



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN CIENCIAS FORESTALES

**ESTIMACIÓN Y MAPEO DEL ÍNDICE DE ÁREA
FOLIAR Y BIOMASA AÉREA EN PLANTACIONES DE
Eucalyptus urophylla S.T. BLAKE MEDIANTE
PERCEPCIÓN REMOTA**

ADRIÁN HERNÁNDEZ RAMOS

T E S I S

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

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2016

La presente tesis titulada: **Estimación y mapeo del índice de área foliar y biomasa aérea en plantaciones de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake mediante percepción remota** realizada por el alumno: **Adrián Hernández Ramos** 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

POSTGRADO EN CIENCIAS FORESTALES

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO

Dr. José René Valdez Lazalde

ASESOR

Dr. Gregorio Ángeles Pérez

ASESOR

Dra. Alicia Peduzzi

Montecillo, Texcoco, Estado de México, junio de 2016

Esta investigación fue financiada parcialmente por la Oficina de Programas Internacionales del Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de EE. UU. a través del Northern Research Station y el Programa de Paisajes Sustentables de la Agencia para el Desarrollo Internacional de EE. UU., y por la empresa PROTEAK, dueña de las plantaciones donde se desarrolló la investigación.

**ESTIMACIÓN Y MAPEO DEL ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR Y BIOMASA AÉREA
EN PLANTACIONES DE *Eucalyptus urophylla* S.T. BLAKE MEDIANTE
PERCEPCIÓN REMOTA**

Adrián Hernández Ramos, M. C.

Colegio de Postgraduados: Postgrado en Ciencias Forestales, 2016

RESUMEN

El manejo adecuado de las plantaciones forestales comerciales requiere del conocimiento continuo de la dinámica de crecimiento de las variables forestales, entre ellas está el índice de área foliar (IAF) y la biomasa total (Bt). La estimación directa es costosa y tardada, por ello es necesario encontrar una alternativa indirecta eficiente para estimarlas. El objetivo fue estimar y mapear el índice de área foliar y biomasa aérea mediante datos derivados de sensores remotos en plantaciones forestales comerciales de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake en el municipio de Huimanguillo, Tabasco, México. Los datos provienen de un muestreo al azar conformado de 28 sitios (de 500 m²) distribuidos en edades de 1 a 7 años. Se establecieron 112 trampas de captura de hojarasca y se tomaron 140 fotografías hemisféricas mensualmente durante un año. Para el mapeo se utilizaron imágenes satelitales SPOT 7 y LANDSAT 8, relacionando los datos espectrales y la información de campo. La productividad primaria neta aérea fue mayor en las plantaciones jóvenes (37.33 Mg ha⁻¹ año⁻¹), con tendencia decreciente conforme aumenta la edad. El método de hojarasca caída fue semejante al IAF alométrico y fue calibrado con mediciones ópticas. El modelo seleccionado fue el de Potencia con $R^2_{aju} = 0.942$, RECM = 4.2394 y parámetros significativos. El promedio de IAF fue 2.31 m² m⁻² y 93.47 Mg ha⁻¹ para Bt, utilizando un muestreo estratificado el cual resultó ser el más preciso. Las variables presentaron correlaciones altas con las bandas roja, verde y los índices de vegetación del sensor SPOT 7, mientras que para LANDSAT 8 no resultaron significativas. Los estimadores de razón presentaron valores cercanos al inventario tradicional, pero al mapear las variables de IAF y Bt presentó errores altos, por ello, se eligió el modelo derivado de la regresión lineal múltiple para su predicción y mapeo. El uso de información espectral para estimar variables forestales es un método alternativo y útil a gran escala.

Palabras clave: hojarasca caída, relaciones ópticas, inventario tradicional, satélites SPOT 7 y LANDSAT 8.

ESTIMATE AND MAPPING OF LEAF AREA INDEX AND ABOVEGROUND BIOMASS FOR *Eucalyptus urophylla* S.T. BLAKE BY REMOTE SENSING

Adrián Hernández Ramos, M. C.

Colegio de Postgraduados: Postgrado en Ciencias Forestales, 2016

ABSTRACT

An adequate management of commercial forest plantations requires continuous knowledge of the dynamics of growth of forestry variables, among them are the leaf area index (LAI) and total biomass (Tb). Direct estimation of these variables is costly and time-consuming, so it is necessary to find an efficient alternative to estimate them indirectly. The objective of this research was to estimate and map the leaf area index and aboveground biomass using remote sensing data derived from commercial forest plantations of *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake in Huimanguillo, Tabasco, Mexico. Data came from a random sample consisting of 28 sites (500 m²) distributed in ages from 1 to 7 years. One hundred and twelve traps to capture litter were established and 140 hemispherical photographs were taken monthly for a year. For mapping, SPOT 7 and LANDSAT 8 satellite images were used, relating the spectral data and field information. The aboveground net primary productivity was higher in young plantations (37.33 Mg ha⁻¹ yr⁻¹), with a decreasing trend as age increases. The method of litterfall was similar to Allometric LAI and was calibrated with optical measurements. The selected model is known as the Power with $R^2_{aj} = 0.942$, RMSE = 4.2394 and significant parameters. Average LAI was 2.31 m² m⁻² and 93.47 Mg ha⁻¹ for Tb, using a stratified sampling which turned out to be the most accurate. The variables showed high correlations with red and green bands, and with the vegetation indices of SPOT 7 sensor, whereas for LANDSAT 8 were not significant. The ratio estimators had the nearest values to the traditional forestry inventory, but when mapping LAI and Tb these variables showed high errors, therefore, a multiple linear regression model was fitted for prediction and mapping. The use of spectral information for estimating forestry variables is an alternative and useful method on a large scale.

Keywords: litterfall, optical relations, traditional inventory, SPOT 7, Landsat 8.

DEDICATORIA

A mis padres Reyna Ramos Murcia y Alejandro Hernández Cárdenas, por darme la educación y la enseñanza para seguir adelante y nunca rendirme a pesar de los momentos negros de la vida. Por estar siempre apoyándome y regalándome consejos para ser una mejor persona.

A mis hermanos Jonathan y Alejandro que estuvieron a mi lado durante los momentos de desvelos y estrés por terminar la tesis. Además de ayudarme en los trabajos de campo y pasar juntos esos instantes de cansancio y mucho calor, que ni con una buena cerveza se calmaba.

“Vivir no es sólo existir, sino existir y crear, saber gozar y sufrir y no dormir sin soñar. Descansar, es empezar a morir”

AGRADECIMIENTOS

Al Colegio de Postgraduados y a las personas que conforman el Postgrado en Ciencias forestales, que con sus conocimientos compartidos logre unirlos para poder llevarme armas que me servirán al enfrentar la vida profesional.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por brindarme el apoyo económico para lograr terminar los estudios de maestría, que forman parte de mi formación académica y superación personal.

A ASTRIUM y ERMEX NG por apoyar con la información satelital de la plataforma SPOT 7, la cual se empleó para el análisis.

Al profesor y amigo el Dr. José René Valdez Lazalde por la enorme paciencia y colaboración brindada, además de las sugerencias, comentarios y conocimientos aportados a mi formación y elaboración del trabajo de investigación.

A los Dr. Gregorio Ángeles Pérez, Dr. Héctor de los Santos Posada y la Dr. Alicia Peduzzi, por formar parte de mi comité y por compartir sus conocimientos en la retroalimentación de la maestría y trabajo de investigación. Por brindarme de su tiempo para resolver dudas y solucionar problemas.

Al Dr. Omar Carrero y a la empresa PROTEAK por brindar el apoyo de logística y financiamiento para realizar el trabajo de investigación en sus plantaciones y llevar acabo las mediciones necesarias.

Al M. C. Xavier García por la amistad y tiempo que dedico en revisar el trabajo de investigación y aportar conocimientos para mejorarla.

A todos mis amigos con los que compartí momentos inolvidables de la maestría y que estuvieron a mi lado en todo momento a C. Javier Villalba, Luis Martínez Ángel, Esteban Torres, Rodrigo Huerta, Leonardo Alejandro Beltrán Rodríguez, Vicente F. Vásquez, Francisco Montoya Reyes y en especial a Fátima López López por quererme mucho.

La vida no es un problema a ser resuelto, sino una realidad a experimentar

(Soren Kierkegaard).

CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1.1. GENERALIDADES DE LOS BOSQUES Y PLANTACIONES.....	1
1.2. ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR	2
1.3. SIG Y PERCEPCIÓN REMOTA EN EL MANEJO FORESTAL.....	3
1.4. OBJETIVOS	4
1.4.1. General.....	4
1.4.2. Específicos	4
1.5. LITERATURA CITADA	4
CAPÍTULO II	8
2. PRODUCTIVIDAD PRIMARIA NETA AÉREA EN PLANTACIONES COMERCIALES DE <i>EUCALYPTUS UROPHYLLA</i> S.T. BLAKE EN HUIMANGUILLO, TABASCO, MÉXICO	8
2.1. RESUMEN	8
2.2. ABSTRACT	9
2.3. INTRODUCCIÓN.....	10
2.4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	12
2.4.1. Área de estudio	12
2.4.2. Caracterización de las plantaciones	12
2.4.3. Levantamiento de información en campo.....	13
2.4.4. Análisis comparativo de la producción de hojarasca y PPNA.....	16
2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	17

2.5.1.	Tasa de producción de hojarasca por componente y total	17
2.5.2.	Tasa mensual de producción de hojarasca	20
2.5.3.	Estimación de biomasa aérea	23
2.5.4.	Estimación de la productividad primaria neta aérea	25
2.6.	CONCLUSIONES	27
2.7.	LITERATURA CITADA	28
CAPÍTULO III		33
3.	ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR PARA PLANTACIONES COMERCIALES DE <i>EUCALYPTUS UROPHYLLA</i> S.T. BLAKE EN HUIMANGUILLO, TABASCO, MÉXICO	33
3.1.	RESUMEN	33
3.2.	ABSTRACT	34
3.3.	INTRODUCCIÓN	35
3.4.	MATERIALES Y MÉTODOS	36
3.4.1.	Área de estudio	36
3.4.2.	Levantamiento de información en campo	37
3.4.3.	Estimación del área foliar específica (AFE)	38
3.4.4.	Estimación del área foliar proyectada (AFP)	39
3.4.5.	Estimación del índice de área foliar	40
3.4.6.	Análisis estadístico	41
3.5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	43
3.5.1.	Área foliar específica (AFE) y área foliar proyectada (AFP)	43
3.5.2.	Índice de área foliar (IAF)	50
3.5.3.	Dinámica de índice de área foliar	54
3.6.	CONCLUSIONES	56
3.7.	LITERATURA CITADA	57

CAPÍTULO IV	61
4. ESTIMACIÓN DEL ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR Y BIOMASA AÉREA CON DATOS SPOT 7 Y LANDSAT 8 PARA <i>EUCALYPTUS UROPHYLLA</i> S.T. BLAKE	61
4.1. RESUMEN	61
4.2. ABSTRACT	62
4.3. INTRODUCCIÓN	63
4.4. MATERIALES Y MÉTODOS	64
4.4.1. Área de estudio	64
4.4.2. Datos de campo	65
4.4.3. Imágenes de satélite	66
4.4.4. Métodos de análisis de datos	68
4.4.5. Muestreo comparativo y estimación del error	69
4.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	70
4.5.1. Correlación entre los datos de campo y las variables espectrales	71
4.5.2. Modelos de regresión para IAF y Bt	75
4.5.3. Comparación del inventario tradicional vs estimadores de razón y regresión ..	76
4.6. CONCLUSIONES	80
4.7. LITERATURA CITADA	80
CAPÍTULO V	84
5. CONCLUSIONES GENERALES	84

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2.1. Valores dasométricos de las plantaciones de <i>E. urophylla</i> de la primera y última evaluación.....	13
Cuadro 2.2. Ecuaciones alométricas para estimar la biomasa aérea total y por componentes de <i>E. urophylla</i> , en Huimanguillo, Tabasco, México (Hernández-Ramos <i>et al.</i> , 2016).....	15
Cuadro 2.3. Producción media anual de hojarasca ($\text{g m}^{-2} \text{año}^{-1}$) por componentes y total para plantaciones de <i>E. urophylla</i> , en Huimanguillo, Tabasco, México.	19
Cuadro 2.4. Producción media mensual de hojarasca ($\text{g m}^{-2} \text{mes}^{-1}$) de las plantaciones de <i>E. urophylla</i> , en Huimanguillo, Tabasco, México.....	21
Cuadro 2.5. Biomasa aérea (Mg ha^{-1}) y porcentaje por componente de biomasa inicial y final acumulada por edad de plantación para <i>E. urophylla</i> en Huimanguillo, Tabasco, México.....	24
Cuadro 2.6. Productividad primaria neta aérea ($\text{Mg ha}^{-1} \text{año}^{-1}$) total y por componente para plantaciones de <i>E. urophylla</i> en Huimanguillo, Tabasco, México.	27
Cuadro 3.1. Modelos ajustados para estimar el área foliar específica (AFE) y área foliar proyectada (AFP) en plantaciones comerciales de <i>E. urophylla</i> en Huimanguillo, Tabasco, México.	42
Cuadro 3.2. Número de árboles por edad y valores dasométricos promedio de los árboles derribados de <i>E. urophylla</i> para estimar su índice de área foliar (IAF).	43
Cuadro 3.3. Área foliar específica ($\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$) promedio por tercio del árbol en plantaciones de <i>E. urophylla</i> de 1 a 7 años de edad en Huimanguillo, Tabasco, México.....	46
Cuadro 3.4. Estadísticos de ajuste y valores de los parámetros estructurales de los ocho modelos analizados para estimar el área foliar proyectada.	48

Cuadro 3.5. Comparación (diferencia porcentual) entre las estimaciones del índice de área foliar calculado por los métodos indirectos <i>versus</i> la metodología destructiva (IAF _{Alométrico}).	51
Cuadro 3.6. Estadísticos de ajuste y valores de los parámetros de los modelos con mejor ajuste para calibrar las estimaciones de índice de área foliar de <i>E. urophylla</i> en Huimanguillo, Tabasco, México.....	52
Cuadro 4.1. Ecuaciones para estimar las variables forestales de <i>E. urophylla</i> necesarias para el mapeo.....	66
Cuadro 4.2. Estimaciones de los inventarios obtenidos por muestreo simple al azar (MSA), muestreo estratificado (ME), estimadores de razón (ERa) y regresión (ERe), para las plantaciones de <i>E. urophylla</i> , en Huimanguillo, Tabasco, México.....	71
Cuadro 4.3. Coeficientes de correlación de Person entre las variables espectrales (VE) y el índice de área foliar (IAF), y biomasa total (Bt), para <i>E. urophylla</i> , en Huimanguillo, Tabasco, México.	73
Cuadro 4.4. Comparación del inventario tradicional y las estimaciones del índice de área foliar (IAF _H) y la biomasa total (Bt) empleando información espectral, para plantaciones de <i>E. urophylla</i>	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Ubicación geográfica de las plantaciones forestales comerciales de <i>E. urophylla</i> establecidas en Huimanguillo, Tabasco, México.....	12
Figura 2.2. Producción total anual de hojarasca (PTH), hojas, ramas (a) y frutos (b), en plantaciones de <i>E. urophylla</i> , en Huimanguillo, Tabasco.	17
Figura 2.3. Caída mensual de hojarasca total y por componente: hojas, ramas (a) y frutos (b), para plantaciones de <i>E. urophylla</i> en Huimanguillo, Tabasco, México.	22
Figura 2.4. Productividad primaria neta aérea (a) y aportación de biomasa de fuste (b), biomasa de hojas (c) y biomasa de ramas (d), para <i>E. urophylla</i> en Tabasco, México.	25
Figura 3.1. Ubicación geográfica de las plantaciones forestales comerciales de <i>E. urophylla</i> , establecidas en Huimanguillo, Tabasco, México.....	37
Figura 3.2. Promedios del (a) área foliar específica ($\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$) y (b) área foliar proyectada (m^2) con respecto a las edades de plantación. Letras diferentes indican diferencia en la comparación de medias.....	44
Figura 3.3. Valores observados y predichos del área foliar proyectada con el modelo 6. AFP _{Individual} : área foliar proyectada individual; BFS _{Total} : Biomasa foliar seca total.	49
Figura 3.4. Índice de área foliar estimado por método directo (Alométrico) e indirectos (óptico y hojarasca) para las plantaciones de <i>E. urophylla</i> , en Huimanguillo, Tabasco, México.....	50
Figura 3.5. Diagrama de dispersión del IAF, datos reales y estimados con los métodos caída de hojarasca y óptico para estimar el IAF _{Calibrado} en plantaciones de <i>E. urophylla</i> en Huimanguillo, Tabasco, México.	53

Figura 3.6. Comparación de la dinámica mensual de caída de hojarasca (a) e índice de área foliar calibrado (b) para las plantaciones de <i>E. urophylla</i> en Huimanguillo, Tabasco, México.	55
Figura 3.7. Índice de área foliar calibrado ($IAF_{\text{Calibrado}}$) mensual y promedio (línea discontinua) por edad de plantación para <i>E. urophylla</i> en Huimanguillo, Tabasco, México.....	55
Figura 4.1. Ubicación geográfica de las plantaciones forestales comerciales de <i>E. urophylla</i> , establecidas en Huimanguillo, Tabasco, México.....	65
Figura 4.2. Correlación entre las bandas espectrales roja (R) y verde (V) del satélite SPOT 7 con el índice de área foliar calculado con la caída de hojarasca (IAF_H) de <i>E. urophylla</i>	74
Figura 4.3. Correlación entre las bandas espectrales Azul (A) y Roja (R) del satélite SPOT 7 con la biomasa total (Bt) de <i>E. urophylla</i>	74
Figura 4.4. Diagrama de dispersión de observados y predichos del índice de área foliar (IAF_H) y biomasa total (Bt) contra la banda roja (R) del sensor SPOT 7.	76
Figura 4.5. Biomasa total ($Mg\ ha^{-1}$) mediante regresión lineal múltiple, para plantaciones de <i>E. urophylla</i> en Huimanguillo, Tabasco, México.....	78
Figura 4.6. Índice de área foliar ($m^2\ m^2$) mediante regresión lineal múltiple, para plantaciones de <i>E. urophylla</i> en Huimanguillo, Tabasco, México.	79

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1. GENERALIDADES DE LOS BOSQUES Y PLANTACIONES

Los bosques proporcionan múltiples bienes y servicios de carácter ambiental, social y económico a la población, además son un recurso fundamental para el desarrollo de la zonas rurales, debido que a nivel global y regional proporcionan abasto de madera y dendroenergía (Velázquez *et al.*, 2002; FAO, 2014), que ayudan a satisfacer sus necesidades. México cuenta con una superficie forestal de 138 millones de ha, 70 % del territorio nacional (Chapela, 2012; CONAFOR, 2014), y una producción anual de 5.9 millones de m³ de madera para el 2013 (INEGI, 2014).

La reducción de la superficie forestal en México ha decrecido (FAO, 2011), debido a la disminución en la presión de actividades antrópicas, resultado parcialmente del aumento de plantaciones forestales comerciales (PFC) o de restauración (PFR). La superficie anual de plantaciones para México en el 2000 fue de 3,096 ha y para 2014 fue de 20,065 ha (CONAFOR, 2014), mostrando una tendencia creciente en el establecimiento. La superficie establecida de PFC con el apoyo del PRODEPLAN, administrado por la CONAFOR es de 289,727 hectáreas, de las cuales 177,216 ha (61.2%) corresponden a plantaciones de tipo maderables y 112,511 ha (38.8) no maderables (CONAFOR, 2014).

El objeto de las PFC es producir materias primas, para su industrialización y/o comercialización (CONAFOR, 2014), generando un ingreso económico para el productor a mediano y largo plazo. Además de la importancia económica, actúan en conjunto con los bosques como reservorios de carbono (FAO, 2011), lo que hace que sean una alternativa para mitigar los efectos del cambio climático.

1.2. ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR

La radiación solar penetra las copas de los árboles reduciéndose en intensidad conforme avanza hacia el piso forestal. Esta reducción es causada principalmente por el índice de área foliar (IAF, $m^2 m^{-2}$) o superficie de hojas por unidad de terreno (Gadow *et al.*, 2007). El IAF se define como el área total de hojas o tejido fotosintético por unidad de terreno y se considera una variable biofísica útil en la modelación de procesos vegetales y para caracterizar la dinámica y productividad de cultivos agrícolas y ecosistemas forestales (Myneni *et al.*, 2002; Velasco *et al.*, 2010; Aguirre-Salado *et al.*, 2011; Papamija y García, 2012).

