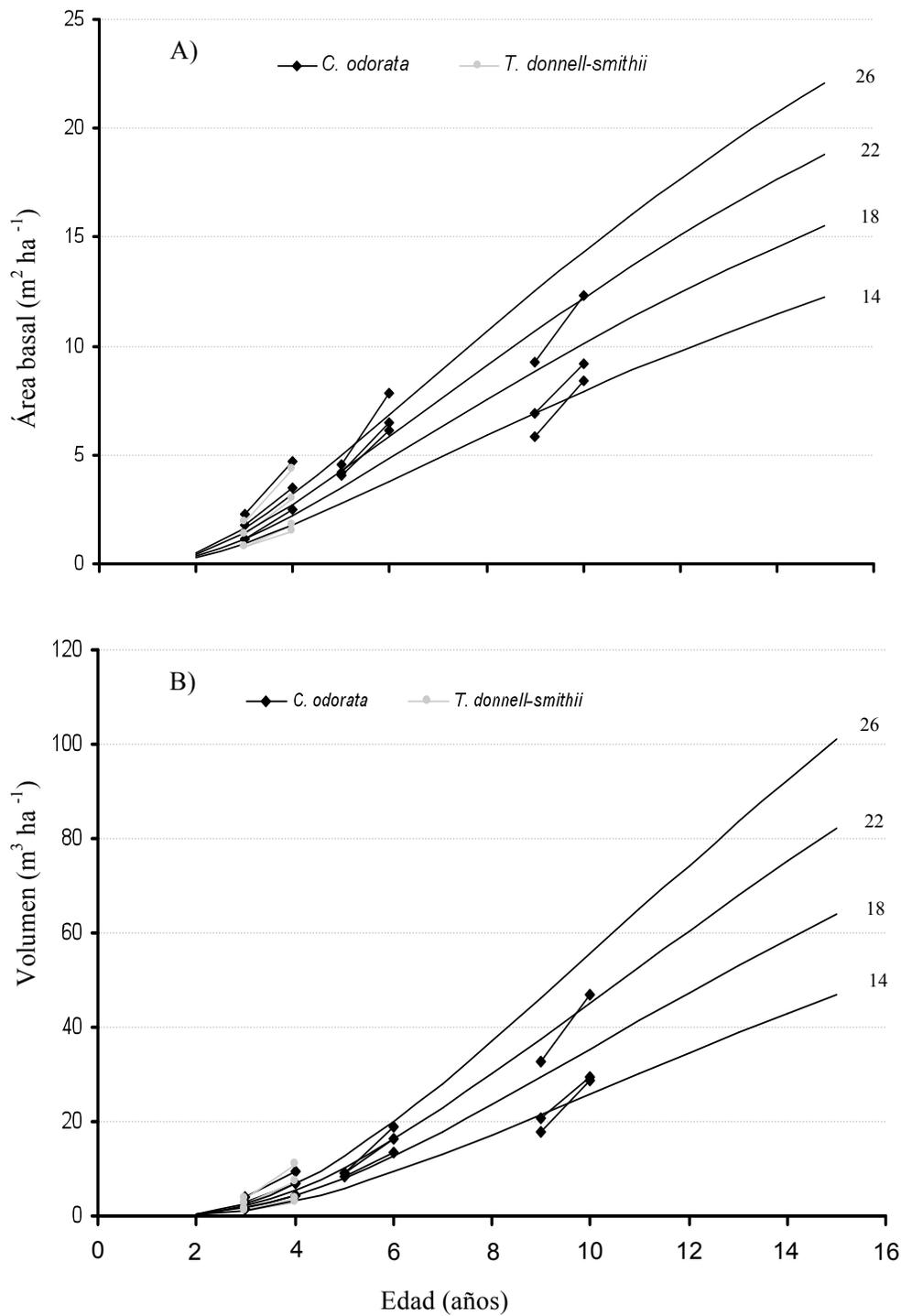


Figura 15. Datos de área basal (A) y volumen (B) por índice de sitio a una edad base de 10 años.