El IAF funciona como indicador de productividad en las plantaciones y puede usarse para describir la respuesta de los árboles a la aplicación de prácticas silvícolas. Estimarlos de forma precisa es esencial para los estudios sobre la cubierta vegetal y su interacción con la atmósfera, debido a que es un parámetro crítico sobre la respuesta del dosel de la vegetación a las condiciones ambientales prevalecientes (Jonckheeta *et al.*, 2004). Existen diversos métodos para estimar el IAF, directos e indirectos. Los métodos directos para estimar este parámetro requieren de un muestreo intensivo de cosecha y pesado de todas las hojas del árbol, por lo que suelen ser lentos y costosos, resultando imprácticos a escalas grandes (Lallana, 1999; Muñoz *et al.*, 2008; Cabezas-Gutiérrez *et al.*, 2009; Ledesma *et al.*, 2010; Velasco *et al.*, 2010), por lo que se recomienda el uso de metodologías alternativas.

Los métodos indirectos están basados en la recolección de hojarasca durante el periodo de desarrollo de los árboles (Eriksson *et al.*, 2005; Liu *et al.*, 2015), en medidas de la transmisión de la radiación solar a través del dosel (Perry *et al.*, 1988) y en la fracción de huecos, siendo una alternativa en la medición del IAF en diferentes tipos de vegetación (Martínez *et al.*, 2006).

1.3. SIG Y PERCEPCIÓN REMOTA EN EL MANEJO FORESTAL

Los sistemas de información geográfica (SIG) se definen como el conjunto de herramientas para la colecta, almacenamiento, manipulación y visualización de datos espaciales, lo que indica que la información concentrada está referenciada geográficamente. Los SIG facilitan múltiples operaciones que resultan difíciles por medios convencionales como la cartografía, integración de variables espaciales, modelado del terreno, análisis de vecindad, entre otros (Sánchez *et al.*, 1999; Chuvieco, 2008; Parra-Henao, 2010). Los SIG a diferencia de la cartografía tradicional presentan ventajas, debido a que almacenan atributos o características del paisaje en una capa espacial y son fáciles de actualizar por ser dinámicos en el manejo de bases de datos, contrariamente los mapas son estáticos y difícil de actualizar (Parra-Henao, 2010).

Los SIG combinados con sensores remotos y métodos de análisis geoespacial, ofrecen herramientas para la medición y análisis de variables forestales, reduciendo los costos operativos y aumentando la eficiencia de los inventarios forestales ha escalas mayores, mediante información de parcelas establecidas en las áreas boscosas de interés (Salas *et al.*, 2010; Muñoz-Ruiz *et al.*, 2014). En conjunto son una herramienta útil para evaluar la deforestación, afectación por incendios, ataque de plagas y enfermedades, desastres naturales o variables forestales (Bautista *et al.*, 2004).

Dentro de la biometría, la alta correlación que presentan las variables forestales y la información espectral ha generado la necesidad de comprobar la eficiencia de las plataformas satelitales para el mapeo de variables como el IAF, cobertura arbórea (%), volumen ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$), área basal ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$), densidad (árboles ha^{-1}), altura dominante (m), biomasa aérea arbórea (Mg ha^{-1}), carbono arbóreo aéreo (Mg ha^{-1}), entre otras (Valdez-Lazalde *et al.*, 2006; Aguirre-Salado

et al., 2009; Velasco *et al.*, 2010; Aguirre-Salado *et al.*, 2011; Muñoz-Ruiz *et al.*, 2014; Yépez y Lozano, 2014).

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. General

Estimar y mapear el índice de área foliar y biomasa aérea mediante datos derivados de sensores remotos en plantaciones forestales comerciales de *E. urophylla* S.T. Blake en el municipio de Huimanguillo, Tabasco, México.

1.4.2. Específicos

- i. Estimar la producción de hojarasca y la productividad primaria neta aérea en plantaciones forestales comerciales de *E. urophylla* S.T. Blake en Huimanguillo, Tabasco, México.
- ii. Calcular el índice de área foliar mediante métodos directos e indirectos en plantaciones forestales comerciales de *E. urophylla* S.T. Blake en Huimanguillo, Tabasco, México.
- iii. Estimar el índice de área foliar y la biomasa total con datos espectrales de SPOT 7 y LANDSAT 8 para plantaciones forestales comerciales de *E. urophylla* S.T. Blake establecidas en Huimanguillo, Tabasco, México.

1.5. LITERATURA CITADA

Aguirre-Salado, C. A., J. R. Valdez-Lazalde, G. Ángeles-Pérez, H. M. de los Santos-Posadas, y A. I. Aguirre-Salado. 2011. Mapeo del índice de área foliar y cobertura arbórea mediante fotografía hemisférica y datos Spot 5 HRG: Regresión y K-nn. *Agrociencia* 45: 105-119.

- Aguirre-Salado, C. A., J. R. Valdez-Lazalde, G. Ángeles-Pérez, H. M. de los Santos-Posadas, R. Haapanen, y A. I. Aguirre-Salado. 2009. Mapeo de carbono arbóreo aéreo en bosques manejados de pino *Patula* en Hidalgo, México. *Agrociencia* 43: 209-220.
- Bautista, Z. F., H. Delfín G., J. L. Palacio P., y M. C. Delgado C. 2004. Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales. Primea edición. Editorial Programme, Pachuca, Hidalgo. UNAM, México. 507 p.
- Cabezas-Gutiérrez, M., F. Peña, H. W. Duarte, J. F. Colorado, y R. L. Silva. 2009. Un modelo para la estimación del área foliar en tres especies forestales de forma no destructiva. *Revista U. D. C. A. Actualidad y Divulgación Científica* 12: 121-130.
- Chapela F. 2012. Estado de los bosques de México. Consejo civil mexicano para la silvicultura sostenible A. C. México, D. F. 217 p.
- Chuvieco S., E. 2008. Teledetección ambiental. La observación de la tierra desde el espacio. Tercera edición. Editorial Ariel, Barcelona, España. 596 p.
- CONAFOR. 2014. Superficies de plantaciones forestales comerciales establecidas por año con apoyos de la CONAFOR. <http://www.conafor.gob.mx/web/temas-forestales/plantaciones-forestales/> (Consulta: enero, 2016).
- Eriksson, H., L. Eklundh, K. Hall, and A. Lindroth. 2005. Estimating LAI in deciduous forest stands. *Agricultural and Forest Meteorology* 129: 27-37.
- FAO. 2011. Situación de los bosques del mundo. Roma, Italia. 193 p.
- FAO. 2014. El estado de los bosques del mundo; potenciar los beneficios socioeconómicos de los bosques. FAO Montes, Roma 134 p.
- Gadow V., K., S. Sánchez O., y J. G. Álvarez G. 2007. Estructura y crecimiento del bosque. IUFRO World Series 12: 242 p.

- INEGI. 2014. PIB-actividad de los bienes y servicios anual. <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/cn/bs/default.aspx> (Consulta: mayo, 2016).
- Jonckheere, I., S. Fleck, K. Nackaerts, B. Muys, P. Coppin, M. Weiss, and F. Baret. 2004. Review of methods for in situ leaf area index determination, Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology* 121: 19-35.
- Lallana, V. H. 1999. Medición del área foliar mediante escáner y software Idrisi. *Revista FAVE* 13: 27-33.
- Ledesma, M., C. A. Carranza, y M. Balzarini. 2010. Estimación de la biomasa foliar de *Prosopis flexuosa* mediante relaciones alométricas. *Agriscientia* 27: 87-96.
- Liu, Z., G. Jin, and M. Zhou. 2015. Evaluation and correction of optically derived leaf area index in different temperate forests. *iForest: Biogeosciences and Forestry* 8 p.
- Martínez, B., F. Camacho-Coca, y F. J. García-Haro. 2006. Estimación de parámetros biofísicos de vegetación utilizando el método de la cámara hemisférica. *Revista de Teledetección* 26: 5-17.
- Muñoz, F., M. Espinosa, J. Cancino, R. Rubilar, y M. Herrera. 2008. Efecto de la poda y raleo en el área foliar de *Eucalyptus nitens*. *Bosques* 29: 44-51.
- Muñoz-Ruiz, M. A., J. R. Valdez-Lazalde, H. M. de los Santos-Posadas, G. Ángeles-Pérez, y A. I. Monterroso-Rivas. 2014. Inventario y mapeo del bosque templado de Hidalgo, México mediante datos del satélite SPOT y de campo. *Agrociencia* 48: 847-862.
- Myneni, R. B., S. Hoffman, Y. Knyazikhin, J. L. Privette, J. Glassy, Y. Tian, Y. Wang, X. Song, Y. Zhang, G. R. Smith, A. Lotsch, M. Friedl, J. T. Morisette, P. Votava, R. R. Nemani, y S. W. Running. 2002. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. *Remote Sensing of Environment* 83: 214-231.

- Papamija M., D., y C. García S. 2012. Estimación del índice de área foliar en plantaciones de *Eucalyptus grandis* W. Hill. Colombia Forestal 15: 261-271.
- Parra-Henao, G. 2010. Sistemas de información geográfica y sensores remotos. Aplicación en enfermedades transmitidas por vectores. Revista CES Medicina 24: 75-89.
- Perry, S. G., A. B. Fraser, D. W. Thomson, and J. M. Norman. 1988. Indirect sensing of plant canopy structure with simple radiation measurements. Agricultural and Forest Meteorology 42: 255-278.
- Salas, C., L. Ene, N. Ojeda, y H. Soto. 2010. Métodos estadísticos paramétricos y no paramétricos para predecir variables de rodal basados en Landsat ETM+: una comparación en un bosque de *Araucaria araucana* en Chile. Bosque 31: 179-194.
- Sánchez, M. A., A. A. Fernández, y P. Illera. 1999. Los sistemas de información geográfica en la gestión forestal. Teledetección 96-99.
- Valdez-Lazalde, J. R., M. J. González-Guillén, y H. M. de los Santos-Posadas. 2006. Estimación de cobertura arbórea mediante imágenes satelitales multiespectrales de alta resolución. Agrociencia 40: 383-394.
- Velasco L., S., O. Champo J., M. L. España B., y F. Baret. 2010. Estimación del índice de área foliar en la reserva de la biósfera mariposa monarca. Revista Fitotecnia Mexicana 33: 169-174.
- Velázquez, A., J. F. Mas, R. Mayorga S., J. R. Díaz, C. Alcántara, R. Castro, T. Fernández, J. L. Palacio, G. Bocco, G. Gómez R., L. Luna G., I. Trejo, J. López G., M. Palma, A. Peralta, J. Prado M., y F. González M. 2002. Estado actual y dinámica de los recursos forestales de México. Biodiversitas 41: 8-15.
- Yépez R., F. D., y D. F. Lozano G. 2014. Mapeo del arbolado urbano con LiDAR aéreo. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 5: 58-75.

CAPÍTULO II

2. PRODUCTIVIDAD PRIMARIA NETA AÉREA EN PLANTACIONES COMERCIALES DE *Eucalyptus urophylla* S.T. BLAKE EN HUIMANGUILLO, TABASCO, MÉXICO

2.1. RESUMEN

La productividad primaria neta aérea (PPNA) es un indicador del rendimiento de las plantaciones. El objetivo fue estimar la producción de hojarasca y PPNA en plantaciones forestales comerciales de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake en Huimanguillo, Tabasco, México. La hipótesis nula fue que la PPNA disminuye conforme la edad aumenta. Para estimar la PPNA se consideró: (1) la producción total anual de hojarasca (PTH), estimada con la información obtenida de 112 trampas de captura, distribuidas en plantaciones de 1 a 7 años de edad, y mediciones mensuales de caída de hojarasca y (2) el incremento en biomasa por sitio estimado con la biomasa inicial y final de 28 sitios, de 500 m², distribuidos en las plantaciones con un diseño experimental completamente al azar. La estimación de la PTH e incrementos en biomasa se realizó por componentes y total utilizando las ecuaciones de biomasa reportadas para la especie. Un ANDEVA se aplicó para detectar las diferencias en PTH y PPNA por edad de la plantación y la prueba Tukey para comparación de las medias. El promedio de PTH en las plantaciones fue de 4.289 Mg ha⁻¹ año⁻¹, con producción mayor a la edad de siete años (5.628 Mg ha⁻¹ año⁻¹). El pico de caída de hojarasca se obtuvo en abril, mayo y junio (37.9 % del total anual). La producción menor correspondió al inicio de los meses de lluvia (julio a septiembre). La PPNA promedio fue 26.26 Mg ha⁻¹ año⁻¹, equivalente a 84.0 % de incremento en biomasa y 16.0 % de caída de hojarasca, y la mayor PPNA se presentó en plantaciones con edades de uno y dos años. Las plantaciones presentan crecimiento mayor en edades tempranas, al presentar mayor PPNA.

Palabras clave: Biomasa aérea, incremento en biomasa, hojarasca.

**ABOVEGROUND NET PRIMARY PRODUCTIVITY IN COMMERCIAL
PLANTATIONS OF *Eucalyptus urophylla* S.T. BLAKE IN HUIMANGUILLO,
TABASCO, MEXICO**

2.2. ABSTRACT

The aboveground net primary productivity (ANPP) is an indicator of yield in forest plantations. The objective of this research was to estimate litter production and ANPP in commercial forest plantations of *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake in Huimanguillo, Tabasco, Mexico. The null hypothesis was that the ANPP decreases as age increases. To estimate ANPP the following two elements were considered: (1) total annual production of litter (TPL), estimated with the information obtained from 112 capture traps distributed in plantations from 1 to 7 years of age, and monthly measurements of litterfall, and (2) the increase in biomass per site, estimated with the initial and final biomass of 28 sites, each of 500 m², distributed in the plantations as a completely random experimental design. TPL estimates and biomass increment were estimated using a components approach and the total biomass equations reported for the species. ANOVA was used to detect differences in TPL and ANPP per plantation's age, and the Tukey test for means comparison. The TPL average in plantations was 4.289 Mg ha⁻¹ yr⁻¹, with higher production at the age of seven years (5,628 Mg ha⁻¹ yr⁻¹). The peak of litterfall was obtained in April, May and June (37.9% of the annual total). The lower production corresponded to the beginning of the rainy season (July to September). Average ANPP was 26.26 Mg ha⁻¹ yr⁻¹, equivalent to 84.0% of biomass increase and 16.0% of litterfall. The highest ANPP was calculated for plantations of one and two years of age. The plantations have a higher growth at early ages, with greater ANPP.

Keywords: aboveground biomass, increased biomass, litter.

2.3. INTRODUCCIÓN

El aumento en la superficie de plantaciones forestales con fines comerciales o de restauración ha contribuido a disminuir la presión en los bosques naturales (FAO, 2006). Las plantaciones con fines comerciales se encargan de ofertar parte de la materia prima forestal que es demandada a los recursos forestales y representa una alternativa de producción económica y social (Alice *et al.*, 2004; FAO, 2015). Además, la oferta de madera de plantaciones, en comparación a la de los bosques naturales, representa ventajas competitivas debido a dos factores principales: (1) costos de producción y precios menores de la madera y (2) es una alternativa en la disminución de la presión hacia los recursos naturales, principalmente a los tropicales; estos presentan una de las tasas de pérdida y degradación mayor en el mundo, en comparación con otros ecosistemas (Velázquez *et al.*, 2002; FAO, 2006). Por ello, el consumo de recursos forestales de bosques naturales ha sido remplazado en gran medida por productos provenientes de plantaciones forestales comerciales (PFC) (FAO (2015).

La biomasa en pie es un indicador de la productividad, del potencial energético y de la capacidad de absorción de carbono de las plantaciones, además permite conocer el estado de desarrollo de la plantación y el potencial de rendimiento en volumen ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) de una especie, en un lugar específico, a cierta edad y con un tipo de manejo determinado (Castañeda-Mendoza *et al.*, 2012; Tamarit, 2014). Para conocer la dinámica de producción de biomasa de las PFC se requiere estimar su productividad en un sitio determinado. La productividad primaria bruta (PPB) es un indicador que considera la cantidad total de materia orgánica nueva (biomasa) fijada por las plantas en un intervalo de tiempo y área, sin considerar las pérdidas generadas por respiración. Para conocer la cantidad de biomasa que se fijó o se destinó a cada estructura de la planta en un intervalo de tiempo, se recomienda estimar la productividad primaria neta aérea (PPNA) que es la diferencia de PPB menos la respiración total necesaria para el

crecimiento de las plantas dentro del ecosistema (Grier *et al.*, 1989; Clark *et al.*, 2001a; Li *et al.*, 2015).

Para obtener una estimación precisa de la PPNA en plantaciones forestales comerciales es necesario obviar la estimación de la respiración de los árboles y considerar como PPNA la integración de dos factores: el incremento total de biomasa viva y las pérdidas de biomasa por la caída de detritos finos (hojarasca) en un intervalo de tiempo (Clark *et al.*, 2001a; Salas e Infante, 2006; Smith y Smith, 2007). La hojarasca es el material vegetal fino que se acumula sobre el suelo (hojas, flores, frutos, semillas y ramas) y su degradación es un proceso que permite la circulación de nutrientes en el ecosistema y mantiene su fertilidad (Salas e Infante, 2006; González *et al.*, 2013; Marmolejo *et al.*, 2013). La integración positiva de estos dos componentes para estimar la PPNA representa el aumento en la acumulación de biomasa en las plantaciones forestales comerciales en un tiempo establecido (Miquelajauregui, 2013). El incremento en biomasa permite cuantificar las existencias maderables en bosques naturales y en plantaciones, valor necesario para ofertar productos a la industria forestal de aserrío o de celulósicos.

El objetivo del estudio fue estimar la producción de hojarasca y la productividad primaria neta aérea en plantaciones forestales comerciales de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake en Huimanguillo, Tabasco, México. Lo anterior, con el propósito de conocer la dinámica de productividad en biomasa de las plantaciones en un año de crecimiento y aportar conocimiento para la aplicación de prácticas complementarias como fertilización y control de malezas. La hipótesis nula fue que la PPNA disminuye conforme la edad aumenta.

2.4. MATERIALES Y MÉTODOS

2.4.1. Área de estudio

El estudio se realizó en plantaciones forestales comerciales de *E. urophylla* del municipio de Huimanguillo, Tabasco (17° 55' N, 94° 06' O y altitud promedio de 30 m) (Figura 2.1). El clima es cálido húmedo (Am), con lluvias abundantes en verano, precipitación media anual de 2,500 mm y temperatura media anual alrededor de 26 °C. Los suelos en los que se desarrollan son de tipo Phaeozem (INEGI, 2005).



Figura 2.1. Ubicación geográfica de las plantaciones forestales comerciales de *E. urophylla* establecidas en Huimanguillo, Tabasco, México.

2.4.2. Caracterización de las plantaciones

Las plantaciones en las que se desarrolló el estudio presentan edades de crecimiento entre 1 y 7 años. Se establecieron con espaciamientos de 2×3 o de 2.5×3.5 m entre plantas e hileras y la densidad promedio calculada con el inventario es de 961 árboles ha⁻¹. Las plantas establecidas son clones mejorados de *E. urophylla* (Cuadro 2.1).

Cuadro 2.1. Valores dasométricos de las plantaciones de *E. urophylla* de la primera y última evaluación.

Edad	Variable	Julio 2014				Agosto 2015			
		Media	DE	Min	Max	Media	DE	Min	Max
1	Dn	7.59	1.603	3.20	10.90	11.92	2.432	4.90	16.60
	At	8.54	1.579	4.00	12.50	13.45	2.061	5.75	19.00
2	Dn	10.41	3.413	3.60	22.50	13.31	4.652	5.10	31.50
	At	11.47	3.013	4.00	20.50	14.63	3.724	6.00	22.30
3	Dn	12.93	1.839	6.70	17.50	13.93	1.825	7.50	18.10
	At	19.49	2.367	11.00	23.00	20.44	2.025	13.50	26.50
4	Dn	13.79	3.157	6.20	22.00	16.12	3.195	7.50	25.60
	At	18.53	3.191	8.50	25.00	19.87	2.369	9.50	24.50
5	Dn	14.11	2.606	7.50	20.40	15.52	2.996	7.70	22.20
	At	18.26	2.430	8.50	22.75	19.21	2.392	8.50	24.50
6	Dn	18.40	4.125	9.80	29.70	20.10	4.422	11.00	31.00
	At	24.47	4.214	14.00	31.50	25.41	4.206	15.00	32.50
7	Dn	19.26	5.050	6.70	31.00	-†	-	-	-
	At	26.89	5.343	12.00	34.00	-†	-	-	-

Dn: diámetro normal (cm); At: altura total (m); DE: desviación estándar; Min: mínimo; Max: máximo; †: Plantación cosechada durante la realización del estudio.