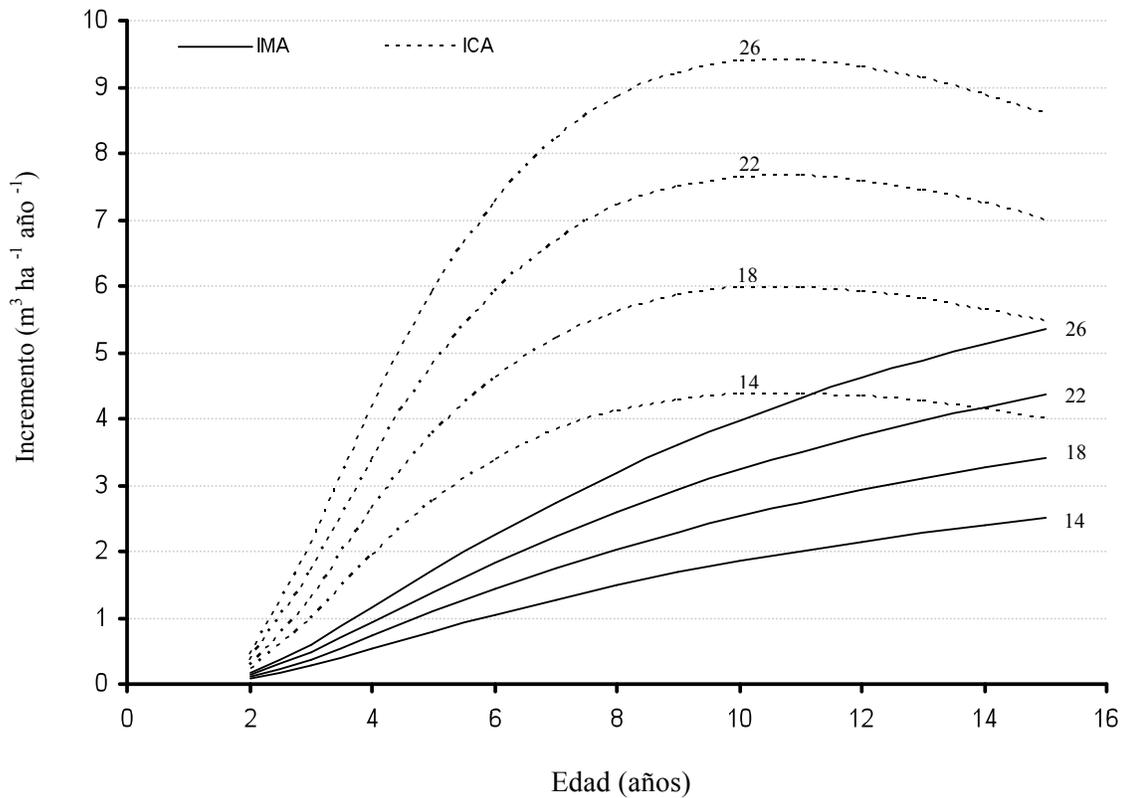


Figura 16. Curvas del incremento medio anual (IMA) e incremento corriente anual (ICA) por índice de sitio a una edad base de 10 años.

3.5. DISCUSIÓN

El modelo Schumacher y Hall (1933) empleado para definir el sistema de cubicación y obtener el volumen total por árbol en este estudio, fue utilizado por Reyes *et al.* (2006), para dos especies de Eucalipto plantados comercialmente en Tehuantepec, Oaxaca, México, también por Ferreira *et al.* (2004) al emplear varios modelos matemáticos para obtener el volumen de *Tabebuia cassinoides* en São Paulo, Brasil, y por Akindede y LeMay (2006) para un grupo de 77 especies de árboles tropicales en Nigeria, aunque en especies y sitios diferentes el modelo fue el que mejor se ajustó a los datos.

Los resultados obtenidos en este trabajo difieren a los reportados por Bravo *et al.*, (en revisión), quienes al desarrollar un sistema de crecimiento y rendimiento para caoba y cedro en plantaciones de Tuxtepec, Oaxaca, emplearon los modelos de volumen total y comercial de Clutter (1980) y Pienaar y Rheney (1988), así como el modelo de crecimiento en altura dominante de Schumacher. Mientras que en este trabajo estos modelos no presentaron los mejores indicadores de ajuste y estas diferencias posiblemente se deban al origen de los datos. Las plantaciones evaluadas en Tuxtepec aunque de similar edad no son de enriquecimiento de acahuales sino plantaciones bajo silvicultura intensiva y bajo la mezcla Cedro Rojo-Caoba.

La representación gráfica del modelo Chapman – Richards en su versión anamórfica, para los datos en este estudio difiere a lo reportado por García *et al.* (1998). Quienes desarrollaron ecuaciones de índice de sitio para *Swietenia macrophylla* King en plantaciones en Quintana Roo, México, reportando que el modelo Chapman Richards sobrestima el crecimiento para edades tempranas y lo subestima al final, esto es posible considerando las especies, sus hábitos de crecimiento y las edades de las plantaciones, además esto es lo esperado dado que los árboles aun están en la fase acelerada de crecimiento. Sin embargo, en las mejores calidades de sitio se tiende a sobrestimar la altura; pero no es tan conservadora como el modelo de Schumacher, el cual tiende a subestimar la altura dominante en los mejores índices de sitio.

Para poder validar los estudios a largo plazo es conveniente dar seguimiento a los sitios de medición establecidos por lo que los resultados presentados no deben de extrapolarse mas allá de los 13 años. Mediciones futuras permitirán establecer además patrones de mortalidad natural para el manejo adecuado de la densidad.

El SCRM que se presenta es además auxiliar para los datos de inventarios provenientes de las plantaciones ya que permite no solo calcular el volumen por ha de manera exacta sino proyectarlo con una confiabilidad aceptable

3.6. CONCLUSIONES

Las mejores calidades de sitio se presentaron en terrenos plantados con *Tabebuia donnell-smithii* comparados con aquellos donde se encuentra *Cedrela odorata*, aunque estadísticamente no se obtuvieron diferencias significativas.

El sistema de crecimiento y rendimiento maderable desarrollado puede ser usado indistintamente para las dos especies plantadas (*C. odorata*, *T. donnell-smithii*), las cuales se encuentran en la fase de crecimiento exponencial tanto en área basal como en volumen; esto debe ser considerado en la futura planeación y toma de decisiones de manejo.

4. LITERATURA CITADA

- Adjers, G. Hadenggan S, Kuusipalo J. Nuryanto K, Vesa L. 1995. Enrichment planting of dipterocarps in logged-over secondary forest: effects of width, direction and maintenance method of planting line on selected *Shorea* species. *Forest Ecology Management*. 73: 259–270.
- Akindele, S. O., V. M. LeMay. 2006. Development of tree volume equations for common timber species in the tropical rain forest area of Nigeria. *Forest Ecology and Management*. 226: 41–48.
- Appanah, S., B. Krishnapillay, M. Dahlan. 2000. Sustainable production of forest products in the humid tropics of Southeast Asia: latest developments. XXI. IUFRO. World Congress. Kuala Lumpur, Malasia. 1: 201–210.
- Ashton, P. S. 1981. The need for information regarding tree age and growth in tropical forests. In: Bormann F. H. Berlyn G. (eds) *Age and growth rate of tropical trees; new directions for research*. Yale University: School of Forestry and environmental Studies. Bulletin No. 94. pp 3–6.
- Alvim, P. T. and R. Alvim. 1978. Relation of climate to growth periodicity in tropical trees. *In: Tropical tree as living systems*. P. B. Tomlinson and H. M. Zimmermann (eds.). Cambridge University Press, London. pp: 445-464.
- Baker P. J., Bunyavejchewin S. Oliver C. D., Ashton P. S. 2005. Disturbance history and historical stand dynamics of a seasonal tropical forest in western Thailand. *Ecological Monographs* 75 (3): 317–343.
- Barajas-Morales, J. y C. León G. 1989. Anatomía de maderas de México: especies de una selva caducifolia. *Publicaciones especiales No. 1*. Instituto de Biología, UNAM. México, D. F. 64 p.
- Bass, P. and Vetter, R. E. 1989. Proceedings of the joint session of IUFRO P505 tree-ring analysis and IAWA on age and growth-rate determination in tropical trees, held on 18 may, 1988 in Sao Paulo, Brazil – Growth rings in tropical trees. *IAWA Bulletin (Special Issue)* 10:95–174.
- Batista, F. J. L., M. Marquesina, e V. M. Viana. 2004. Equações de volume para árvores de caxeta (*Tabebuia cassinoides*) no Estado de Sao Paulo e sul do Estado do Rio de Janeiro. *Scientia Forestales*. 65: 162–175.
- Bellingham, P. J. and E. V. J. Tanner. 2000. The influence of topography on tree growth, mortality, and recruitment in a tropical montane forest. *Biotropica*. 32 (3): 378–384.