2.4.3. Levantamiento de información en campo

2.4.3.1. Producción de hojarasca

Dentro de las plantaciones de *E. urophylla* se estableció un sistema de muestreo aleatorio conformado de 28 sitios de 500 m², ubicando cuatro sitios por edad de plantación. Durante un

año (de agosto 2014 a julio 2015) se realizaron mediciones mensuales de la hojarasca caída en 112 trampas de captura de 1 m² de superficie de colecta, muestra suficiente para realizar análisis de varianza y de regresión (Arriaza, 2006; Martínez *et al.*, 2006). Se colocaron cuatro trampas por sitio, con un total de 16 trampas por edad de plantación. Las mediciones mensuales abarcaron las cuatro estaciones del año, lo que permitió detallar la dinámica de producción anual de hojarasca en las plantaciones.

La hojarasca recolectada mensualmente de cada trampa fue secada en estufa a 70 °C, por 72 horas, para evitar su descomposición. El material de cada trampa se separó en hojas, ramas (<2.0 cm de diámetro), frutos y corteza, y su peso seco se registró empleando una balanza con precisión de 0.01 g.

Con los datos de peso seco se calculó la tasa mensual de caída (Mg ha⁻¹ mes⁻¹) de cada componente mediante el promedio de las trampas establecidas por edad. La tasa anual de caída (Mg ha⁻¹ año⁻¹) se estimó mediante la sumatoria de las mediciones mensuales por sitio. Esta metodología ha sido utilizada ampliamente para diferentes tipos de vegetación como matorral desértico micrófilo, selvas tropicales y bosques templados, además de plantaciones de *Eucalyptus saligna*, *Albizia facaltaria*, *Pinus greggi*, *P. cembroides*, *P. patula*, *P. taeda* y *Bambusa oldhamii* (Binkley y Ryan, 1998; Pérez *et al.*, 2006; Quinto *et al.*, 2007; Navar y Jurado, 2009; Castañeda-Mendoza *et al.*, 2012; Gutiérrez *et al.*, 2012; González *et al.*, 2013; Kotowska *et al.*, 2015).

2.4.3.2. Productividad primaria neta aérea

Tomando en cuenta la dificultad de medición y la falta de modelos alométricos para calcular la biomasa subterránea, solo se estimó la PPNA. El cálculo se realizó considerando la integración del incremento en materia orgánica y las pérdidas debidas a la caída de hojarasca,

dentro de un intervalo de tiempo (Clark *et al.*, 2001b; Hanson *et al.*, 2003; Kotowska *et al.*, 2015).

La PPNA se estimó con la metodología planteada por Clark *et al.* (2001a), la cual considera el total de incremento en biomasa, la mortalidad de individuos y el crecimiento conjunto de los árboles incorporados, además de las pérdidas en el ecosistema por medio de hojarasca, asumiendo una tasa de reemplazo continua. Lo anterior se representa en la expresión siguiente:

$$PPNA = \text{Incremento en Biomasa (Mgha}^{-1} \text{ año}^{-1}) + \text{Pérdida (Hojarasca fina) (Mgha}^{-1} \text{ año}^{-1})$$

La biomasa se estimó a través de ecuaciones alométricas generadas mediante muestreo destructivo de 93 árboles de *E. urophylla* desarrollados en la misma área de estudio y con la misma condición de edad (Cuadro 2.2) (Hernández-Ramos *et al.*, 2016). Estas fueron alimentadas con los valores de diámetro normal (Dn) y altura total (At) de los individuos medidos en julio 2014 y agosto 2015 dentro de los 28 sitios de muestreo, obteniendo como resultado la biomasa individual.

Cuadro 2.2. Ecuaciones alométricas para estimar la biomasa aérea total y por componentes de *E. urophylla*, en Huimanguillo, Tabasco, México (Hernández-Ramos *et al.*, 2016).

Biomasa	Ecuación	R² Ajustada
Biomasa de fuste (<i>Bf</i>)	$Bf = 31.0843 * Dn^{1.311445} * At^{1.169998}$	0.9679
Biomasa de ramas (<i>Br</i>)	$Br = 7.567054 + 827.9449 * Dn^2 - 0.5271 * AT - 16.104 * (Dn^2 At)$	0.4670
Biomasa de hojas (<i>Bh</i>)	$Bh = 1.998759 + 44.66013 * Dn - 0.27063 * At$	0.4026
Biomasa total (<i>Bt</i>)	$Bt = 179.3627 * (Dn^2 At)^{0.750777}$	0.9552

Dn: diámetro normal (1.30 m) (cm); At: altura total (m).

Incremento en biomasa ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$): la estimación de la biomasa total y por componente (fuste, ramas y hojas) fue realizada al inicio (t_1) y al final (t_2) del periodo de análisis, incorporando al segundo muestreo la biomasa de los árboles perdidos por mortalidad. El incremento se define como la diferencia en biomasa entre t_2 y t_1 , esto se muestra en la formula siguiente (Klepac, 1983; Clark *et al.*, 2001a):

$$\Delta \text{Biomasa} = \frac{(\sum BA_{t_2} - \sum BA_{t_1}) + \sum B\Psi}{\delta_{\text{sitio}}}$$

Dónde: BA_{t_2, t_1} = Biomasa aérea calculada en el tiempo 1 y 2 ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), $B\Psi$ = Biomasa de los árboles perdidos por mortalidad ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) y δ_{sitio} = Superficie del sitio (m^2).

Hojarasca anual (pérdidas del ecosistema): Es la sumatoria de la hojarasca total caída mensualmente (por 12 meses) y por componentes en un m^2 , con el propósito de completar un ciclo de crecimiento de *E. urophylla* en condiciones de plantación.

2.4.4. Análisis comparativo de la producción de hojarasca y PPNA

Cada sitio de muestreo se consideró como una unidad experimental distribuida completamente al azar. La edad de cada sitio se tomó como el factor primario (tratamiento), seguido del mes como secundario y la producción de hojarasca como respuesta. Con este supuesto se realizó un ANDEVA para determinar las diferencias significativas entre las medias de la producción de hojarasca y PPNA total y por componentes. El comparativo incluye los resultados mensuales y anuales para determinar la época de mayor y menor producción. La prueba de comparación múltiple de medias Tukey se utilizó para analizar las diferencias de producción entre las plantaciones. Los análisis estadísticos se realizaron en el paquete estadístico SAS 9.4.

2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.5.1. Tasa de producción de hojarasca por componente y total

La variación en la producción total anual de hojarasca por *E. urophylla* es amplia entre plantaciones de diferente edad. El total anual de producción de hojarasca estimado fue de 4.068 a 5.628 $\text{Mg m}^{-2} \text{año}^{-1}$ para las plantaciones de 1 a 7 años. La producción mayor se observó en la plantación de siete años, seguida por la plantación de dos años, mientras que los valores más bajos se calcularon para las plantaciones de 4 y 5 años de edad. Las plantaciones restantes presentaron un comportamiento similar, entre ellas, en la producción total anual de hojarasca (Figura 2.2).

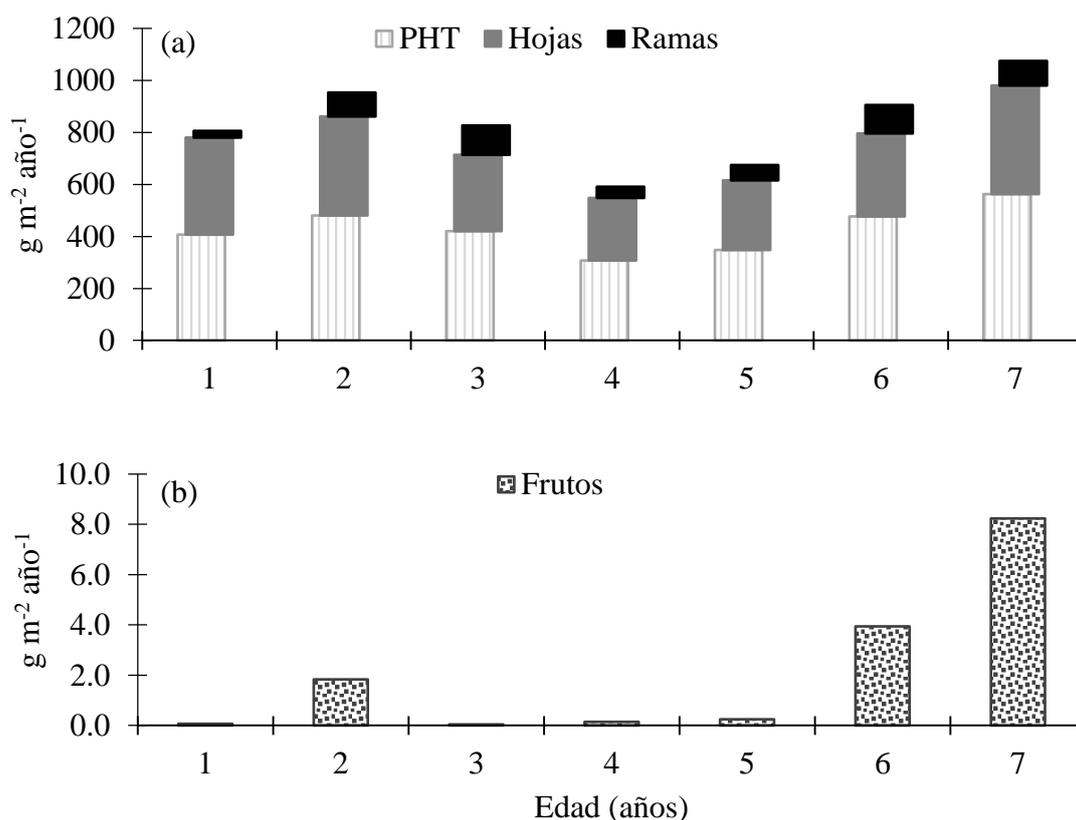


Figura 2.2. Producción total anual de hojarasca (PTH), hojas, ramas (a) y frutos (b), en plantaciones de *E. urophylla*, en Huimanguillo, Tabasco, México.

La producción total anual de hojarasca y por componentes fueron diferentes ($p = 0.05$) entre las plantaciones (Cuadro 2.3). Los valores bajos de hojarasca en plantaciones de 4 y 5 años se pueden atribuir a las diferencias clonales de los árboles establecidos en las plantaciones, a la calidad de estación, al tipo de manejo silvícola o bien por la suspensión de prácticas para el control de malezas y fertilización del suelo, generando una mayor competencia con el sotobosque.

La producción por componente hojas, ramas y frutos presentaron tendencias similares a la producción total descrita anteriormente. La producción de hojas caídas fue mayor en la plantación de siete años y menor en las de 4 y 5 años. En cuanto a ramas, el valor máximo se presentó en las plantaciones de tres años, y el mínimo en las de un año. Para los frutos, las plantaciones con 6 y 7 años de edad obtuvieron la mayor producción. Para el resto de las plantaciones no se registraron caídas considerables de frutos.

Las hojas son el componente que más aporta a la hojarasca, representan del 91.62 al 67.02 % para las plantaciones de 1 a 7 años. El segundo componente en aporte son las ramas, con un mínimo de 6.5 % y un máximo de 26.80 %, valor bastante menor en relación a las hojas. Los frutos representan un valor menor al 10 % con respecto a la PTH (Cuadro 2.3).

La producción promedio anual de hojarasca medida en las plantaciones de *E. urophylla* ($4.289 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) es similar a resultados obtenidos en plantaciones comerciales de especies de clima templado como *Pinus patula* a una edad de 13 y 15 años sin fertilizar, la cual presentó 5.768 y $4.365 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, respectivamente, en el norte del estado de Veracruz (Vásquez *et al.*, 2015); *Pinus radiata* con 26 años de edad y con vegetación asociada presentó $3.206 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, en la región de Valdivia, Chile (Huber y Oyarzún, 1983). Gutiérrez *et al.* (2012) reportaron valores menores de producción de hojarasca por plantación de *P. greggii* y *P. cembroides* establecidas en Coahuila, México ($1.072 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y $0.976 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$,

respectivamente), lo cual es entendible dado que *P. greggii* y *P. cembroides* son especies de lento crecimiento, en comparación a *E. urophylla*.

Cuadro 2.3. Producción media anual de hojarasca ($\text{g m}^{-2} \text{año}^{-1}$) por componentes y total para plantaciones de *E. urophylla*, en Huimanguillo, Tabasco, México.

Plantación	PTH		Hojas		Ramas		Frutos		Corteza	
Edad 1	406.80	c	372.72	b	26.45	c	0.06	b	7.58	c
	%		91.62		6.50		0.02		1.9	
Edad 2	479.95	b	381.16	b	91.78	b	1.83	b	5.19	c
	%		79.42		19.12		0.38		1.1	
Edad 3	420.93	c	292.49	b	112.80	a	0.04	b	15.61	b
	%		69.49		26.80		0.01		3.7	
Edad 4	307.85	c	240.19	c	43.25	b	0.14	b	24.26	b
	%		78.02		14.05		0.05		7.88	
Edad 5	347.39	c	268.38	c	58.11	c	0.25	b	20.65	b
	%		77.26		16.73		0.07		5.94	
Edad 6	476.73	b	319.53	d	109.43	a	3.94	a	43.84	a
	%		67.02		22.95		0.83		9.20	
Edad 7	562.83	a	416.74	a	95.18	b	8.23	a	42.68	a
	%		74.04		16.91		1.46		7.58	
Pr > F	0.0004		0.0001		0.0007		0.0003		0.0001	
μ	100		76.7		17.6		0.4		5.3	

PTH: producción total anual de hojarasca, medias con letra diferente en cada columna son estadísticamente diferentes; μ : media de la proporción de PTH para cada componente.

En cuanto a especies establecidas en regiones tropicales, Gamarra (2001) reportó que *Eucalytus globulus* Labill, establecido en Junin, Perú, produjo $4.99 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de hojarasca. Las plantaciones establecidas en climas tropicales presentan mayor producción a una edad menor, comparada con plantaciones templadas, esto se atribuye a que las regiones tropicales son más productivas que las templadas o de clima frío, causado por la disponibilidad alta de agua y temperaturas mayores, siendo variables significativas en el crecimiento de especies tropicales, caso contrario presentado en ecosistemas templados (Gómez y Gallopín, 1991).

2.5.2. Tasa mensual de producción de hojarasca

Los meses con mayor producción de hojas y ramas fueron abril, mayo y junio, independientemente de la edad de plantación. La producción conjunta de estos tres meses corresponde al 37.9 % de la producción total anual. El componente frutos registró una mayor producción en febrero y marzo, especialmente para las plantaciones de edad mayor a cinco años (Figura 2.3).

El ANDEVA indicó que la producción mensual de hojarasca es significativamente diferente entre meses ($p = 0.0001$), lo que implica que la caída de hojarasca de los árboles está diferenciada a lo largo del año, independientemente de la edad de plantación (Cuadro 2.4). El pico de producción mayor de las plantaciones ocurrió durante los meses de abril, mayo, junio y octubre, los tres primeros meses corresponden al final de la temporada seca, por lo que se atribuye la caída de hojarasca al estrés hídrico de las plantas y a la generación de nuevas hojas. Por otra parte, la acumulación mayor de hojarasca en octubre puede deberse a los fuertes vientos de la temporada o a las lluvias torrenciales que se presentan en la región en esa época del año. Los meses con menor aporte de hojarasca fueron febrero y julio (Cuadro 2.4).

Cuadro 2.4. Producción media mensual de hojarasca ($\text{g m}^{-2} \text{mes}^{-1}$) de las plantaciones de *E. urophylla*, en Huimanguillo, Tabasco, México.

Mes	Edad (años)												Media
	1	2	3	4	5	6	7						
Agosto	21.7 d	26.1 c	46.7 b	19.2 c	17.6 c	26.0 c	50.4 c	29.7 d					
Septiembre	25.5 d	39.9 c	34.9 b	17.8 c	19.4 c	29.1 c	39.7 c	29.5 d					
Octubre	48.8 b	44.0 c	45.9 b	22.1 c	24.7 c	37.0 c	44.4 c	38.1 c					
Noviembre	29.4 c	46.6 c	32.3 c	21.8 c	31.9 c	38.9 c	29.9 d	33.0 c					
Diciembre	33.5 c	30.4 c	16.9 d	22.8 c	25.2 c	45.7 c	28.8 d	29.1 e					
Enero	31.2 c	32.9 c	31.6 c	23.5 c	33.2 c	37.8 c	58.4 c	35.5 c					
Febrero	29.6 c	20.8 d	9.8 d	17.0 c	17.1 d	20.9 d	22.2 d	19.6 f					
Marzo	22.9 d	43.3 c	31.8 c	24.3 c	21.9 c	40.1 c	63.7 b	35.4 c					
Abril	45.7 c	42.1 c	36.0 b	37.0 b	33.1 c	54.8 b	59.9 c	43.8 b					
Mayo	68.3 a	91.2 a	75.5 a	51.7 a	66.2 a	77.4 a	100.0 a	75.8 a					
Junio	37.1 c	48.2 b	45.6 b	35.7 b	38.5 b	48.9 c	47.0 c	43.0 b					
Julio	13.2 e	14.4 e	13.9 d	16.0 c	18.7 c	20.1 d	19.8 f	16.5 f					
PTH	406.80	479.95	420.93	307.85	347.39	476.73	562.83	428.93					

PTH: producción total de hojarasca, medias con letra diferente en cada columna son estadísticamente diferentes.

El pico de producción máxima por componente hojas y ramas tuvo el mismo comportamiento que PTH, al igual que los valores bajos. Por otro lado, las ramas presentaron valores menores en julio, agosto y septiembre, atribuido a que meses anteriores se presentó el pico de producción. La caída de frutos fue mayor durante los meses de octubre, febrero y marzo, con valores significativamente mayores en las plantaciones con edad de desarrollo avanzada y maduración fenológica de los árboles (Figura 2.3b).

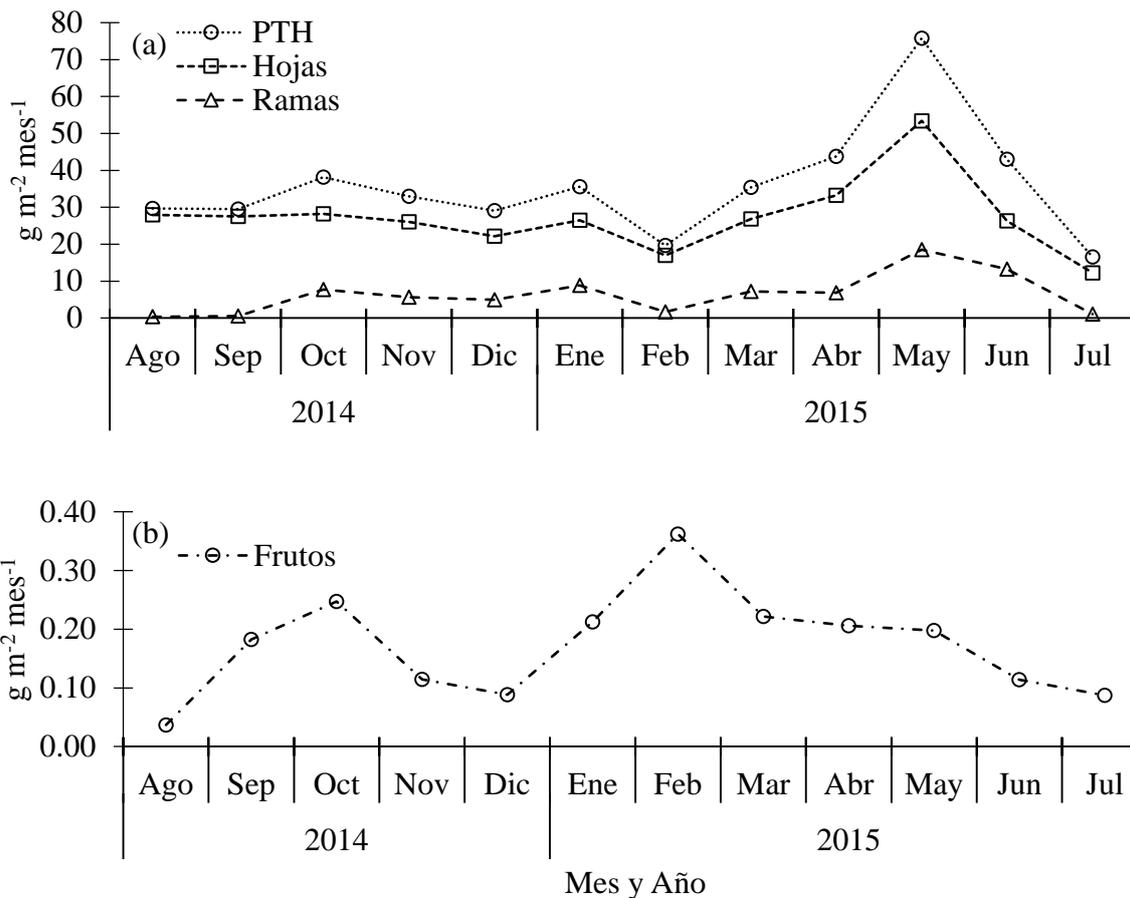


Figura 2.3. Caída mensual de hojarasca total y por componente: hojas, ramas (a) y frutos (b), para plantaciones de *E. urophylla* en Huimanguillo, Tabasco, México.