- Borchert, R. 1999. Climatic periodicity, phenology and cambium activity in tropical dry forest trees. *IAWA, Journal*. 20: 239–247.
- Borchert, R. and G. Rivera. 2001. Photoperiodic control of seasonal development and dormancy in tropical stem succulent trees. *Tree Physiology*. 21: 201-212.
- Borders, B. E. 1989. Systems of equations in forest modelling. *Forest Science*. 35: 548–556.
- Bormann, F. H. and G. Berlyn. 1981. Age and growth rate of tropical trees: new directions for research. Yale University: School of forestry and Environmental Studies. Bulletin. No. 24 New Haven.
- Bravo, M. A., H. M. P. de los Santos, M. G. Guillen, P. de la R. Hernández, J. R. L. Valdez. Sistema de crecimiento y rendimiento para plantaciones de caoba y cedro rojo en Tuxtepec, Oaxaca. *Revista Fitotecnia Mexicana (en revisión)*.
- Brienen, R. J. W. and P. A. Zuidema. 2006. The use of tree rings in tropical forest management: Projecting timber yield of four Bolivian tree species. *Forest Ecology and Management*. 226: 256–267.
- Brienen, R. J. W. and P. A. Zuidema. 2005. Relating tree growth to rainfall in Bolivian rain forest: a test for six species using tree ring analysis. *Oecologia*. 146: 1–12.
- Buckley B. M., Barbetti, M., Watanasak M., D'Arrigo R., Boonchirdchoo S., Sarutanon, S. 1995. Dendrochronological investigations in Thailand. *IAWA Journal*. 16: 393–409.
- Callado, H. C., S. J. Silva Neto, F. R. Scarano & C. G. Costa. 2004. Radial growth of *Tabebuia umbellata* (Bignoniaceae), a flood-tolerant tree from the Atlantic forest swamps in Brazil. *IAWA Journal*. 25 (2): 175–183.
- Cao, K. F. and Ohkubo, T. 1999. Suppression and release during canopy recruitment in *Fagus crenata* and *Acer mono* in two old-growth beech forests in Japan. *Plant Ecology*. 145: 281–290.
- Canham, C. D. 1985. Suppression and release during canopy recruitment in *Acer saccharum*. *Bull. Terrey Bot. Club*. 112:145.
- Canham, C. D. 1989. Different responses to gaps among shade-tolerant tree species. *Ecology* 70: 548-550.
- Cattelino, P. J., C. A. Becher, and L. G. Fuller. 1986. Construction and installation of homemade dendrometer bands. *Northern Journal Applied Forestry* 3: 73–75.
- Challenger, A. 1998. Utilización y Conservación de los ecosistemas terrestres de México: pasado, presente y futuro. CONABIO. México, D. F. 847 p.

- Chambers, J. Q., N. Higuchi, J. P. Schimel. 1998. Ancient trees in Amazonia. *Nature*. 39: 135–136.
- Chazdon, R. L., R. W. Pearcy, D. W. Lee, N. Fetcher. 1996. Photosynthetic responses of tropical forest plants to contrasting light environment. In: Mulkey S. S. Chazdon R. L., Smith, A.P. (Eds) *Tropical plant forest ecophysiology*. Chapman y Hall. New York. Pp. 5-55.
- Clark, D. A. and D. B. Clark. 1994. Climate induced annual variation in canopy tree growth in a Costa Rican tropical rain forest. *Journal of Ecology*. 82: 865-872.
- Clark, D. A. and D. B. Clark. 1999. Assessing the growth of tropical rain forest trees: Issues for forest modeling and management. *Ecological Applications* 9: 981 – 997.
- Clark, D. A. and D. B. Clark. 2001. Getting to the canopy: Tree height growth in neotropical rain forest. *Ecology* 82: 1460-1472.
- Clutter, J. L., J. C. Forston, L. V. Pineanar, G. H. Brister and R. L. Bailey. 1983. *Timber Management: a quantitative approach*. John Wiley and Sons. New York. 333 p.
- Clutter, J. L. 1980. Development of taper function from variable-top merchantable volume equations. *Forest Science*. 26. p. 117 – 120.
- Condit, R. 1995. Research in large, long-term tropical forest plot. *Tree*. 10: 18–22.
- Corredor, J. R. 2001. *Silvicultura tropical*. Consejo de publicaciones, Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico y Tecnológico. Universidad de los Andes. Mérida. Venezuela. 373 pp.
- Coster, C. 1927. Zur Anatomie und Physiologie der Zuwachszonen und Jahresringbildung in den Tropen. *Ann. Jard. Bot. Buitenzorg* 37: 49-160.
- Da Silva, R. P., J. Dos Santos, E. Siza, T., J. Q. Chambers, S. Nakamura, N. Higuchi. 2002. Diameter increment and growth patterns for individual tree growing in Central Amazon, Brazil. *Forest Ecology and Management*. 166: 295-301.
- Daubenmire, R. F. 1945. An improved type of precision dendrometer. *Ecology*. 26: 97–98.
- Daubenmire, R. F. 1972. Phenology and other characteristics of tropical semideciduous forest in north-western Costa Rica. *Journal of Ecology* 60: 147-171.
- De la Fuente, E. A 1998. Predicción del crecimiento y rendimiento de *Pinus rudis* ENDL en pueblos mancomunados, Ixtlan, Oaxaca. Tesis de Doctoral. Colegio de Postgraduados. Montecillo. Texcoco, México. 179 p.