Castañeda-Mendoza *et al.* (2012) concuerdan que la máxima caída de hojarasca en el año se produce entre los meses de febrero a julio, así lo indican los resultados para plantaciones de *Bambusa oldhamii*, en Huatusco, Veracruz, México. Gutiérrez *et al.* (2012) señalan que los aportes más importantes de hojarasca ocurren durante mayo y junio para las especies de *P. greggii* y *P. cembroides* desarrolladas en plantaciones en Coahuila, México. En especies tropicales, Di Stefano y Fournier (2005) concluyeron que la mayor caída de hojarasca en plantaciones de monocultivo se presenta en la estación de secas y época de presencia de vientos fuertes.

La época con menor precipitación y mayor temperatura registrada en el lugar de estudio es de febrero a junio, lo que genera estrés hídrico en las plantas y con ello la estimulación de pérdida de hojas para evitar la deshidratación. Los resultados son similares a los encontrados en bosques naturales de pino-encino, los cuales registran una producción mayor en los meses de marzo, abril y mayo en las condiciones estudiadas, además, presentaron una acumulación durante octubre y noviembre, atribuible a la presencia de fenómenos meteorológicos (Rocha y Ramírez, 2009).

2.5.3. Estimación de biomasa aérea

La proporción de biomasa del fuste (Bf), en relación a la Bt, es mayor conforme aumenta la edad de los árboles (Cuadro 2.5), debido a la acumulación de biomasa en su estructura de soporte; esto es típico de plantaciones jóvenes de rápido crecimiento (Reed y Tomé, 1998). Contrario a ello, la proporción de biomasa de hojas (Bh) y de ramas (Br) disminuye conforme aumenta la edad de las plantaciones. No obstante, la producción de estos componentes fue relativamente constante en todas las edades, característica influenciada por la capacidad productiva del sitio. La proporción promedio de biomasa por componente fue de 85.8, 4.0 y 10.3 %, para BF, BH y BR respectivamente, al inicio y al final de la medición.

E. wrophylla acumuló una Bt de 148.0 Mg ha⁻¹ a los siete años de edad. El incremento anual del periodo de evaluación se estimó en 33.32, 25.55, 11.77, 14.31, 16.87 y 21.54 Mg ha⁻¹ año⁻¹ para las seis plantaciones descritas en el Cuadro 2.5, respectivamente, y un promedio general anual de 20.56 Mg ha⁻¹ año⁻¹.

Cuadro 2.5. Biomasa aérea (Mg ha⁻¹) y porcentaje por componente de biomasa inicial y final acumulada por edad de plantación para *E. urophylla* en Huimanguillo, Tabasco, México.

Tipo	E₁₋₂	%	E₂₋₃	%	E₃₋₄	%	E₄₋₅	%	E₅₋₆	%	E₆₋₇	%
Bf Inicial	14.90	57.1	29.88	71.5	68.08	88.8	79.10	85.5	73.04	85.7	116.43	92.1
Bh Inicial	3.36	12.9	3.37	8.1	2.55	3.3	3.61	3.9	3.36	3.9	2.79	2.2
Br Inicial	7.83	30.0	8.52	20.4	6.05	7.9	9.85	10.6	8.82	10.3	7.25	5.7
Bt Inicial	26.09		41.77		76.67		92.55		85.21		126.46	
Bf Final	45.15	76.0	53.37	79.3	79.19	89.5	93.05	87.1	88.12	86.3	136.24	92.1
Bh Final	4.01	6.8	3.73	5.5	2.71	3.1	3.67	3.4	3.73	3.7	3.19	2.2
Br Final	10.25	17.2	10.22	15.2	6.54	7.4	10.14	9.5	10.23	10.0	8.57	5.7
Bt Final	59.41		67.32		88.44		106.87		102.08		148.00	

E₁₋₂, E₂₋₃, E₃₋₄, E₄₋₅, E₅₋₆, E₆₋₇: Edad de plantación al inicio y final de la medición; Bf: Biomasa de fuste; Bh: biomasa de hojas; Br: biomasa de ramas; %: porcentaje en base a la biomasa total (Bt).

Binkley y Ryan (1998) reportaron valores similares para plantaciones de *E. saligna* de 16 años de edad, 323 Mg ha⁻¹, de biomasa total, valor proporcional a la edad considerando un incremento medio anual de 20.3 Mg ha⁻¹ año⁻¹. Geldres *et al.* (2006) presentaron valores de biomasa acumulada de 73.1, 111.8 y 159.5 Mg ha⁻¹ para plantaciones de *E. nitens* de 4, 5 y 6 años de edad, respectivamente, además de incrementos anuales en biomasa de 39.2 Mg ha⁻¹ con 4 a 5 años y 50.1 Mg ha⁻¹ entre 5 y 6 años de edad, estimaciones superiores a las obtenidas en este estudio. Los valores altos de *E. nitens* están en relación al control de malezas y fertilizaciones aplicadas en los primeros tres años de edad y un raleo aplicado a los cinco años,

etapa de mayor crecimiento de los árboles. A diferencia de este trabajo en el que las plantaciones presentaron un manejo heterogéneo entre ellas.

2.5.4. Estimación de la productividad primaria neta aérea

La PPNA promedio estimada para *E. urophylla* es de 26.26 Mg ha⁻¹ año⁻¹, de la cual 84.0 % corresponde al incremento en biomasa viva y 16.0 % a la biomasa incorporada al suelo mediante hojarasca. La aportación promedio a la PPNA por Bf es de 20.23 Mg ha⁻¹ año⁻¹ (77.0 %), por Bh 3.62 Mg ha⁻¹ año⁻¹ (13.8 %) y por Br 2.39 Mg ha⁻¹ año⁻¹ (9.1 %) para todas las edades (Figura 2.4). El análisis de varianza indica diferencias significativas ($\alpha = 0.0001$) en la PPNA por edad de plantación (Cuadro 2.6). La distribución del conjunto de datos de PPNA en cada edad es variable, por lo que se denotan diferencias en sus medias.

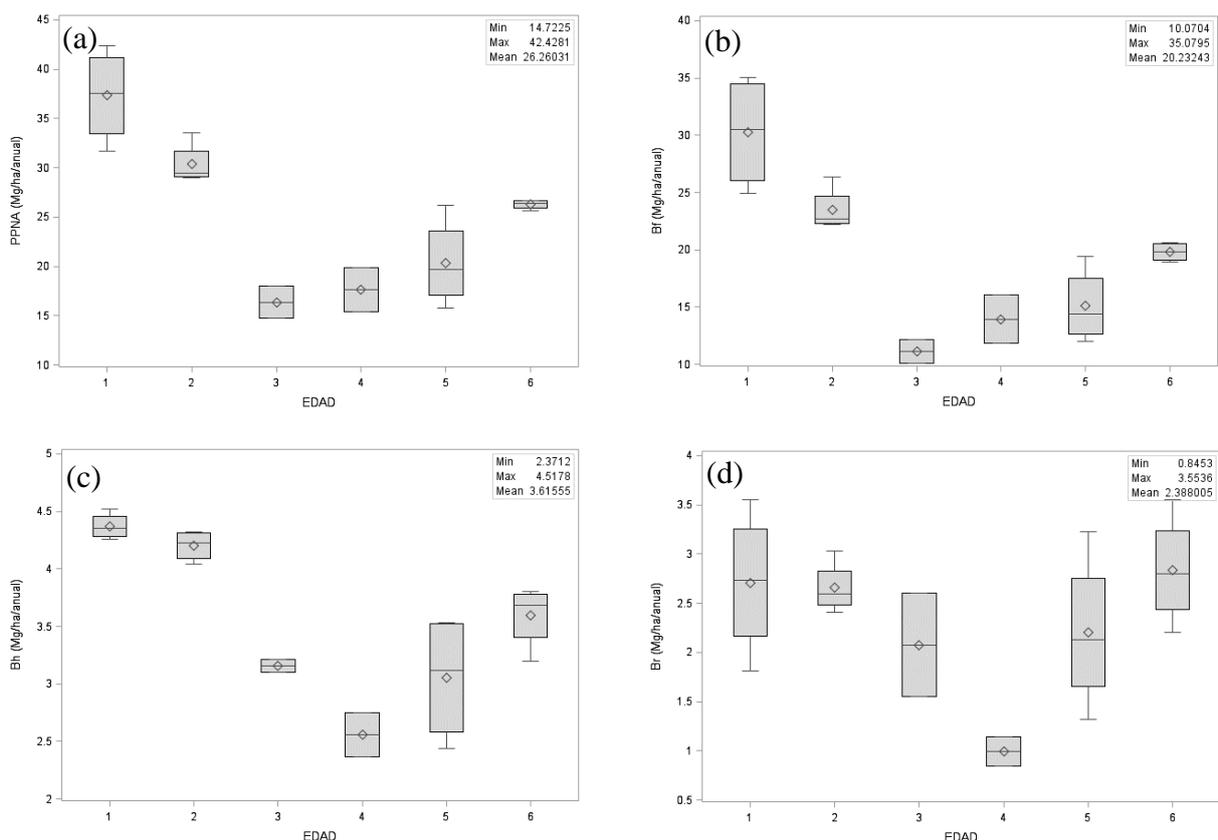


Figura 2.4. Productividad primaria neta aérea (a) y aportación de biomasa de fuste (b), biomasa de hojas (c) y biomasa de ramas (d) para *E. urophylla* en Huimanguillo, Tabasco, México.

La variabilidad en la PPNA a diferentes edades se ratifica con los resultados de comparación de medias obtenidos con la prueba de Tukey, la cual indica que la productividad mayor de las plantaciones se presenta durante los primeros años de crecimiento, cuando los árboles presentan aumento de dimensiones y mayor eficiencia en asimilación de nutrimentos. Las edades con mayor incremento de PPNA son de 1-2 y 2-3 años con valores iguales a 37.33 y 30.37 Mg ha⁻¹ año⁻¹. Sin embargo, la edad de 6-7 años presentó un valor alto, con 26.28 Mg ha⁻¹ año⁻¹, lo que indica que la PPNA no decae considerablemente con la edad, y los resultados bajos en las edades 3-4, 4-5 y 5-6 puede deberse a la capacidad productiva del suelo donde están establecidas, a la competencia por espacio y nutrimentos con plantas herbáceas, al déficit de fertilización o la diferencia de clones de los que no se tiene registro, además de la etapa inicial de producción de órganos reproductivos.

Las plantaciones jóvenes presentaron la mayor PPNA, lo que concuerda con Tuner *et al.* (2009) y Ernst *et al.* (2000) quienes indican que a menor edad mayor tasa de crecimiento y por consiguiente un aumento en la captura de Carbono. Binkley y Ryan (1998) registraron para plantaciones de *E. saligna* con edades de 2 a 4 años una PPNA de 27.9 Mg ha⁻¹ año⁻¹, a los seis años 22.4 Mg ha⁻¹ año⁻¹ y para edades entre 10 y 16 años 10.9 Mg ha⁻¹ año⁻¹, presentando un patrón decreciente de la productividad conforme aumenta la edad de la plantación. Ares y Fownes (2000) obtuvieron para *E. saligna*, a una edad de 28 a 36 años, valores de PPNA de 15.8 y 23.8 Mg ha⁻¹ año⁻¹, estimaciones relativamente bajas para esta especie debido a la edad; determinaron que la PPNA disminuye en altitudes mayores y en áreas de precipitación baja debido a una menor disponibilidad de agua.

Cuadro 2.6. Productividad primaria neta aérea ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) total y por componente para plantaciones de *E. urophylla* en Huimanguillo, Tabasco, México.

Producción	E₁₋₂		E₂₋₃		E₃₋₄		E₄₋₅		E₅₋₆		E₆₋₇	
Total	37.33	a	30.37	a	16.35	d	17.66	c	20.34	c	26.28	b
Fuste	30.25	a	23.49	b	11.11	d	13.96	c	15.08	c	19.81	b
Follaje	4.37	a	4.20	a	3.16	b	2.56	c	3.05	b	3.59	b
Ramas	2.71	a	2.66	a	2.08	a	2.66	b	2.20	a	2.84	a

E₁₋₂, E₂₋₃, E₃₋₄, E₄₋₅, E₅₋₆, E₆₋₇: edad de plantación al inicio y final, medias con letra diferente en cada hilera son estadísticamente diferentes.

Ignacio *et al.* (2005) indicaron que conforme aumenta la edad de las plantaciones de *E. urophylla* el crecimiento e incremento de los árboles disminuye por causas de competencia por espacio o cambio de etapa fenológica de la especie, además mencionan que el crecimiento en diámetro y volumen se estabiliza a la edad de tres años causando una baja productividad a esta edad. El valor promedio de PPNA de nuestro estudio, $26.26 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, es mayor al valor registrado para ecosistemas tropicales de $21.60 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Murphy, 1975), demostrando que las plantaciones de *E. urophylla* analizadas presentan una alta productividad en biomasa.

2.6. CONCLUSIONES

La estimación de la productividad primaria neta aérea mediante la evaluación del incremento total de biomasa y la pérdida de hojarasca en un intervalo de tiempo establecido, es un método práctico para determinar la productividad en biomasa de las plantaciones forestales comerciales y del sitio de desarrollo.

La productividad primaria neta aérea de las plantaciones forestales comerciales de *E. urophylla* analizadas varía con la edad. Las plantaciones jóvenes mostraron una productividad

mayor. En contraste, los árboles de *E. urophylla* producen cantidades más grandes de hojarasca en edades mayores y con grandes dimensiones. La producción de follaje nuevo se presenta en los meses de junio a agosto, temporada en la que los árboles pueden aprovechar actividades de fertilización del suelo por su tasa alta de asimilación de nutrimentos.

2.7. LITERATURA CITADA

- Alice, F., F. Montagnini, y M. Montero. 2004. Productividad de plantaciones puras y mixtas de especies nativas en la estación biológica La Selva, Sarapiquí, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 28: 61-71.
- Ares, A., and J. H. Fownes. 2000. Productivity, nutrient and water-use efficiency of *Eucalyptus saligna* and *Toona ciliata* in Hawaii. *Forest Ecology and Management* 139: 227-236.
- Arriaza B., M. 2006. Guía práctica de análisis de datos. Primera edición. Ideagonal diseño gráfico. IFAPA, Cordoba, España. 200 p.
- Binkley, D., and M. G. Ryan. 1998. Net primary production and nutrient cycling in replicated stands of *Eucalyptus saligna* and *Albizia facaltaria*. *Forest Ecology and Management* 112: 79-85.
- Castañeda-Mendoza, A., J. J. Vargas-Hernández, and A. Gómez-Guerrero. 2012. Components of net aerial primary production in a *Bambusa aldamii* plantation. *Agrociencia* 46: 63-74.
- Clark, D. A., S. Brown, D. W. Kicklighter, J. Q. Chambers, J. R. Thomlinson, and J. Ni. 2001a. Measuring net primary production in forests: Concepts and field methods. *Ecological Applications* 11: 356-370.
- Clark, D. A., S. Brown, D. W. Kicklighter, J. Q. Chambers, J. R. Thomlinson, J. Ni., and E. A. Holland. 2001b. Net primary production in tropical forests: an evaluation and synthesis of existing field data. *Ecological Applications* 11: 371-384.

- Di Stefano, J. F., y L. A. Fournier. 2005. Caída de hojarasca y tasas de descomposición de las hojas de *Vochysia guatemalensis* en una plantación de 10 años, Tabarcia de Mora, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 29: 9-16.
- Ernst D., S. C. Wirth, and M. Heimann. 2000. Managing forests after Kyoto. *Climate Change* 289: 2058-2059.
- FAO. 2006. Tendencias y perspectivas del sector forestal en América Latina y el Caribe. FAO: Dirección de productos y economía forestales, Departamento Forestal. FAO, Roma, Italia. 178 p.
- FAO. 2015. Evaluación de los recursos forestales mundiales 2015: ¿cómo están cambiando los bosques del mundo? FAO, Roma, Italia. 49 p.
- Gamarra R., J. 2001. Estimación de carbono en plantaciones de *Eucalyptus globulus* Labill, en Junin, Perú. Simposio internacional medición y monitoreo de la captura de carbono en ecosistemas forestales, Chile. 21 p.
- Geldres, E., V. Gerding, and J. E. Schlatter. 2006. Biomasa de *Eucalyptus nitens* de 4-7 años de edad en un rodal de la X Región, Chile. *Bosques* 27: 223-230.
- Gómez, A., y G. C. Gallopín. 1991. Estimación de la productividad primaria neta de ecosistemas terrestres del mundo en relación a factores ambientales. *Ecología Austral* 1: 24-40.
- González R., H., R. G. Ramírez-Lozano, I. Cantú-Silva, M. V. Gómez-Meza, M. Cotera-Correa, A. Carrillo-Parra, y J. J. Marroquín-Castillo. 2013. Producción de hojarasca y retorno de nutrientes vía foliar en un matorral desértico micrófilo en el noreste de México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 19: 249-262.
- Grier, C. C., K. M. Lee., N. M. Nadkarni, G. O. Klock, and P. J. Edgerton. 1989. Productivity of forests of the United States and its relation to soil and site factors and management practices: a review. Forest Service: General Technical Report 53 p.

- Gutiérrez V., M. H., J. Méndez G., C. Flores L., J. A. Ramírez D., y B. N. Gutiérrez V. 2012. Caída de hojarasca en plantaciones de *Pinus greggi* Engelm. y *Pinus cembroides* Zucc, en Coahuila, México. *Fitotecnia Mexicana* 35: 123-133.
- Hanson, P. J., N. T. Edwards, T. J. Tschaplinski, S. D. Wullschleger, and J. D. Joslin. 2003. Estimating the net primary and net ecosystem production of a Southeastern Upland *Quercus* forest from an 8-year biometric record. *North American Temperate Deciduous Forest Responses to Changing Precipitation Regimes*. Springer, New York. 472 p.
- Hernández-Ramos, J., H. M. Santos-Posadas, J. R. Valdez-Lazalde, J. C. Tamarit-Urias, G. Ángeles-Pérez, A. Hernández-Ramos, y A. Peduzzi. 2016. Biomasa aérea y factores de expansión de biomasa en plantaciones forestales comerciales de *Eucalyptus urophylla*. Enviado para publicación.
- Huber J., A., y C. Oyarzún C. 1983. Producción de hojarasca y sus relaciones con factores meteorológicos en un bosque de *Pinus radiata* (D. Don). *Bosque* 5: 1-11.
- Ignacio S., E., J. J. Vargas H., J. López U., y A. Borja de la R. 2005. Parámetros genéticos del crecimiento y densidad de madera en edades juveniles de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. *Agrociencia* 39: 469-479.
- INEGI. 2005. Marco Geoestadístico Municipal 2005, versión 3.1. Disponible en <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/datos-geograficos/27/27008.pdf> (Consulta: agosto 2015)
- Klepac, D. 1983. Crecimiento e incremento de árboles y masas forestales. Segunda edición. Universidad Autónoma Chapingo. 279 p.
- Kotowska, M. M., C. Leuschner, T. Triadiati, S. Meriem, and D. Hertel. 2015. Quantifying above and belowground biomass carbon loss with forest conversion in tropical lowlands of Sumatra (Indonesia). *Global Change Biology* 21: 3620-3620.

- Li, S., S. Lu, Y. Zhang, Y. Liu, Y. Gao, and Y. Ao. 2015. The change of global terrestrial ecosystem net primary productivity (NPP) and its response to climate change in CMIP5. *Theor. Appl. Climatol.* 121: 319-335.
- Marmolejo M., J. G., C. M. Cantú A., y M. A. Gutiérrez S. 2013. Degradación de la hojarasca en sitios con vegetación primaria y secundaria del matorral espinoso Tamaulipeco. *Rev. Mexicana Ciencias Forestales* 4: 174-181.
- Martínez G., M., A. Sánchez V., y J. Faulin F. 2006. Bioestadística amigable. Segunda edición, Editorial Díaz de Santos, España. 920 p.
- Miquelajauregui, Y. 2013. Modelos de simulación de la dinámica del carbono. *In: Aplicación de modelos ecológicos a la gestión de recursos naturales.* J. A. Blanco (ed.). Barcelona, España. OmniaScience 15-38.
- Murphy, P. G. 1975. Net primary productivity in tropical terrestrial ecosystems. In *Primary productivity of the biosphere.* Lieth, H. and R. H. Whittaker (Eds.). Berlin, Heidelberg, New York. Ed. Springer-Verlag. Pp: 217-231.
- Navar C., J. J., y E. Jurado Y. 2009. Productividad foliar y radicular en ecosistemas forestales del noreste de México. *Revista Ciencia Forestal en México* 34: 89-106.
- Pérez, C. A., J. F. Goya, F. Bianchini, J. L. Frangi, y R. Fernández. 2006. Productividad aérea y ciclo de nutrientes en plantaciones de *Pinus taeda* L. en el norte de la provincia de Misiones, Argentina. *Interciencia* 31: 794-801.
- Quinto M., H., Y. A. Ramos P., y D. Abadía B. 2007. Cuantificación de la caída de hojarasca como medida de la productividad primaria neta en un bosque pluvial tropical en Salero, Chocó, Colombia. *Biodiversidad* 26: 28-41.
- Reed, D., and M. Tomé. 1998. Total aboveground biomass and net dry matter accumulation by plant component in young *Eucalyptus globulus* in response to irrigation. *Forest Ecology and Management* 103: 21-32.

- Rocha L., A. G., y N. Ramírez M. 2009. Producción y descomposición de hojarasca en diferentes condiciones sucesiones del bosque de pino-encino en Chiapas, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 84: 1-12.
- Salas R., J., y A. Infante C. 2006. Producción primaria neta aérea en algunos ecosistemas y estimaciones de biomasa en plantaciones forestales. *Forestal Latinoamericana* 40: 47-70.
- Smith M., T., y R. L. Smith. 2007. *Ecología*. Sexta edición. Pearson Educación S. A., Madrid, España. 681 p.
- Tamarit U., J. C. 2014. Clasificación de la productividad de plantaciones comerciales de teca vía el índice de sitio. Folleto Técnico. INIFAP. 3 p.
- Tuner G., M., E. A. H. Smithwick, D. B. Tinker, and W. H. Romme. 2009. Variation in foliar nitrogen and aboveground net primary production in young postfire lodgepole pine. *Can. J. For. Res.* 39: 1024-1035.
- Vásquez G., I., M. A. López L., G. Ángeles P., A. Trinidad S., M. Jiménez C., y G. Aguilar B. 2015. Aclareo y fertilización química en la productividad primaria neta de plantaciones de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 6: 82-93.
- Velázquez, A., J. F. Mas, R. Mayorga S., J. R. Díaz, C. Alcántara, R. Castro, T. Fernández, J. L. Palacio, G. Bocco, G. Gómez R., L. Luna G., I. Trejo, J. López G., M. Palma, A. Peralta, J. Prado M., y F. González M. 2002. Estado actual y dinámica de los recursos forestales de México. *Biodiversitas* 41: 8-15.

CAPÍTULO III

3. ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR PARA PLANTACIONES COMERCIALES DE *Eucalyptus urophylla* S.T. BLAKE EN HUIMANGUILLO, TABASCO, MÉXICO

3.1. RESUMEN

El índice de área foliar (IAF, $m^2 m^{-2}$) funciona como indicador de productividad en las plantaciones y puede usarse para describir la respuesta de los árboles a la aplicación de prácticas silvícolas. El objetivo de este trabajo fue calcular el índice de área foliar en plantaciones forestales comerciales de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake en Huimanguillo, Tabasco, México mediante tres métodos: destructivo (alométrico), hojarasca caída y fotografía hemisférica (óptico). Se utilizaron datos de plantaciones de 1 a 7 años de edad. Los valores de IAF obtenidos por cada método se correlacionaron para ajustar modelos mediante regresión. Los valores promedio del IAF fueron 2.7, 2.6 y 1.6 para el método alométrico, hojarasca caída y óptico, respectivamente. El método óptico subestima en 34 % el IAF, mientras el de hojarasca caída lo sobreestima en 20 %, esto tomando como valor real el IAF estimado de forma directa. La correlación del método directo contra los indirectos mostró valores bajos de 0.30 y 0.33 respectivamente, no obstante entre los métodos indirectos hubo una correlación de 0.75. El máximo valor de IAF se presentó en julio y agosto, meses de producción mayor de hojas para *E. urophylla*, en condiciones de plantación.

Palabras clave: Fracción de huecos, método óptico, estructura del dosel, dinámica de producción, *Eucalyptus urophylla*.

**LEAF AREA INDEX FOR *Eucalyptus urophylla* S.T. BLAKE COMMERCIAL
PLANTATIONS IN HUIMANGUILLO, TABASCO, MEXICO**

3.2. ABSTRACT

Leaf area index (LAI, $m^2 m^{-2}$) function as an indicator of productivity in plantations and can be used to describe the response of trees to the application of silvicultural practices. The objective of this research was to estimate the leaf area index in commercial forest plantations of *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake in Huimanguillo, Tabasco, Mexico, by three methods: destructive (allometric), litter fall and hemispheric photography (optical). Data were obtained from plantations of ages from 1 to 7 years. The LAI values obtained by each method were correlated to adjust regression models. The average LAI values were 2.7, 2.6 and 1.6 for the allometric method, litter fall and optical methods, respectively. The optical method underestimated LAI in 34 %, whereas litter fall overestimate it in 20 %, as compared to the IAF value estimated directly (allometric method). The correlation between the direct and the indirect methods showed low values of 0.30 and 0.33 respectively, however, the correlation between the indirect methods was higher (0.75). The maximum value of LAI occurs in July and August, months of higher production for *E. urophylla* leaves in planting conditions.

Keywords: Void fraction, optical method, canopy structure, production dynamics, *Eucalyptus urophylla*.

3.3. INTRODUCCIÓN

Las hojas son el órgano aéreo más importante en las plantas, ya que su papel es determinante en actividades metabólicas e intercambio de gases (Lallana, 1999; Casierra *et al.*, 2007). En conjunto las hojas forman la biomasa foliar, parámetro estructural de las plantas que ayuda a caracterizar el desarrollo de la cubierta forestal (Martínez *et al.*, 1996) y la respuesta a los factores ambientales que determinan la condición del sitio como la radiación solar, la temperatura, el CO₂, la disponibilidad de agua y nutrientes en el suelo (Gadow *et al.*, 2007).

El área foliar es la superficie donde se intercambia energía y materia entre la planta y la atmosfera. Se considera una variable clave en los procesos fisiológicos encargados de la captación de luz, la fotosíntesis, la respiración y la transpiración, los cuales en conjunto regulan el crecimiento de los árboles (Perry *et al.*, 1988; Eriksson *et al.*, 2005). Debido a su importancia se han desarrollado índices para monitorear su dinámica (Lallana, 1999). Destaca el índice de área foliar (IAF, m² m⁻²) definido como el cociente entre el área total de un lado de las hojas presentes por unidad de superficie (m²) (Chen y Black, 1991). El IAF es considerado la variable biofísica fundamental para el monitoreo y modelación de las condiciones del bosque y su crecimiento (Coops *et al.*, 2004; Velasco *et al.*, 2010). Es uno de los parámetros más utilizados como indicador de la productividad de ecosistemas y plantaciones forestales (Papamija y García, 2012), además de ser empleado para evaluar el desarrollo de cultivos (Lang, 1987).

Los métodos para estimar el IAF son de tipo directo o indirecto. Los primeros requieren de muestreo destructivo e implican la medición directa del follaje del árbol, este método es costoso y de lenta aplicación (Lallana, 1999; Muñoz *et al.*, 2008; Cabezas-Gutiérrez *et al.*, 2009; Ledesma *et al.*, 2010), limitando su uso a gran escala. Los métodos indirectos pueden basarse en la recolección de hojarasca durante un periodo de tiempo (Eriksson *et al.*, 2005; Liu *et al.*, 2015) o en la medición de la radiación solar que penetra al piso forestal a través del dosel de

los árboles (Perry *et al.*, 1988). Los métodos indirectos son una alternativa fiable para la medición del IAF en diferentes tipos de vegetación (Martínez *et al.*, 2006). Sin embargo, su uso presenta problemas de estimación en cierto tipo de vegetación, por ello es frecuente que se recurra al uso de métodos mixtos (combinación de métodos directos e indirectos), empleando relaciones alométricas y mediciones ópticas (Martínez *et al.*, 1996). Lo anterior para facilitar la medición del IAF una vez que el método óptico es calibrado con datos provenientes de un método de medición directo. Por tal motivo el objetivo fue calcular el índice de área foliar mediante métodos directos e indirectos en plantaciones forestales comerciales de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake en Huimanguillo, Tabasco, México.

3.4. MATERIALES Y MÉTODOS

3.4.1. Área de estudio

El estudio se realizó en plantaciones forestales comerciales (PFC) de *E. urophylla* del municipio de Huimanguillo, Tabasco (17° 55' N, 94° 06' O y altitud promedio de 30 m) (Figura 3.1). El clima es cálido húmedo (Am), con lluvias abundantes en verano, precipitación media anual de 2,500 mm y temperatura media anual alrededor de 26 °C. Los suelos en los que se desarrollan son de tipo Phaeozem (INEGI, 2005). La vegetación circundante en la zona son relictos de selva alta perennifolia y vegetación secundaria (CONAFOR, 2012).

Las plantaciones presentan edades de crecimiento entre 1 y 7 años. Se establecieron con espaciamientos de 2×3 o de 2.5×3.5 m entre plantas e hileras y la densidad promedio calculada con el inventario es de 961 árboles ha⁻¹. Las plantas establecidas son clones mejorados de *E. urophylla*.



Figura 3.1. Ubicación geográfica de las plantaciones forestales comerciales de *E. urophylla*, establecidas en Huimanguillo, Tabasco, México.

3.4.2. Levantamiento de información en campo

Se diseñó un sistema de muestreo aleatorio conformado de 28 sitios rectangulares de 500 m², ubicando cuatro sitios por edad de plantación. Se realizaron mediciones en julio de 2014 (inicio del estudio) y agosto de 2015 (final del estudio) registrando las variables diámetro normal (Dn) y altura total (At) de todos los individuos. En cada uno de los sitios de muestreo se estimó mensualmente el IAF mediante los métodos indirectos de hojarasca caída y fotografía hemisférica; para el IAF por el método directo se realizó con datos de una muestra de árboles derribados para tal fin.

La estimación directa del IAF implicó el muestreo destructivo (derribo) de 93 árboles seleccionados de plantaciones de siete edades (1 a 7 años). Según Jonckheere *et al.* (2004) la muestra obtenida es representativa para estimar el Área Foliar Específica (AFE, m² kg⁻¹) y el Área Foliar Proyectada (AFP, m²) en rodales homogéneos, las cuales son la base para el cálculo del IAF. Asimismo se obtuvo el peso total del follaje verde de cada árbol derribado. Posteriormente, se registró el peso del follaje verde por tercio de la copa para una submuestra de 13 árboles. A cada árbol derribado se le midió el diámetro del tocón (Dt), el diámetro normal,

la altura del fuste limpio (Afl) y la altura total. Con estos datos se generaron ecuaciones alométricas para estimar el AFE y AFP. Tomando como base la relación alométrica existente entre la superficie foliar y el peso seco de las hojas (Martínez *et al.*, 1996) se extrajo una submuestra de follaje (0.5 kg) de la copa para cada árbol derribado, la cual se deshidrató en estufa a 70 °C. Posteriormente se determinó el peso seco de las submuestras en una báscula de precisión (0.001 g). La relación de peso verde por unidad de peso seco permitió obtener la biomasa foliar seca total del árbol (BFS_{Total}).

Para el método "hojarasca caída" se establecieron cuatro trampas de captura de 1 m² de superficie de colecta por sitio, 16 por plantación de cada edad. Las mediciones de la hojarasca caída en las 112 trampas establecidas se realizaron mensualmente, de agosto de 2014 a julio de 2015, abarcando las cuatro estaciones del año. La hojarasca recolectada se secó en estufa a 70 °C, por 72 horas, para evitar su descomposición y obtener posteriormente su peso seco constante (g).

La estimación del IAF mediante fotografía hemisférica (FH) se realizó en acuerdo al tamaño mínimo de muestra definido por Whitford *et al.* (1995). Los sitios de muestreo se dividieron en cuatro secciones, tomando una FH en cada sección y una más en el centro del sitio. Se utilizó un lente de 5 mm tipo "ojo de pescado" montado en una cámara Nikon Coolpix D3100 colocada sobre un trípode, orientada al norte magnético y nivelada en cada toma. La muestra mensual fue de 140 FH, mismas que fueron analizadas con la aplicación Hemisfer ©Patrick Schleppe versión 2.13.

3.4.3. Estimación del área foliar específica (AFE)

El AFE se estimó para el árbol completo y para cada tercio de la copa mediante el cálculo aritmético empleado por Barrantes y Gracia (1989), Cano *et al.* (1996), Martínez *et al.* (1996) y Muñoz *et al.* (2008). Para ello se utilizó una submuestra de 60 hojas de la muestra de follaje

colectada de cada árbol derribado. El área foliar (m^2) adaxial de cada hoja se midió con un integrador foliar (LI-COR 3000C), posteriormente se secaron y se pesaron para obtener el peso seco de la hoja (kg). Con la razón área foliar/biomasa foliar seca expresada en la Fórmula 3.1 se obtuvo el $AFE_{Individual}$ de cada submuestra representativa de un árbol, valor que representa la cantidad de área foliar por unidad de biomasa seca foliar en el árbol:

$$AFE_{Individual} = \frac{\sum AF_{Muestra}}{\sum BFS_{Muestra}} \quad (3.1).$$

Dónde: $AFE_{Individual}$ = área foliar específica ($m^2 \text{ kg}^{-1}$) por árbol, $AF_{Muestra}$ = área foliar de las hojas medidas de la muestra (m^2) y $BFS_{Muestra}$ = biomasa foliar seca de la muestra (kg).

La copa del árbol es una estructura dinámica que cambia la distribución espacial de sus hojas conforme envejece y por la competencia con otros árboles dentro del rodal, por ello existen diferencias morfológicas entre las hojas de la base y la sección superior de la copa (Gadow *et al.*, 2007). Con base en este supuesto, para una submuestra de 13 árboles se estimó el AFE considerando como unidad independiente el tercio de la copa. La submuestra de hojas se extrajo de cada tercio y se clasificaron en sección inferior, media y superior.

3.4.4. Estimación del área foliar proyectada (AFP)

El AFP total del árbol se obtuvo del producto del $AFE_{Individual}$ por la biomasa foliar seca (Fórmula 3.2). La biomasa foliar seca se estimó con la metodología reportada por Muñoz *et al.* (2008), multiplicando el peso foliar verde por la razón peso seco de las hojas/peso verde de hojas de la muestra de follaje obtenida por árbol derribado (Fórmula 3.3).

$$AFP_{Individual} = AFE_{Individual} * BFS_{Total} \quad (3.2)$$

$$BFS_{Total} = PFV_{Individual} * R_{Muestra} \quad (3.3)$$

Dónde: $AFP_{Individual}$ = área foliar proyectada (m^2) por árbol, $AFE_{Individual}$ = área foliar específica del árbol ($m^2 kg^{-1}$), BFS_{Total} = biomasa foliar seca total por árbol (kg), $PFV_{Individual}$ = peso foliar verde total del árbol (kg) y $R_{Muestra}$ = razón de peso seco y peso verde.

3.4.5. Estimación del índice de área foliar

El IAF se estimó con tres métodos: (1) destructivo utilizando relaciones alométricas, (2) hojarasca caída empleando trampas de muestreo y (3) método óptico con fotografías hemisféricas. Para el primer método, inicialmente se calculó la BFS_{Total} para cada árbol presente en los sitios de muestreo con las ecuaciones reportadas por Hernández-Ramos *et al.* (2016) para la especie en la zona. Posteriormente se calculó el $AFP_{Individual}$ a partir de relaciones alométricas, según se detalla en el apartado anterior de este escrito. Finalmente, las dos estimaciones anteriores permitieron obtener el $IAF_{Alométrico}$ (Fórmula 3.4) a nivel sitio para dos fechas (julio de 2014 y agosto de 2015).

$$IAF_{Alométrico} = \frac{\sum_{i=1}^n AFP_{Individual}}{AS} \quad (3.4)$$

Dónde: $IAF_{Alométrico}$ = índice de área foliar calculado mediante relaciones alométricas por sitio, $AFP_{Individual}$ = área foliar proyectada estimada por árbol y AS = superficie de muestreo.

La estimación del IAF para cada sitio de muestreo mediante el método de hojarasca caída consistió en calcular el $IAF_{Hojarasca}$ como el producto de la hojarasca total acumulada durante un año en una trampa por el promedio del $AFE_{Individual}$ para una plantación de la misma edad. El $IAF_{Hojarasca}$ por sitio se obtuvo con el promedio de los valores de las cuatro trampas colocadas en el sitio. Esta metodología fue adaptada y aplicada por Liu *et al.* (2015) para especies de hoja perenne.

El índice de área foliar por el método óptico ($IAF_{\text{Óptico}}$) se calculó mediante el análisis de las FH tomadas en cada sitio. Cada fotografía se procesó según el método de Lang (1987) y se obtuvo el promedio de las cinco FH del sitio. El método de Lang estima el IAF utilizando un modelo de regresión que integra el ángulo de inserción de la hoja y la radiación solar bajo el dosel (Lang y Yueqin, 1986) y la metodología de Thimonier *et al.* (2010) resultado de una ponderación de las estimaciones realizadas por LiCor LAI-2000 y Elipsoidal de Norman y Campbell. Al resultado del proceso anterior se le aplicó un factor de corrección por agrupamiento del dosel y follaje no distribuido al azar, generando una estimación precisa de brotes aglutinados (Chen y Cihlar, 1995; Liu *et al.*, 2015). Dado que el método óptico considera la fracción de cielo ocupada por la vegetación en una sola dirección, correspondiente a la toma de la fotografía, es común que los cálculos subestimen los valores reales de IAF (Weiss *et al.*, 2004). Para reducir este sesgo se aplicó la calibración propuesta por Aguirre-Salado *et al.* (2011), la cual consiste en estimar el grado de asociación del $IAF_{\text{Óptico}}$ con el $IAF_{\text{Alométrico}}$ o $IAF_{\text{Hojarasca}}$ mediante técnicas de regresión.

3.4.6. Análisis estadístico

Los valores de $AFE_{\text{Individual}}$ y $AFP_{\text{Individual}}$, obtenidos a partir de los datos del muestreo destructivo y de la aplicación de las ecuaciones ajustadas por Hernández-Ramos *et al.* (2016), se analizaron mediante un ANDEVA considerando como factor primario la edad de plantación y el tercio de la copa para la submuestra de 13 árboles. Las diferencias entre medias se evaluaron con la prueba estadística paramétrica de Tukey. Posteriormente se aplicó un análisis de correlación de *Pearson* entre el AFP, el AFE y las variables Dn, At, área basal (Ab), volumen total (Vt) y biomasa foliar seca total (BFS_{Total}). Las variables correlacionadas en mayor grado con el AFP y el AFE sirvieron de base para ajustar modelos específicos de regresión lineal simple, múltiple y mediante la técnica estadística *Stepwise*, misma que permite discriminar

variables sin aporte dentro del modelo (Volke, 2008) (Cuadro 3.1). Los modelos ajustados se eligieron de la literatura por haber mostrado una adecuada estimación en trabajos semejantes.

Cuadro 3.1. Modelos ajustados para estimar el área foliar específica (AFE) y área foliar proyectada (AFP) en plantaciones comerciales de *E. urophylla* en Huimanguillo, Tabasco, México.

No.	Tipo de modelo	Estructura
1	Stepwise	$\gamma = \beta_0 + \beta_1 \chi_1^1 + \dots + \beta_n \chi_n^n$
2	Lineal con intercepto	$\gamma = \beta_0 + \beta_1 \chi_1$
3	Lineal sin intercepto	$\gamma = \beta_1 \chi_1$
4	Chapman-Richards	$\gamma = \beta_0 (1 - e^{(-\beta_1 * \chi_1)})^{\beta_2}$
5	Monserud y Sterba	$\gamma = \chi_1 e^{(\beta_0 * \chi_1^{\beta_1} * \chi_2)}$
6	Potencia	$\gamma = \beta_0 \chi_1^{\beta_1}$
7	Schumacher Cobb-Webb	$\gamma = \beta_0 \chi_1^{\beta_1} \chi^{\beta_2}$
8	Schumacher exponencial	$\gamma = \beta_0 e^{(-\beta_1 / \chi_1)}$

γ : variable dependiente (AFE, AFP); χ_n : variable independiente; B_n : parámetros del modelo.