- Del Valle, A. J. I. 1997. Crecimiento de cuatro especies de árboles de los humedales forestales del litoral pacífico Colombiano. *In* Simposio Internacional. Posibilidades de Manejo Forestal Sostenible en América Tropical. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia. P. 1–9.
- Devall, M. S., Parresol, B. R., Wright, S. J. 1995. Dendroecological analysis of *Cordia alliodora*, *Pseudobombax septenatum* and *Annona spraguei* in central Panama. *IAWA J.* 16 (4): 411–424.
- Dezzeo, N., M. Worbes, I. Ishii, R. Herrera. 2003. Annual tree rings revealed by radiocarbon dating in seasonally flooded forest of the Mapire River, a tributary of the lower Orinoco River, Venezuela. *Plant Ecology.* 168: 165–175.
- Dünisch, O., J. Bauch, L. Gasparotto. 2002. Formation de increment zones and intraannual growth dynamics in the xylem of *Swietenia macrophylla*, *Carapa Guianensis*, and *Cedrela odorata* (Meliaceae). *IAWA Journal*, 23: 101–119.
- Enquist B. J. and Leffler A. J. 2001. Long-term tree ring chronologies from sympatric tropical dry-forest trees: individualistic responses to climatic variation. *Journal of Tropical Ecology.* 17: 41–60.
- Fang, Z. and R. L. Bailey. 1999. Compatible volume and taper models with coefficients for tropical species on Hainan Island in Southern China. *Forest Science.* 45 (1). P. 85 – 100.
- Ferreira, B. J. L., M. Marquesini, V. M Viana. 2004. Equacoes de volume para árvores de caxeta (*Tabebuia cassinoides*) no Estado de Sao Paulo e sul do Estado do Janeiro. *Scientia Forestalis.* 65: 162-175.
- Forestry Suppliers Inc. 1992. Forestry, firefighting and tree planting. Catalogue No. 4. Jackson, MS. 508 p.
- Fichtler E. Clark, D. A., Worbes M. 2003. Age and long-term growth of trees in an old-growth tropical rain forest, based on analyses of rings and C-14. *Biotropica.* 35: 306–317.
- Fritts, H. C. and E. C. Fritts. 1955. A New dendrograph for recording radial changes of a tree. *Forest Science*, v. 1, p. 271 – 276.
- Fritts, H. C. 1976. Tree rings and climate. Academic Press, London.
- García, C. X., H. M. Ramírez, F. C. Rodríguez, M. J. Jasso, S. C. A. Ortiz. 1998. Índice de sitio para caoba (*Swietenia macrophylla* King) en Quintana Roo, México. *Ciencia Forestal.* 23 (84): 9–18.
- García M. E. 1987. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen; 4ª. ed. México, D.F. 217 p.
- García, O. 1995. Apuntes de mensura forestal. I. Estática. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. Chile. 65 p.