El índice de área foliar ajustado (IAF_{Ajustado}) se generó ajustando modelos de regresión (Cuadro 3.1) en los cuales el IAF_{Alométrico} ó IAF_{Hojarasca} son variables dependientes y el IAF_{Óptico} es la variable independiente. Los valores de IAF estimados mediante los tres métodos expuestos se compararon gráficamente, mediante un análisis de correlación y un análisis de varianza para observar diferencias.

El modelo seleccionado para estimar IAF es el que presentó los valores mayores del estadístico R^2_{aju} y el valor menor de la raíz del error cuadrático medio (RECM), además de significancia en sus parámetros. El ajuste de los modelos de regresión se realizó con el procedimiento *PROC MODEL* de SAS 9.4 Institute Inc.

3.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los árboles derribados para su medición y cálculo del IAF por el método directo se encontraban en un intervalo de diámetro normal de 7.8 a 33.2 cm y en un intervalo de altura total entre 8.54 a 33.3 m. Los valores promedio de las variables medidas a la muestra de árboles se resumen en el Cuadro 3.2.

Cuadro 3.2. Número de árboles por edad y valores dasométricos promedio de los árboles derribados de *E. urophylla* para estimar su índice de área foliar (IAF).

Edad	No. Árboles	Dn (cm)	Afl (m)	At (m)	Ab (m ²)	Vt (m ³)
1	15	9.7	1.1	10.5	0.0074	0.0398
2	13	15.6	4.4	15.2	0.0193	0.1289
3	12	14.9	13.5	20.6	0.0177	0.1974
4	12	15.0	14.9	20.4	0.0178	0.1716
5	10	18.6	14.1	20.6	0.0286	0.2294
6	17	19.0	18.8	26.6	0.0288	0.3432
7	14	27.7	22.4	32.0	0.0606	0.7199

Dn: diámetro normal; Afl: altura de fuste limpio; At: altura total; Ab: área basal; Vt: volumen total.

3.5.1. Área foliar específica (AFE) y área foliar proyectada (AFP)

El valor promedio de $AFE_{Individual}$ y $AFP_{Individual}$ fue de 8.024 m² kg⁻¹ y 35.995 m², respectivamente, para todos los árboles muestreados de 1 a 7 años de edad. Ambas variables

mostraron diferencias significativas ($p = 0.0001$) entre los promedios de los árboles con diferente edad (Figura 3.2) y entre porciones (tercio) de la copa. La comparación de medias mostraron un valor mayor de AFE ($8.56 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$) en la plantación de un año de edad, en contraste, la plantación de cuatro años arrojó el valor menor ($7.36 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$). Para el AFP por árbol el valor mayor lo presentó la plantación de siete años (52.23 m^2), el valor menor (14.18 m^2) se calculó para las plantaciones cuatro años, coincidiendo en edad con el valor menor de AFE.

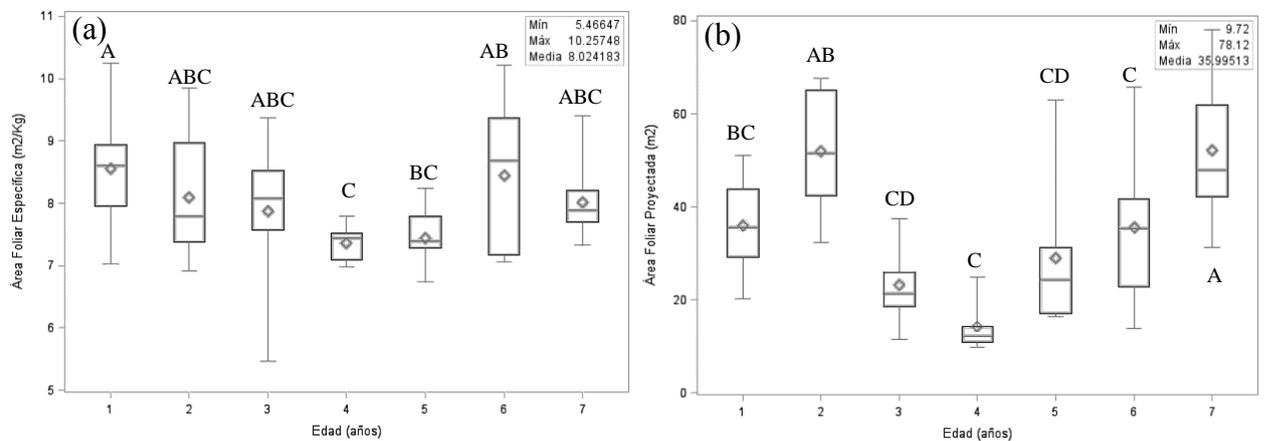


Figura 3.2. Promedios del (a) área foliar específica ($\text{m}^2 \text{ kg}^{-1}$) y (b) área foliar proyectada (m^2) con respecto a las edades de plantación. Letras diferentes indican diferencia en la comparación de medias.

La Figura 3.2a muestra la tendencia donde el AFE decrece a medida que aumenta la edad, esta disminución se presenta en la edad de 4, 5 y 7 años con respecto a edades jóvenes de 1, 2 y 3 años, donde los valores son más altos (excepto en la edad de 6 años). Otras especies presentan tendencia semejante, por ejemplo, *Pinus patula* mostró una reducción de 6 % al pasar de 1 a 2 años edad, lo cual fue atribuido al aumento de componentes estructurales y sustancias en el follaje de mayor edad haciéndolo más pesado (Cano *et al.*, 1996). Los valores altos de AFE obtenidos en este estudio oscilaron entre 7.36 y $8.56 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$, lo cual puede relacionarse a la alta densidad inicial de las plantaciones ($1,367$ árboles ha^{-1}). Estos valores altos de AFE

reflejan una estrategia de producción de hojas de tamaño mayor por parte de los árboles con copas reducidas, permitiendo captar mayor radiación solar para incrementar la tasa fotosintética, además de indicar un rápido crecimiento de la especie. Muñoz *et al.* (2008) reportaron valores de AFE de 3.74 a 4.60 m² kg⁻¹ en plantaciones de *E. nitens*, indicando que el AFE no presenta variación al cambiar la edad y densidad de las plantaciones, no obstante, presenta valores altos en plantaciones con densidades mayores.

El AFP aumenta en plantaciones con mayor edad (6 y 7 años), lo que se explica por las dimensiones mayores de los árboles y por consiguiente una mayor amplitud de copa. En general, las plantaciones de 4 y 5 años de edad presentaron los valores más bajos de AFE y AFP, atribuyéndolo a las diferencias clonales de los árboles y a la respuesta de estos a la suspensión de actividades de control de malezas y fertilización al tercer año después del establecimiento de la plantación. Además, es sabido que la cantidad de materia orgánica en el suelo influye directamente en el desarrollo de las plantaciones (Delgado-Caballero *et al.*, 2009) y esta es mayor en plantaciones longevas, generando una mayor reincorporación de nutrientes al suelo.

La diferencia entre los tercios de la copa del árbol fue significativa para la parte superior (hojas expuestas a mayor radiación solar) con respecto a los tercios intermedio e inferior, mostrando una tendencia decreciente del AFE conforme disminuye la altura de los árboles (Cuadro 3.3). Lo anterior puede explicarse por las variaciones de la radiación solar en los diferentes estratos del follaje, reduciéndose la intensidad en el tercio inferior de la copa (Cano *et al.*, 1996; Gadow *et al.*, 2007), así como por las adaptaciones al ambiente y a cambios ontogénicos de los individuos (Vega *et al.*, 2010). Sin embargo, en otras especies el valor menor de AFE se presenta en la parte superior de la copa, lo cual ha sido explicado y se debe a la mayor acumulación de fotosintatos producto de una tasa alta de fotosíntesis, lo que hace más

pesadas las hojas de esa parte de la copa (Barrantes y Gracia, 1989; Cano *et al.*, 1996; Muñoz *et al.*, 2008).

Cuadro 3.3. Área foliar específica ($\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$) promedio por tercio del árbol en plantaciones de *E. urophylla* de 1 a 7 años de edad en Huimanguillo, Tabasco, México.

Área foliar específica				
Edad (años)	Tercio			Media
	Inferior	Intermedio	Superior	
1	8.910 (a)	8.874 (a)	9.410 (a)	9.065
2	7.989 (a)	7.608 (ab)	7.080 (b)	7.559
3	7.201 (c)	8.070 (b)	8.717 (a)	7.996
4	6.066 (c)	6.312 (b)	6.960 (a)	6.446
5	6.037 (b)	6.206 (b)	7.628 (a)	6.624
6	9.715 (a)	8.329 (b)	8.468 (b)	8.837
Media/tercio	7.653 (B)	7.567 (B)	8.044 (A)	7.754

a, b y c: comparación entre tercios por edad; A y B: comparación de tercio englobando las edades, medias con letra diferente por fila son estadísticamente diferentes.

Los valores más bajos de AFE encontrados en el tercio medio de la copa indican que en promedio esta porción de la copa presenta mayor actividad fotosintética, debido a que se concentran hojas gruesas con mayor acumulación de tejidos para la fotosíntesis y mayor penetración de radiación hacia este tercio. Estas hojas tienden a ser más eficientes en el aprovechamiento de la radiación fotosintéticamente activa. En plantaciones jóvenes el cierre de copas aún no se presenta, lo que ocasiona que el tercio intermedio sea el más productivo. En plantaciones de edad mayor se presenta el cierre de copas, lo que genera valores menores de AFE en los tercios intermedio y superior de la copa demostrando una mayor producción. Lo

anterior se atribuye a una máxima temperatura en la zona intermedia y superior de la copa, causado por una mayor radiación solar (Gadow *et al.*, 2007), lo que ocasiona variaciones morfológicas del follaje (Cano *et al.*, 1996).

Las hojas de la parte superior de la copa, en teoría, deberían ser las más productivas debido a su mayor exposición a la luz solar, no obstante, estas son jóvenes e inmaduras, lo que las hace menos productivas. *E. urophylla* es una especie de crecimiento rápido que presenta una rotación acelerada de follaje, lo que causa que las hojas del tercio superior alcancen su máxima producción hasta formar parte del tercio medio en un lapso de un año.

Los resultados de correlación entre AFE, AFP y las variables dasométricas son bajos. La correlación del AFE es negativa y no significativa considerándose baja, por ello no se ajustaron modelos de regresión. Para el AFP las variables con mayor relación son la biomasa foliar seca total (BFS_{Total}) (0.97), seguido por el Ab (0.52), Dn (0.50) y At (0.25), además de una correlación positiva indicando la presencia de mayor follaje a medida que las dimensiones del árbol aumentan, sobre todo en amplitud del diámetro normal y en consecuencia el diámetro de copa, esto demuestra que las variables dasométricas del fuste tienen una influencia alta en la cantidad de follaje. Considerando las variables que mostraron mayor correlación (BFS_{Total} , Dn y At) se ajustaron siete modelos de regresión y uno más creado mediante Stepwise para estimar el AFP de los árboles (Cuadro 3.4).

Cuadro 3.4. Estadísticos de ajuste y valores de los parámetros estructurales de los ocho modelos analizados para estimar el área foliar proyectada.

Modelo	RECM	R^2_{aju}	Parámetro	Estimador	EE	Valor t	Pr > t
1	4.25940	0.942	B_0	0.80199	1.11643	0.72	<.4748
			B_1	7.84152	0.22399	35.01	<.0001
2	4.2636	0.941	B_0	1.75815	1.5240	1.15	0.2524
			B_1	7.97306	0.2657	30.01	<.0001
			B_2	-0.08952	0.0970	-0.92	0.3591
3	4.2458	0.942	B_1	7.98642	0.0971	82.27	<.0001
4	4.2141	0.943	B_0	163.6677	78.6830	2.08	0.0410
			B_1	0.072823	0.0512	1.42	0.1591
			B_2	1.169669	0.1657	7.06	<.0001
5	8.1996	0.784	B_0	3.972913	0.8064	4.93	<.0001
			B_1	-1.14553	0.0731	-15.67	<.0001
6	4.2394	0.942	B_0	8.508989	0.4954	17.18	<.0001
			B_1	0.964571	0.0320	30.19	<.0001
7	4.2404	0.942	B_0	9.244596	0.9333	9.91	<.0001
			B_1	-0.03867	0.0389	-0.99	0.3238
			B_2	0.982786	0.0367	26.76	<.0001
8	5.2332	0.912	B_0	103.333	4.1930	24.64	<.0001
			B_1	4.322394	0.2083	20.75	<.0001

RECM: raíz del error cuadrático medio; R^2_{aju} : Coeficiente de determinación ajustado; EE: error estándar; B_n : parámetros del modelo.

Los modelos presentaron un excelente ajuste en la estimación del AFP, con valores altos de R^2_{aju} y bajos del RECM. Se encontró una relación alta entre el AFP y la biomasa foliar seca

total obteniendo un mejor ajuste de los modelos con presencia de esta variable. El modelo de Chapman-Richards (4) resultó con el mejor ajuste, no obstante el parámetro B_I no es significativo, descalificándolo para la predicción. Por lo tanto, se recurrió al modelo potencia que presenta valores altos de $R^2_{aju} = 0.942$, bajos de $RCME = 4.2394$ y sus parámetros altamente significativos. Además presentó estimaciones lógicas de AFP para los sitios bajo estudio.

Para corroborar la existencia de normalidad, al modelo seleccionado se le aplicó la prueba de Shapiro-Wilk resultando un valor 0.95, lo que confirmó la existencia de normalidad. La prueba de White indicó heterocedasticidad por lo que se realizó una corrección por ponderación de residuales del AFP para resolver el problema. Por último, la prueba de Durbin-Watson obtuvo un valor de 1.67 por lo cual demostró la inexistencia de autocorrelación del modelo, por lo que es estadísticamente estable y confiable al utilizarlo para la estimación del AFP en plantaciones comerciales de *E. urophylla*. El ajuste de la ecuación seleccionada ($AFP_{Individual} = 7.952315 * BFS_{Total}^{1.006678}$) y la tendencia de los datos observados y los estimados se presenta en la Figura 3.3.

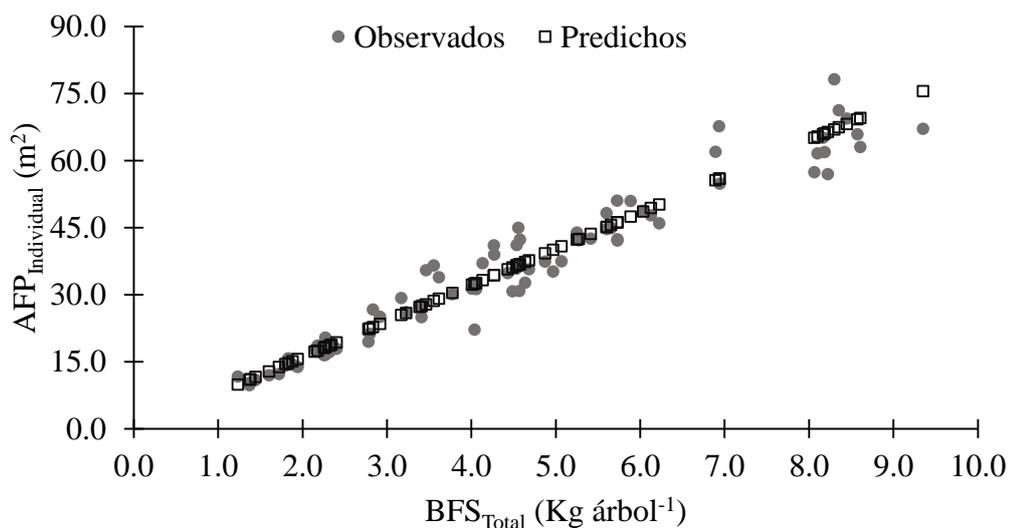


Figura 3.3. Valores observados y predichos del área foliar proyectada con el modelo 6.

$AFP_{Individual}$: área foliar proyectada individual; BFS_{Total} : Biomasa foliar seca total.

3.5.2. Índice de área foliar (IAF)

Para el método directo ($IAF_{Alométrico}$), indirectos ($IAF_{Óptico}$ e $IAF_{Hojarasca}$), respectivamente, los IAF promedio estimados son 2.7, 1.6 y 2.6 $m^2 m^{-2}$, dentro de los rangos 1.8 a 3.7, 1.0 a 2.6 y 1.3 a 4.2 $m^2 m^{-2}$. Se observaron diferencias significativas ($p = 0.0001$) entre plantaciones de diferente edad. El método directo estimó el valor mayor de IAF en las plantaciones de un año, el valor menor se registró para la edad de tres años (Figura 3.4). El resto de las plantaciones no mostraron diferencias. El $IAF_{Óptico}$ fue mayor a los 7 y 1 años de edad, el resto presentaron valores homogéneos menores a 1.7 $m^2 m^{-2}$. Los valores de IAF obtenidos mediante el método óptico se corrigieron según Chen y Cihlar (1995) y Leblanc y Chen (2001), mismo que fue aplicado por Liu *et al.* (2015) para cinco ecosistemas diferentes, con una corrección positiva del 12 % para bosques de hoja perenne. A pesar de la corrección, este método subestimó el IAF en comparación con el método directo.

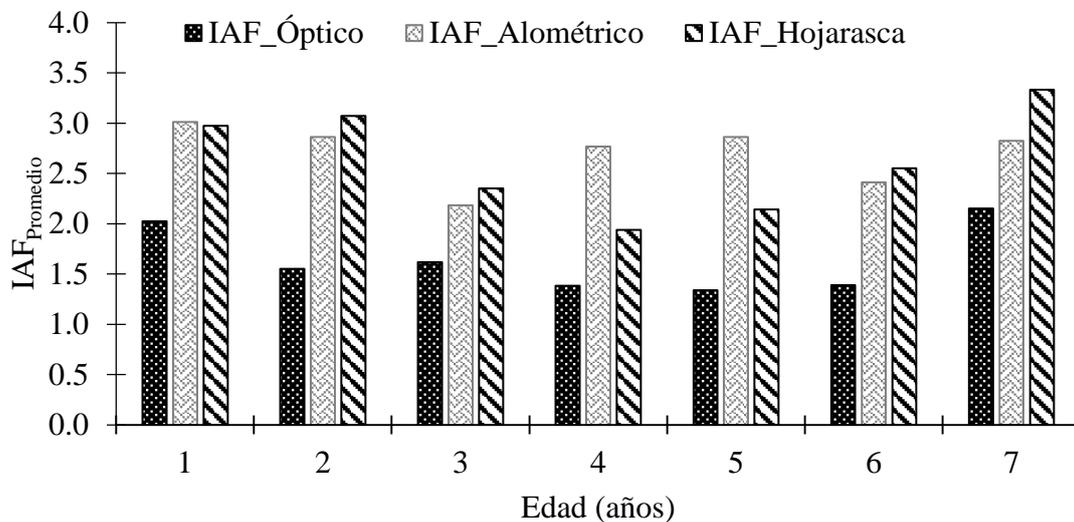


Figura 3.4. Índice de área foliar estimado por método directo (Alométrico) e indirectos (óptico y hojarasca) para las plantaciones de *E. urophylla*, en Huimanguillo, Tabasco, México.

Tomando como referencia los valores del $IAF_{Alométrico}$, el $IAF_{Óptico}$ presentó una subestimación promedio de 34 % y el $IAF_{Hojarasca}$ una sobreestimación del 20 % en las

plantaciones evaluadas. En referencia a errores de estimación, estos son menores utilizando la metodología de hojarasca caída (Cuadro 3.5). Por ellos se recomienda utilizar este método como valor real, debido a que presenta menor error de estimación sobre el método de FH. Además, registra la producción de hojas por m² en un cierto tiempo.

Cuadro 3.5. Comparación (diferencia porcentual) entre las estimaciones del índice de área foliar calculado por los métodos indirectos *versus* la metodología destructiva (IAF_{Alométrico}).

Método	Edad de plantación (años)						
	1	2	3	4	5	6	7
IAF _{Alométrico}	3.01	2.86	2.18	2.77	2.86	2.41	2.83
IAF _{Óptico}	2.03	1.55	1.62	1.38	1.34	1.39	2.15
	-37.5%	-39.1%	-13.1%	-46.2%	-48.9%	-27.7%	-24.1%
IAF _{Hojarasca}	3.18	3.11	2.31	1.78	1.99	2.69	3.34
	+16.7%	+14.1%	+8.1%	+36.2%	+27.2%	+20.3%	+17.5%

La correlación de los valores de IAF obtenidos mediante el método alométrico con la estimación óptica y caída de hojarasca es de 0.30 y 0.33 respectivamente, las cuales son inadecuadas para generar un modelo de regresión. Estas correlaciones bajas del IAF se han demostrado en diferentes estudios como en Chen y Cihlar (1995) para bosque boreal, Coops *et al.* (2004) en bosques naturales de *Eucalyptus*, Aguirre-Salado *et al.* (2011) en bosques templados de *Pinus patula* y Papamija y García (2012) en plantaciones de *E. nitens*. No obstante, se presenta una correlación considerablemente alta entre el IAF_{Óptico} e IAF_{Hojarasca} con valor de 0.75, con esta correlación y error menor de estimación del 20 % con respecto al IAF_{Alométrico} se ajustaron modelos para la calibración del IAF_{Hojarasca} (Cuadro 3.6). La época de medición del método destructivo correspondió al inicio de producción de hojas (junio), esto influyó en los resultados bajos del IAF_{Alométrico} en comparación al IAF_{Hojarasca}, este último es

más exacto debido a que su medición engloba un ciclo de crecimiento de *E. urophylla*. Por ello, se recomienda calibrarlo utilizando mediciones ópticas, las cuales son fáciles de obtener.

Cuadro 3.6. Estadísticos de ajuste y valores de los parámetros de los modelos con mejor ajuste para calibrar las estimaciones de índice de área foliar de *E. urophylla* en Huimanguillo, Tabasco, México.

IAF	Modelo	B_0	B_1	B_2	RECM	R^2_{aju}
Alométrico vs Hojarasca	Poli. 2°	3.3519	-0.80403	0.18321	0.375	0.09
Alométrico vs Óptico	2	2.177529	0.333489	---	0.409	0.074
Hojarasca vs Óptico	6	1.650636	0.956617	---	0.428	0.55

RECM: raíz del error cuadrático medio; R^2_{aju} : Coeficiente de determinación ajustado; B_n : parámetros de la ecuación.

Los modelos para calibrar el IAF tienen parámetros de ajuste bajos. El modelo 6 (Cuadro 3.6) presentó un ajuste razonable en la calibración del $IAF_{Hojarasca}$ con relación al $IAF_{Óptico}$. Estas dos técnicas pueden compararse a nivel sitio solo si la recolección y las fotografías fueron evaluadas sin diferencia espacial (Thimonier *et al.*, 2010) (Figura 3.5), como es el caso en este estudio. El modelo seleccionado mostró normalidad con un estadístico de $W = 0.94$, la prueba de White indicó homocedasticidad y el estadístico de Durbin-Watson fue de 1.78, indicando que no existe autocorrelación entre variables.

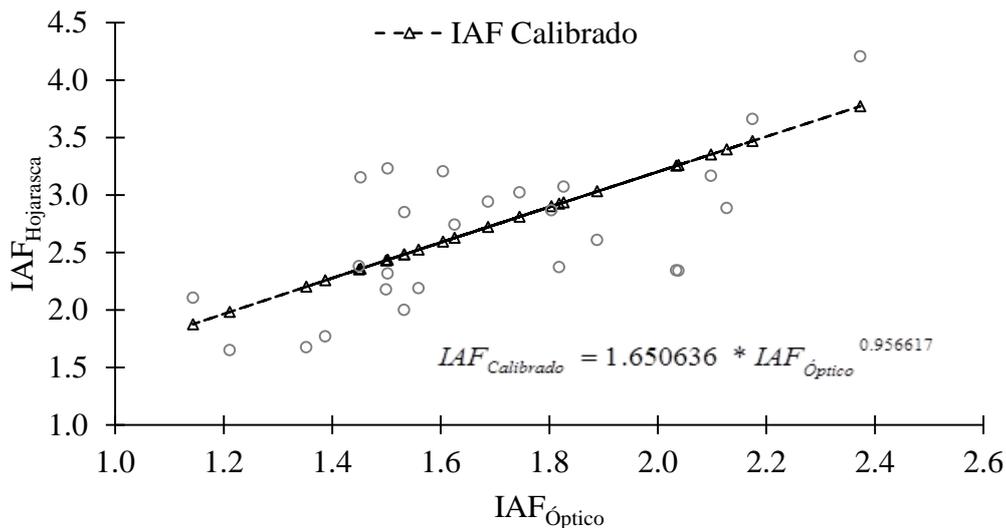


Figura 3.5. Diagrama de dispersión del IAF, datos reales y estimados con los métodos caída de hojarasca y óptico para estimar el $IAF_{Calibrado}$ en plantaciones de *E. urophylla* en Huimanguillo, Tabasco, México.

Los valores de IAF reportados son similares a los estimados para plantaciones de *E. nitens* en la Zona Central de Chile, con valores que oscilan entre 1.63 y 2.55 $m^2 m^{-2}$ para densidades de 1,100 árboles ha^{-1} , valores bajos con respecto a plantaciones con menor densidad ocasionado por la competencia por espacio entre los árboles para el desarrollo de la copa (Muñoz *et al.*, 2008). Papamija y García (2012) reportaron valores de IAF de 2.30 a 3.20 $m^2 m^{-2}$ para plantaciones de *E. grandis* en Colombia utilizando el método directo y valores mayores con la metodología de relaciones ópticas con 2.42 a 3.64 $m^2 m^{-2}$. Los coeficientes de correlación encontrados fueron bajos de $R^2 = 0.011$ y 0.053. Estos resultados difieren a lo encontrado en este estudio, donde el IAF mediante fotografías subestima el valor obtenido mediante alometría y concordando con los valores bajos de correlación.

Macfarlane *et al.* (2007) determinaron un IAF de 3.0 $m^2 m^{-2}$ para plantaciones de *E. marginata* de 12 años de edad mediante el método alométrico y 1.77 $m^2 m^{-2}$ con corrección por aglutinamiento de FH, lo que representa una subestimación de 17 a 27 %. Similarmente, Chen

y Cihlar (1995) determinaron subestimaciones del IAF en un intervalo de 15 a 25 % mediante el método óptico debido al aglutinamiento del follaje, por lo que recomendaron aplicar una corrección para reducir el error de la subestimación agregando un parámetro de índice de área de ramas. Esta variación en las estimaciones reducidas del IAF mediante métodos ópticos se debe a diversos factores como es la exposición automática del lente hacia la luz (Thimonier *et al.*, 2010), el efecto de aglutinamiento de las copas de los árboles (Martens *et al.*, 1993; Weiss *et al.*, 2004) y la elección subjetiva del umbral al momento de analizar las imágenes con cualquier programa (Coops *et al.*, 2004).

3.5.3. Dinámica de índice de área foliar

Los valores mensuales de IAF presentaron una relación negativa en cuanto a la caída de hojarasca, donde los picos máximos de recolección concuerdan con valores bajos de IAF en las plantaciones. Durante los meses de febrero a mayo se registra un aumento de caída de hojarasca y por consiguiente una disminución del IAF en *E. urophylla*, valores que oscilaron entre 2.14 a 2.20 m² m⁻² en la época de menor producción. En junio y julio se observa un aumento exponencial de IAF, siendo la época de máxima producción de hojas e inicio de la etapa de crecimiento, alcanzando su valor máximo de julio a septiembre con 2.65 a 2.71 m² m⁻². En noviembre se registra un valor bajo de IAF generado por un aumento de caída de hojarasca en octubre, no obstante, al mes siguiente se observa una recuperación foliar, indicando que durante la época de lluvias o de crecimiento *E. urophylla* presenta una reposición continua de follaje de acuerdo a la disponibilidad de agua (Figura 3.6).

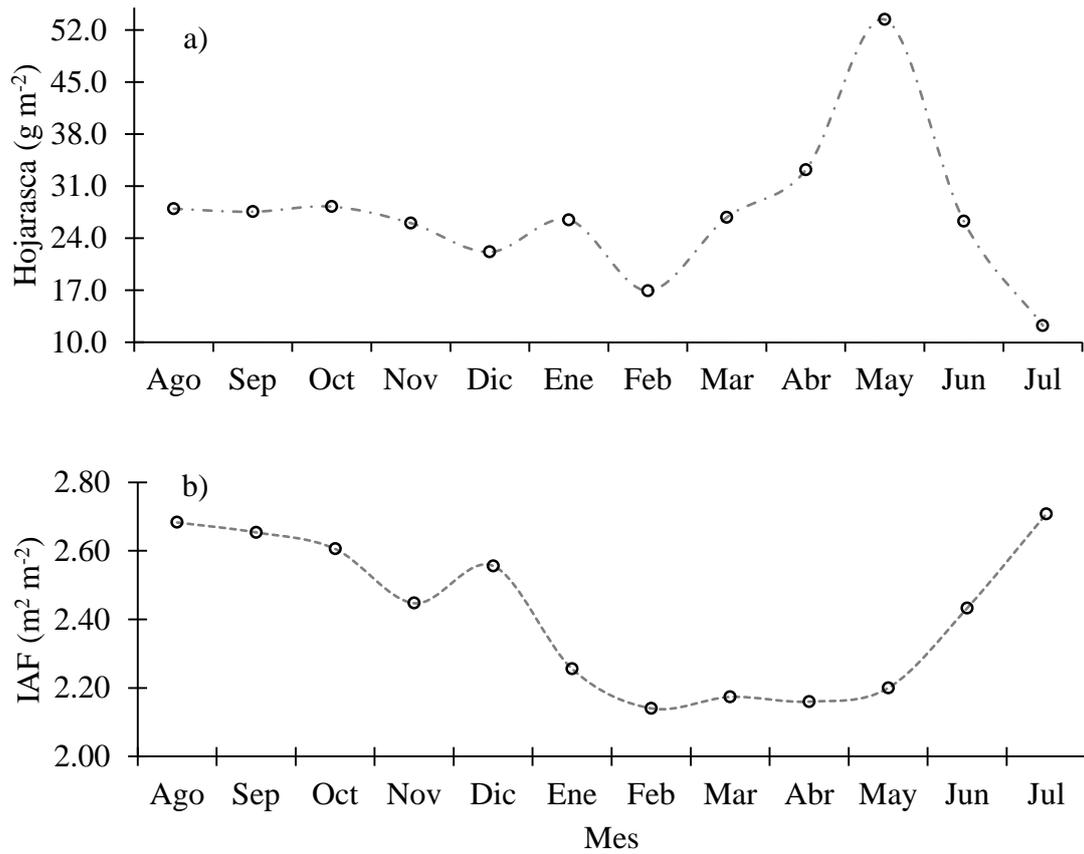


Figura 3.6. Comparación de la dinámica mensual de caída de hojarasca (a) e índice de área foliar calibrado (b) para las plantaciones de *E. urophylla* en Huimanguillo, Tabasco, México.

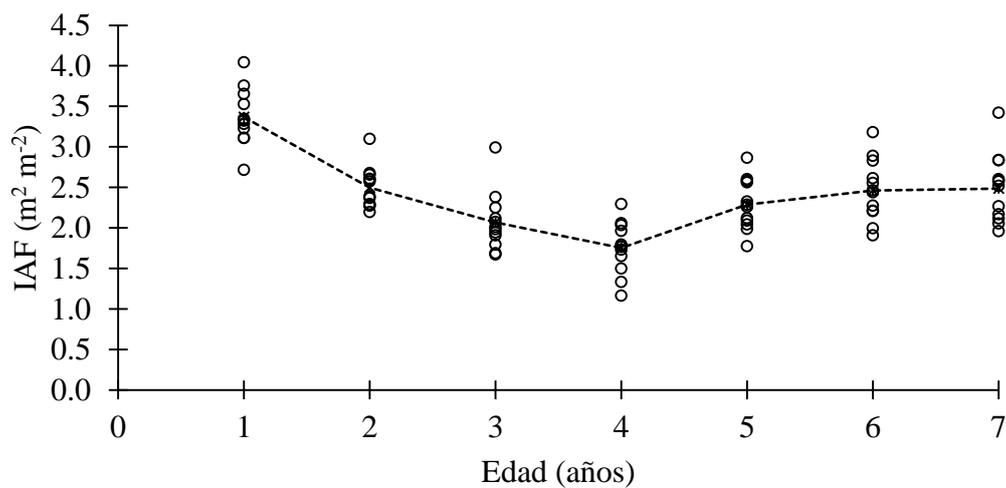


Figura 3.7. Índice de área foliar calibrado ($\text{IAF}_{\text{Calibrado}}$) mensual y promedio (línea discontinua) por edad de plantación para *E. urophylla* en Huimanguillo, Tabasco, México.

La teoría indica que a edad mayor de la plantación, el IAF debe ser alto, no obstante, para el caso estudiado el valor más alto de IAF se presenta en los primeros años después de establecida la plantación, disminuyendo a medida que aumenta la edad (Figura 3.7). Si consideramos lo mencionado por Peduzzi *et al.* (2010) respecto a que el IAF es un indicador de la productividad del terreno, los valores encontrados indican que las plantaciones evaluadas de 4 y 5 años son las que presentan menor producción al registrar los menores valores de IAF en comparación a las plantaciones de otras edades. Además, la mayor eficiencia de la fertilización, control de malezas y aclareos lo presentan las plantaciones jóvenes, que tienen mayor cantidad de follaje.

3.6. CONCLUSIONES

El índice de área foliar es una variable adecuada para el monitoreo de la respuesta que presentan las plantaciones forestales comerciales al manejo e implementación de prácticas complementarias, considerándolo como un indicador confiable de la productividad y desarrollo de las mismas.

El valor estimado de IAF para las plantaciones evaluadas depende del método de evaluación utilizado. Si consideramos como referencia los valores estimados por el método de estimación directa (IAF_{Alométrico}), los dos métodos indirectos utilizados (IAF_{Hojarasca}, IAF_{Óptico}) sobrestiman o subestiman el IAF promedio de las plantaciones.

El IAF_{Hojarasca}, sobrestima en 20 % el IAF en las plantaciones evaluadas. Contrariamente, el IAF_{Óptico} sobrestima en promedio 34 % el IAF. En referencia a los errores de estimación, son menores cuando se utiliza la metodología de captura de hojarasca y presenta mayor detalle de la dinámica de producción del IAF en las plantaciones de *E. urophylla*.

3.7. LITERATURA CITADA

- Aguirre-Salado, C. A., J. R. Valdez-Lazalde, G. Ángeles-Pérez, H. M. de los Santos-Posadas, y A. I. Aguirre-Salado. 2011. Mapeo del índice de área foliar y cobertura arbórea mediante fotografía hemisférica y datos Spot 5 HRG: Regresión y K-nn. *Agrociencia* 45: 105-119.
- Barrantes, O., y C. A. Gracia. 1989. Estimación del área foliar a partir de la superficie de albura en *Pinus sylvestris*. *Méditerranéennes: Série A. Séminaires Méditerranéens*, J. Bellot (ed) 3: 53-56.
- Cabezas-Gutiérrez, M., F. Peña, H. W. Duarte, J. F. Colorado, y R. L. Silva. 2009. Un modelo para la estimación del área foliar en tres especies forestales de forma no destructiva. *Revista U. D. C. A. Actualidad y Divulgación Científica* 12: 121-130.
- Cano M., E. E., A. Velázquez M., J. J. Vargas H., C. Rodríguez F., y A. M. Fierros G. 1996. Área foliar específica en *Pinus patula*: efecto del tamaño del árbol, edad del follaje y posición de la copa. *Agrociencia* 30: 117-122.
- Casierra P., F., G. R. Peña Z., y J. E. Peña-Olmos. 2007. Estimación indirecta del área foliar en *Fragaria vesca* L., *Physalis peruviana* L., *Acca sellowiana* (Berg.) Burret, *Rubus glaucus* L., *Passiflora mollissima* (Kunth) L. H. Bailey y *Ficus carica* L. *Revista U.D.C.A Actualidad y Divulgación científica* 11: 95-102.
- Chen, J. M., and J. Cihlar. 1995. Quantifying the effect of canopy architecture on optical measurements of leaf area index using two gap size analysis methods. *Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 33: 777-787.
- Chen, J. M., and T. A. Black. 1991. Measuring leaf area index of plant canopies with branch architecture. *Agricultural and forest meteorology* 57: 1- 12.
- CONAFOR. 2012. Situación actual y perspectivas de las plantaciones forestales comerciales en México. A. Velázquez M. (ed). 448 p.

- Coops, N. C., M. L. Smith, K. L. Jacobsen, M. Martin, and S. Ollinger. 2004. Estimation of plant and leaf area index using three techniques in a mature native eucalypt canopy. *Austral Ecology* 29: 332-341.
- Delgado-Caballero, C. E., A. Gómez-Guerrero, J. R. Valdez-Lazalde, H. M. De los Santos-Posadas, A. M. Fierros-González, y W. R. Horwath. 2009. Índice de sitio y propiedades del suelo en plantaciones jóvenes de *Eucalyptus grandis* y *E. urophylla* en el sureste de México. *Agrociencias* 43: 61-72.
- Eriksson, H., L. Eklundh, K. Hall, and A. Lindroth. 2005. Estimating LAI in deciduous forest stands. *Agricultural and forest meteorology* 129: 27-37.
- Gadow V., K., S. Sánchez O., y J. G. Álvarez G. 2007. Estructura y crecimiento del bosque. IUFRO World Series 12: 242 p.
- Hernández-Ramos, J., H. M. Santos-Posadas, J. R. Valdez-Lazalde, J. C. Tamarit-Urias, G. Ángeles-Pérez, A. Hernández-Ramos, y A. Peduzzi. 2016. Biomasa aérea y factores de expansión de biomasa en plantaciones forestales comerciales de *Eucalyptus urophylla*. Enviado para publicación.
- INEGI. 2005. Marco Geoestadístico Municipal 2005, versión 3.1. Disponible en <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/datos-geograficos/27/27008.pdf> (Consulta: agosto 2015).
- Jonckheere, I., S. Fleck, K. Nackaerts, B. Muys, P. Coppin, M. Weiss, and F. Baret. 2004. Review of methods for in situ leaf area index determination, Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology* 121: 19-35.
- Lallana, V. H. 1999. Medición del área foliar mediante escáner y software Idrisi. *Revista FAVE* 13: 27-33.
- Lang, A. R. G. 1987. Simplified estimate of leaf area index from transmittance of the sun's beam. *Agricultural and forest meteorology* 41: 179-186.

- Lang, A. R. G., and X. Yueqin. 1986. Estimation of leaf area index from transmission of direct sunlight in discontinuous canopies. *Agricultural and Forest Meteorology* 37: 229-243.
- Leblanc, S. G., and J. M. Chen. 2001. A practical scheme for correcting multiple scattering effects on optical LAI measurements. *Agricultural and Forest Meteorology* 110: 125-139.
- Ledesma, M., C. A. Carranza, y M. Balzarini. 2010. Estimación de la biomasa foliar de *Prosopis flexuosa* mediante relaciones alométricas. *Agriscientia* 27: 87-96.
- Liu, Z., G. Jin, and M. Zhou. 2015. Evaluation and correction of optically derived leaf area index in different temperate forests. *iForest: Biogeosciences and Forestry* (early view) 8 p.
- Macfarlane, C., M. Hoffman, D. Eamus, N. Kerp, S. Higginson, R. McMurtrie, and M. Adams. 2007. Estimation of leaf area index in eucalypt forest using digital photography. *Agricultural and Forest Meteorology* 143: 176-188.
- Martens, S. N., S. L. Ustin, and R. A. Rousseau. 1993. Estimation of tree canopy leaf area index by gap fraction analysis. *Forest Ecology and Management* 61: 91-108.
- Martínez F., J., J. Martínez F., M. A. Romero D., F. López B., y F. Belmonte S. 1996. Biomasa e índice de área foliar de *Rosmarinus officinalis* L. en matorral semiárido (Cuenca de Mula, Murcia). *Análisis de Biología Ambiental* 21: 83-92.
- Martínez, B., F. Camacho-Coca, y F. J. García-Haro. 2006. Estimación de parámetros biofísicos de vegetación utilizando el método de la cámara hemisférica. *Revista de Teledetección* 26: 5-17.
- Muñoz, F., M. Espinosa, J. Cancino, R. Rubilar, y M. Herrera. 2008. Efecto de la poda y raleo en el área foliar de *Eucalyptus nitens*. *Bosques* 29: 44-51.
- Papamija M., D., y C. García S. 2012. Estimación del índice de área foliar en plantaciones de *Eucalyptus grandis* W. Hill. *Colombia Forestal* 15: 261-271.