- Giménez, A. M. y A. N. Ríos. 1999. Crecimiento de *Schinopsis quebracho-colorado* (Schlecht.) Barkl. et Meyer, Anacardiaceae. *Madera y Bosques*. 5 (2): 35–51.
- Gómez, A. D. 1998. Dinámica de incorporación de seis especies tropicales como respuesta a diferentes tratamientos silvícolas. Tesis de Maestría. Especialidad Forestal. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, México. 120 p.
- Gómez–Pompa, A. 1985. El futuro de la ecología tropical. In: Investigaciones sobre la Regeneración de Selvas altas en Veracruz, México. Vol. II. A. Gómez – Pompa y S. del Amo R. (eds). INIREB. Xalapa, Veracruz, México. pp: 395–400.
- Gómez, T. J., H. M. P. de los Santos, M. A. G. Fierros. Modelos de crecimiento en altura dominante para *Eucalyptus grandis* y *E. urophylla* en María Lombardo, Oaxaca, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* (en revision)
- Hall, R. C. 1944. A vernier tree-growth band. *Journal of forestry*. 42: 742–743.
- Hummel, S. 2000. Height, Diameter and crown dimensions of *Cordia alliodora* associated with tree density. *Forest Ecology Management*. 127: 31–40.
- INEGI. 1995. San Pedro Pochutla, estado de Oaxaca. Cuaderno estadístico municipal. INEGI. Aguascalientes, Ags. 17 p.
- Jacoby, G. C. 1989. Overview of tree-ring analysis in tropical regions. *IAWA Bulletin* 10: 99–108.
- Jacoby, G. C. and D'Arrigo, R. D. 1990. Teak (*Tectona grandis* L. F.), a new species of largescale dendroclimatic potencial. *Dendrochronologia*. 8: 98.
- Keeland, B. D. and R. R. Sharitz. 1993. Accuracy of tree growth measurements using dendrometer bands. *Canadian Journal Forest Research*. 23: 2454–2457.
- Korning, J., H. Balsev. 1994. Growth rates and mortality patterns of tropical lowland tree species and the relation to forest structure in Amazonian Ecuador. *Journal of Tropical Ecology* 10:151-166.
- Lang, G. E. and D. H. Knight. 1983. Tree growth, mortality, recruitment, and canopy gap formation during a 10 year period in a tropical moist forest. *Ecology*, 64, 1075–1080.
- Laurance, W. F. M., E. H. Nascimento, G. S. Laurance, R. Condit, S. D' Angelo, A. Andrade. 2004. Inferred longevity of Amazonian rainforest trees based on a long-term demographic study. *Forest Ecology and Management*. 190: 131–143.
- Lieberman, D., M. Lieberman, D. Hartshorn and R Peralta 1985. Growth rates and age size relationship of tropical wet forest trees in Costa Rica. *Journal of Tropical Ecology* 1: 97 – 109.

- Liming, F. G. 1957. Homemade dendrometers. *Journal of Forestry*. 55: 575–577.
- López, A. J. L. 2004. Crecimiento radial de tres especies arbóreas en una selva mediana subcaducifolia del estado de Colima. Tesis de Maestría. Especialidad Forestal. Colegio de Postgraduados. Montecillo. Texcoco, México. 79 p.
- López, A. J. L., J. I. Valdez-Hernández, T. Terrazas y J. R. Valdez-Lazalde. 2006a. Crecimiento en diámetro de especies arbóreas en una selva mediana subcaducifolia en Colima, México. *Agrociencia* 40: 139–147.
- López, A. J. L., J. I. Valdez-Hernández, T. Terrazas y J. R. Valdez-Lazalde. 2006b. Anillos de crecimiento y su periodicidad en tres especies tropicales del estado de Colima, México. *Agrociencia*. 40: 533–544.
- Lozada, J. R., J. Moreno, R. Suescun. 2003. Plantaciones en fajas de enriquecimiento. Experiencias en 4 unidades de manejo forestal de la Guayana Venezolana. *Interciencia*. 28 (10): 568–575.
- Lusk, C. H. and Smith, B. 1998. Life history differences and tree species coexistence in an old-growth New Zealand rain forest. *Ecology*. 79: 795-806.
- MacDougal. D. T. 1921, Growth in trees. Carnegie Institute of Washington. Publication No. 307.
- MacDougal. D. T. 1924. Dendrographic measurements, *In*: MacDougal, D. T. and Shreve, F. eds. Growth in trees and massive organs of plants: Washington, D. C. Carnegie Institute. p. 1-88.
- Makocki, M. W. 2000. Crecimiento radial de tres especies maderables en una selva mediana subcaducifolia del estado de Nayarit. Tesis de Maestría. Especialidad Forestal. Colegio de Postgraduados. Montecillo. Texcoco, México. 106 p.
- Makocki, M. W., and J. I. Valdez-Hernández. 2001. Radial growth periodicity of tree species in a semi-deciduous tropical forest of the Pacific coast of México: Implications for their management. *In*: Proceedings of the IUFRO Joint Symposium on Tree Seed Technology, Physiology and Tropical Silviculture. College of Forestry and Natural Resources, University of the Philippines, Los Baños. pp: 85 – 96.
- Mariaux, A. 1967. Les cerne dans les bois tropicaux Africains, nature et périodicité. *Bois et Forests des Tropiques* 14: 23–37.
- Martínez-Ramos, M., E. R. Álvarez-Buylla. 1998. How old are tropical rain forest trees? *Trends in Plant Science*. 3: 400–405.
- MathSoft, Inc.,. 1999. S-PLUS 2000. Data Analysis Products Division, Seattle, Washington.

- Mendoza, B. M. 1993. Conceptos básicos de Manejo Forestal. Editorial UTEHA. México, D. F. 161 p.
- Miranda, F. y E. Hernández X. 1963. Los tipos de Vegetación de México y su clasificación. Boletín de la Sociedad Botánica de México 28: 29–179.
- Montagnini, F., B. Eibl, L. Grance, D. Maiocco, D. Nozzi. 1997. Enrichment planting in overexploited subtropical forests of the paranaense region of Misiones, Argentina. Forest Ecology Management. 99: 237 – 246.
- Orwig, D. A. and Abrams, M. D. 1994. Contrasting radial growth and canopy recruitment patterns in *Liriodendron tulpifera* and *Nyssa sylvatica*: gap-obligate versus gap-facultative tree species. Canadian Journal of Forest Research. 24: 2141-2149.
- Pennington, T. D., B. T. Styles, D. A. H. Taylor. 1981. Meliaceae (Flora neotropica, Monograph 28). The New York Botanical Garden, Bronx, New York, USA. 470 pp.
- Pennington, T. D., y J. Sarukhán K. 1998. Árboles Tropicales de México: Manual para la identificación de las principales especies. Texto Científico Universitario. Fondo de la Cultura Económica. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F. 521 p.
- Pienaar, L. V., J. W. Rheney. 1988. Yield prediction for mechanically site-prepared flash pine plantations in the southeastern coastal plain. School of Forest Resources, University of Georgia, Athens. pp: 163–173.
- Pilar – Ibarra, R. 2000. Estudio del crecimiento diametral del tallo de *Guarea grandifolia* en la selva de los Tuxtlas, Veracruz. Tesis de licenciatura en biología, Escuela Nacional de Estudios Profesionales Iztacala, Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F., México. 104 p.
- Pumijumnong, N., Eckstein D., Sass U. 1995. Tree-ring research on *Tectona grandis* on northern Thailand. IAWA Journal. 16: 385–392.
- Ramos, J. M. del Amo, S., 1992. Enrichment planting in a tropical secondary forest in Veracruz, México. Forest Ecology and Management. 54: 289-304.
- Ramírez, A. H. 1981. Comparación de cuatro modelos matemáticos aplicados al crecimiento forestal. Ciencia Forestal en México. 16 (70): 87– 08.
- Reineke, L. H. 1932. A precision dendrometer. Journal of forestry. 30: 692–697.
- Reineke, L. H. 1948. Dial gauge dendrometer. Ecology. 29: 208.
- Rentería, A. J. B. 1995. Sistema de cubicación para *Pinus cooperi* Blanco mediante ecuaciones de ahusamiento en Durango. Tesis de Maestría. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Edo. de Méx. 66 P.

- Reyes, V. J. R.; H. M. De los Santos P, M. A. G. Fierros. 2006. Sistema de cubicación para *Eucalyptus grandis* y *E. urophylla* en Maria Lombardo, Oaxaca. Ciencia Forestal en México (enviado para su publicación).
- Ricker, M., C. Siebe, S. B. Sánchez, K. Shimada, B. C. Larson, M. Martínez-Ramos, F. Montagnini. 2000. Optimizing seedling management: *Pouteria sapota*, *Diospyros digyna*, and *Cedrela odorata* in Mexican rainforest. Forest Ecology Management. 139: 63-77.
- Ricker, M. and R. del Río. 2004. Projecting diameter growth in tropical trees: A new modeling approach. Forest Science. 50 (2): 213 – 224.
- Roig, F. A., J. A. Boninsegna, and R. L. Holmes. 1992. Growth rates in diameter, basal area, and height of *Pilgerodendron uviferum*; relationship between growth index and germination. Trees 6: 199–203.
- Romahn, de la V. C. F., H. Ramírez, M. y J. L Treviño, G. 1994. Dendrometría. Universidad Autónoma Chapingo. México. 345 p.
- Rose, Jr. C. E. and T. B. Lynch. 2001. Estimating parameters for tree basal area growth with a system of equation and seemingly unrelated regressions. Forest Ecology and Management. 148: 51–61.
- SAS Institute Inc. 1999-2000. The SAS System for Windows Version 8.
- SEMARNAP – UACH. 1999. Atlas forestal de México. Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. Universidad Autónoma Chapingo. México, D. F. 104 p.
- Schongart, J., F. T. M. Piedade, S. Ludwigshausen, M. Worbes. 2002. Phenology and stem growth periodicity of tree species in Amazonian floodplains forests. Journal of Tropical Ecology. 18: 1–17.
- Schumacher, F. X., and F.S. Hall. 1933. Logarithmic expression of timber tree volume. J. Agric. Res. 47: 719-734.
- Schweingruber, F. 1989. Tree ring. Basics and applications in Dendrochronology. Klumer Academic Publishers. 280 p.
- Snook, L. K. 2000. Regeneración y crecimiento de la caoba (*Swietenia macrophylla* King) en selvas de Quintana Roo. Ciencia Forestal 25: 59–76.
- Stahle, D. W. P. T. Mushove, M. K. Cleaveland, F. Roig, G. A. Haynes. 1999. Management implications of annual growth ring in *Pterocarpus angolensis* from Zimbabwe. Forest Ecology and Management. 124: 217–229.
- Torres, J. J. M., O. S. Magaña. 2001. Evaluación de plantaciones forestales. Limusa. México, D. F. 472 p.

- Tschinkel H. M. 1966. Annual growth ring in *Cordia alliodora*. Turrialba. 16:73-80.
- Vanclay J. K. 1994. Modelling forest growth and yield: applications to mixed tropical forests. CAB International, Wallingford, Uk.
- Vanclay, J. K. 1995. Growth models for tropical forest: a synthesis of models and methods. Forest Science 41: 7–42.
- Vetter, R. and P. C. Botosso. 1989. Remarks on age and growth rate determination of Amazonian trees. IAWA Bulletin 10: 133–145.
- Whitmore, T. C. 1998. An introduction to tropical rain forests. Oxford University Press, New York.
- Williams, L. G. 1996. Crecimiento diamétrico de árboles caducifolios y perennifolios del bosque mesófilo de Montaña en los alrededores de Xalapa. Madera y Bosques. 2(2), 53 - 65.
- Woodcock, D. W. 1994. Occurrence of woods with a gradation in vessel diameter across a ring. IAWA J. 15: 377–385.
- Worbes, M. 1989. Growth rings, increment and age of tree in inundation forests, savannas and mountain forest in the Neotropics. IAWA Bulletin 10: 109 – 122.
- Worbes, M. 1992. Occurrence of seasonal climate and tree-ring research in tropics. Lundqua Report 34: 338-342.
- Worbes, M. 1995. How to measure growth dynamics in tropical trees – A review. IAWA. Journal 16: 337–351.
- Worbes, M. 1999. Annual growth rings, rainfall-dependent growth and long-term growth patterns of tropical trees from the Caparo Forest Reserve in Venezuela. Journal of Ecology 87 (3): 391-403.
- Worbes, M. 2002. One hundred years of tree ring research in the tropics a brief history and an outlook to future challenges. Dendrochronologia. 20: 217–231.
- Worbes, M. R. Staschel, A. Roloff, J. W. Junk. 2003. Tree ring analysis reveals age structure, dynamics and wood production of a natural forest stand in Cameroon. Forest Ecology and Management 173: 105–123.
- Wright, E. F. Canham, C. D., Coates, K. D. 2000. Effects of suppression and release on sapling growth for 11 tree species of northern, interior British Columbia. Canadian Journal of forest Research. 30: 1571 – 1580.
- Zepeda, B. E. M. y D. P. Rivero, B. 1984. Construcción de curvas Anamórficas de índice de sitio: ejemplificación del método de la curva guía. Ciencia Forestal 51 (9): 3-36.