- Peduzzi, A., H. Lee A., and R. H. Wynne. 2010. Leaf area of overstory and understory in pine plantations in the flatwoods. *Southern Journal of Applied Forestry* 34: 154-160.
- Perry, S. G., A. B. Fraser, D. W. Thomson, and J. M. Norman. 1988. Indirect sensing of plant canopy structure with simple radiation measurements. *Agricultural and forest meteorology* 42: 255-278.
- Thimonier, A., I. Sedivy, and P. Schleppi. 2010. Estimating leaf area index in different types of mature forest stands in Switzerland: a comparison of methods. *European Journal of Forest Research* 129: 543-562.
- Vega, M., M. Pinazo, y S. Barth. 2010. Variación del área foliar específica en *Pinus elliottii* var. *Elliottii* Engelm. y *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Morelet. y su extrapolación al cálculo del área foliar proyectada. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Misiones, Argentina 8 p.
- Velasco L., S., O. Champo J., M. L. España B., y F. Baret. 2010. Estimación del índice de área foliar en la reserva de la biósfera mariposa monarca. *Revista Fitotecnia Mexicana* 33: 169-174.
- Volke H., V. 2008. Estimación de funciones de respuesta para información de tipo no experimental, mediante regresión. Primera edición. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México, México 113 p.
- Weiss, M., F. Baret, G. J. Smith, I. Jonckheere, and P. Coppin. 2004. Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. *Agricultural and Forest Meteorology* 121: 37-53.
- Whitford, K. R., I. J. Colquhoun, A. R. G. Lang, and B. M. Harper. 1995. Measuring leaf area index in a sparse eucalypt forest: a comparison of estimates from direct measurement, hemispherical photography, sunlight transmittance and allometric regression. *Agricultural and forest meteorology* 74: 237-249.

CAPÍTULO IV

4. ESTIMACIÓN DEL ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR Y BIOMASA AÉREA CON DATOS SPOT 7 Y LANDSAT 8 PARA *Eucalyptus urophylla* S.T. BLAKE

4.1. RESUMEN

Los datos espectrales de longitud de onda visible, del infrarrojo cercano y los índices de vegetación contenidos en las imágenes de satélite son útiles para la predicción de variables forestales, debido a la correlación alta entre estos y tales variables. El objetivo fue estimar el índice de área foliar y la biomasa total con datos espectrales de SPOT 7 y LANDSAT 8 para plantaciones forestales comerciales de *E. urophylla* S.T. Blake establecidas en Huimanguillo, Tabasco, México. Se comparó el inventario tradicional de las variables biomasa total (Bt) e índice de área foliar (IAF) con los métodos de regresión lineal múltiple, estimadores de razón y regresión, empleando las variables espectrales como predictoras de la Bt y el IAF. Las correlaciones más altas se presentaron con las bandas roja, verde y los índices de vegetación del sensor SPOT 7, para LANDSAT 8 no resultaron correlaciones significativas. Los estimadores de razón fueron los que presentaron valores más cercanos al inventario tradicional, sin embargo, en el mapeo resultó con errores de predicción más altos. Por ello se eligió el modelo de regresión lineal múltiple para la predicción y mapeo de la Bt y el IAF, que presenta el RECM más bajo.

Palabras clave: percepción remota, mapeo, plantaciones forestales comerciales.

LEAF AREA INDEX AND ABOVEGROUND BIOMASS ESTIMATION WITH DATA SPOT 7 AND LANDSAT 8 FOR *Eucalyptus urophylla* S.T. BLAKE

4.2. ABSTRACT

The spectral data of visible wavelength, near infrared and vegetation indices contained in the satellite images are useful to predict forest variables due to the high correlation among them. The objective was to estimate total biomass and leaf area index for commercial plantations of *E. urophylla* S.T. Blake established in Huimanguillo, Tabasco, Mexico using SPOT 7 and LANDSAT 8 spectral data. Estimates of total biomass variables (tB) and leaf area index (LAI) obtained through a traditional field sampling inventory were compared with estimates obtained through multiple linear regression methods, and ratio and regression estimators, using the spectral variables as predictors of tB and LAI. The highest correlations found were associated to the red and green bands, and with the vegetation indices of the SPOT 7 sensor, spectral data from LANDSAT 8 were found not significant. The ratio estimators had values nearest to traditional inventory, however, in the mapping it resulted with high prediction errors. Therefore, a multiple linear regression model was chosen to predict and map tB and LAI, with the lowest RCME.

Keywords: remote sensing, mapping, commercial forest plantations.

4.3. INTRODUCCIÓN

El aumento en la superficie de plantaciones forestales comerciales (PFC) ha contribuido a disminuir la presión en los bosques naturales (FAO, 2006), ofertando parte de la materia prima forestal que se demanda en el mundo, lo que representa una alternativa de producción económica y social (Alice *et al.*, 2004; FAO, 2015). Sin embargo, para un manejo adecuado de las PFC se requiere del conocimiento continuo de la dinámica de crecimiento de las variables forestales (Muñoz-Ruíz *et al.*, 2014), principalmente el índice de área foliar (IAF), debido a que controla diversos procesos de intercambio de materia y energía en los ecosistemas (Aguirre-Salado *et al.*, 2011).

Existen diversos métodos directos para estimar variables forestales de interés, los cuales requieren de gran inversión económica y de tiempo, por lo que son de utilidad limitada para aplicarse a gran escala para evaluar de manera confiable los recursos (Valdez-Lazalde *et al.*, 2006; Cruz-Leyva *et al.*, 2010; Velasco *et al.*, 2010). El inventario forestal basado en muestreo en campo es el método principal utilizado para la cuantificación de las variables a una escala local (Muñoz-Ruiz *et al.*, 2014), pero resulta impráctico cuando se requiere caracterizar la distribución espacial de las variables en una superficie mayor.

La percepción remota funciona como un método alternativo, mas eficiente, para el seguimiento espacio temporal de las condiciones de la vegetación, aprovechando la correlación alta que existe entre la información espectral capturada en imágenes satelitales y lo que se puede caracterizar espacialmente en un paisaje dado (Gonsamo, 2009; Muñoz-Ruiz *et al.*, 2014; Yépez y Lozano, 2014). Además podría reducir significativamente los costos del inventario (Peduzzi *et al.*, 2010).

Las imágenes de satélite porporcionan información espectral continua de áreas extensas con diversas resoluciones espaciales, que han evolucionando con el tiempo para presentar mejor

detalle de la vegetación (Valdez-Lazalde *et al.*, 2006; Salas *et al.*, 2010). La relación entre los datos espectrales y las variables forestales puede ser representada matemáticamente, mediante métodos paramétricos como el análisis de regresión lineal múltiple y de efectos mixtos, para predecir las variables forestales con base en valores espectrales (Salas *et al.*, 2010). Alternativamente se pueden utilizar modelos no paramétricos, destacando el K-vecino más cercano (K-*nn*) sustentado en la interpolación de los valores más cercanos y similares. También es posible modelar los datos mediante estimadores de razón y regresión, utilizando como variable auxiliar los datos espectrales de alguna banda o índice de vegetación con relación significativa entre las variables forestales (Hall *et al.*, 2006; Muñoz-Ruiz *et al.*, 2014).

El número creciente de sensores remotos (plataformas satelitales) ha requerido de evaluar su eficiencia para predecir las variables forestales (Soudani *et al.*, 2006). Además, considerando la importancia de las PFC es necesario generar metodologías eficientes y fiables que describan la dinámica de crecimiento y la respuesta de los árboles de *E. urophylla* a los tratamientos silviculturales. El objetivo fue estimar el índice de área foliar y la biomasa total con datos espectrales de SPOT 7 y LANDSAT 8 para plantaciones forestales comerciales de *E. urophylla* S.T. Blake establecidas en Huimanguillo, Tabasco, México.

4.4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.4.1. Área de estudio

El estudio se realizó en plantaciones forestales comerciales de *E. urophylla* del municipio de Huimanguillo, Tabasco, México (17° 55' N, 94° 06' O y altitud promedio de 30 m) (Figura 4.1). El clima es cálido húmedo (Am), con lluvias abundantes en verano, precipitación media anual de 2,500 mm y temperatura media anual alrededor de 26 °C. Los suelos en los que se desarrollan son de tipo Phaeozem (INEGI, 2005). La vegetación circundante en la zona son relictos de selva alta perennifolia y vegetación secundaria (CONAFOR, 2012).

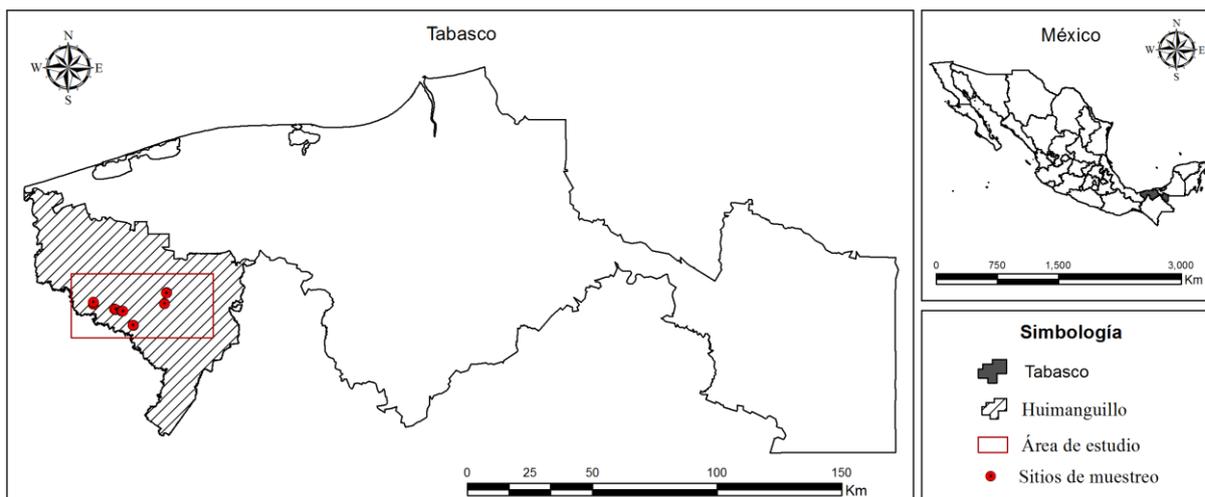


Figura 4.1. Ubicación geográfica de las plantaciones forestales comerciales de *E. urophylla*, establecidas en Huimanguillo, Tabasco, México.

4.4.2. Datos de campo

Se estableció un sistema de muestreo aleatorio conformado de 28 sitios rectangulares (20 x 25 m) de 500 m², georreferenciados con un receptor GPS y distribuidos en plantaciones de *E. urophylla* de edad variable (1 a 7 años). Se realizaron dos mediciones dasométricas en julio de 2014 (inicio del estudio) y agosto de 2015 (final del estudio) registrando las variables diámetro normal (Dn) y altura total (At) de todos los individuos. Los datos recolectados en el muestreo fueron empleados para calcular el área basal (Ab), el volumen total (Vt), la biomasa total (Bt) y la biomasa foliar (Bf) con los modelos generados por Hernández-Ramos *et al.* (2016) para la especie. La Bf sirvió de base para estimar el índice de área foliar (IAF) alométrico de cada sitio, utilizando el modelo de área foliar proyectada (AFP) creado para *E. urophylla* en las mismas plantaciones de estudio (Cuadro 4.1).

Paralelamente se estimó el IAF por un método óptico. Se tomaron fotografías hemisféricas (FH) en cada sitio de muestreo, mismas que fueron analizadas con la aplicación Hemisfer ©Patrick Schleppei versión 2.13. También se estimó el IAF mediante el método "caída de

hojarasca" calculado como el producto de la sumatoria de hojarasca recolectadas en 112 trampas de captura durante 12 meses y el área foliar específica (AFE) para *E. urophylla* estimada con la metodología empleada por Martínez *et al.* (1996). Finalmente, se estimó un IAF calibrado ajustando un modelo de regresión matemática que relaciona los datos de IAF óptico y los obtenidos mediante el método de caída de hojarasca (Cuadro 4.1).

Cuadro 4.1. Ecuaciones para estimar las variables forestales de *E. urophylla* necesarias para el mapeo.

Variable	Ecuaciones	Fuente
Biomasa total (Bt)	$Bt = 179.3627 * (Dn^2 * At)^{0.750777}$	Hernández-Ramos <i>et al.</i> (2016)
Biomasa foliar (Bf)	$Bf = 1.998759 + 44.66013 * Dn - 0.27063 * At$	Hernández-Ramos <i>et al.</i> (2016)
Área foliar proyectada (AFP)	$AFP_{individual} = 7.952315 * Bf^{1.006678}$	Capítulo III
Índice de área foliar calibrado ($IAF_{Calibrado}$)	$IAF_{Calibrado} = 1.650636 * IAF_{Óptico}^{0.956617}$	Capítulo III

Dn: diámetro normal a 1.30 m del suelo; At: altura total.

4.4.3. Imágenes de satélite

Datos SPOT.

Se utilizó una imagen de satélite del sensor SPOT 7 adquirida el 8 de mayo de 2015, con resolución espacial de 6 m, espectral de cuatro bandas (azul, verde, rojo e infrarrojo) y radiométrica de 16 bits (ASTRIUM, 2013). La escena fue proporcionada por la Estación de Recepción México Nueva Generación (ERMEX NG), con el grado de procesamiento Standard

Ortho, correspondiente a una imagen ortorectificada y georreferenciada al sistema de coordenadas UTM 15N, datum y elipsoide WGS84. Los datos espectrales fueron convertidos a radiancia al tope de la atmosfera y posteriormente a reflectancia con las ecuaciones siguientes (ASTRIUM, 2013):

$$L_b(p) = \frac{DC(p)}{GAIN(b)} + BIAS(b) \quad \text{y} \quad \rho_b(p) = \frac{\pi \cdot L_b(p)}{E_0(b) \cdot \cos(\theta_s)}$$

donde, $L_b(p)$ = radiancia al tope de la atmosfera, ($W \text{ sr}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ um}^{-1}$), $DC(p)$ = números digitales del pixel, $GAIN(b)$ = coeficiente de calibración de las ganancias de la banda, $BIAS(b)$ = factor multiplicativo de la banda, $\rho_b(p)$ = reflectancia espectral de cada banda, $E_0(b)$ = radiancia solar media de la banda ($W \text{ m}^2 \text{ micrometer}^{-1}$), θ_s = Angulo solar de la imagen ($^\circ$).

Datos LANDSAT.

La imagen multiespectral del sensor LANDSAT 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission) fue adquirida el día 2 de agosto de 2015, con resolución espacial de 30 m, espectral de 11 bandas y radiométrica de 16 bits (Ariza, 2013). La escena se obtuvo del archivo administrado por United States Geological Survey (USGS), con un grado de procesamiento Nivel-1 Terrain (L1T) y georreferenciada al sistema de coordenadas UTM 15N, datum y elipsoide WGS84. La conversión de los números digitales (ND) a valores de reflectancia en el tope de la atmosfera para este sensor se realizó con la ecuación siguiente (Ariza, 2013):

$$\rho_b(p) = \frac{M_p \cdot ND + A_p}{\cos(\theta_s)}$$

donde, $\rho_b(p)$ = reflectancia espectral de cada banda, M_p = factor multiplicativo de escalado específico por banda, ND = números digitales del pixel, A_p = factor aditivo de escalado específico por banda, θ_s = ángulo solar de la imagen ($^\circ$).

Posterior a la corrección radiométrica de las imágenes de satélite se calcularon cuatro índices de vegetación (IV) para cada sensor, tomando la relación entre las bandas roja e infrarroja. Los

índices calculados fueron: (1) Relación Simple (RS): $RS = \frac{IRC}{R}$ (Gilabert *et al.*, 1997); (2)

Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI): $NDVI = \frac{IRC - R}{IRC + R}$ (Rouse *et al.*,

1973); (3) NDVI Transformado (TVI): $TVI = \sqrt{NDVI + 0.5}$ (Rouse *et al.*, 1973); Relación

simple normalizada (NRVI): $NRVI = RS - \frac{1}{RS + 1}$ (Gilabert *et al.*, 1997), donde, IRC =

infrarrojo cercano; R = banda roja.

Además de los índices construidos se analizó la información espectral de las bandas de cada sensor. Para SPOT 7 se agregaron las bandas azul (A), verde (V), rojo (R) e infrarrojo cercano (IRC); para LANDSAT 8 las bandas antes mencionadas y el infrarrojo de onda corta (IROC). Los valores de reflectancia y de los índices se extrajeron de la imagen como el promedio de los píxeles localizados dentro de un polígono de 500 m², representativo del sitio de muestreo. El procesamiento de las imágenes de satélite se realizó en el programa Arc Map 10.2 ®.

4.4.4. Métodos de análisis de datos

4.4.4.1. Inventario tradicional y estimadores de razón y regresión

Se aplicó un muestreo simple al azar y estratificado por la edad de plantación para estimar el inventario total de las variables Ab, Vt, Bt e IAF, el cual se utilizó como base de comparación para el resto de los métodos empleados para estimar las dos últimas variables. Considerando la relación alta que existe entre las bandas espectrales roja, infrarroja y los índices de vegetación con las variables del rodal, los datos se analizaron con estimadores de Razón y Regresión (Valdez-Lazalde *et al.*, 2006). Los cuales permiten construir intervalos de confianza de menor

amplitud que los obtenidos mediante el muestreo aleatorio de campo (Valdez-Lazalde *et al.*, 2006). Los dos estimadores se basan en una variable auxiliar (X) para predecir la variable de interés (Y). Para el estimador de razón (R) se empleó el enfoque de estimar la proporción de Y respecto a X, y R es una constante poblacional definida como $R = \bar{Y} / \bar{X}$. Los estimadores de regresión utilizan una variable auxiliar de la siguiente forma $\mu_y = \bar{Y} + B(\mu_x - \bar{X})$ para estimar medias totales de Y, donde μ_y es la media poblacional de X; mientras que \bar{Y} , \bar{X} y B son los parámetros estimados a partir de la muestra.

4.4.4.2. Modelos de regresión múltiple

En el análisis de regresión se consideraron dos enfoques para la construcción del modelo. (1) un análisis de correlación de *Pearson* entre las bandas e índices de vegetación del sensor SPOT 7 y LANDSAT 8 y las variables de interés (Bt e IAF por método), seleccionando las variables que presentaron mejor relación. Posteriormente se empleó la técnica de regresión lineal simple y múltiple para generar el modelo que mejor predicción presentó. (2) Se aplicó la técnica de regresión Stepwise o selección a pasos para la elección de un segundo modelo que contenga las variables con mayor aporte a la predicción. Finalmente se compararon los dos modelos para elegir el mejor, basado en los valores altos de R^2_{Aju} , bajos de la raíz del error cuadrático medio (RECM) y la significancia de sus parámetros calculados.

4.4.5. Muestreo comparativo y estimación del error

La biomasa total y el índice de área foliar mapeados fueron comparado con los valores base, calculados mediante el muestreo simple al azar y el muestreo estratificado, el cual fue tomado como valor real de la media poblacional e inventario total de las plantaciones. Un segundo proceso de comparación fue calcular los errores de los valores predichos de las estimaciones de

regresión lineal, estimadores de razón y regresión. Se utilizó el valor de la Raíz del Error

Cuadrático Medio (RECM) con la relación $RECM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}^{(i)})^2}{n}}$, donde $\hat{Y}^{(i)}$ es el valor

predicho por el método de mapeo, Y_i corresponde al valor observado en el inventario tradicional y n es el numero de observaciones.

4.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los promedios de Ab, Vt, Bt e IAF obtenidos en el inventario total de las plantaciones de 1 a 7 años de edad, al inicio de la evaluación fueron 16.235 m² ha⁻¹ en Ab, 161.18 m³ ha⁻¹ en Vt, 90.734 Mg ha⁻¹ en Bt y 2.587 m² m⁻² de IAF_{Alométrico}; al final de la evaluación (un año después), los valores incrementaron a 18.002 m² ha⁻¹ en Ab, 168.302 m³ ha⁻¹ en Vt, 95.001 Mg ha⁻¹ en Bt y 2.896 m² m² de IAF_{Alométrico}, ambos bajo un muestreo simple al azar (MSA). Se mejoró la precisión en las estimaciones con el mustreos estratificado (ME) y los estimadores de razón (ERa) y regresión (ERe), utilizando la variable auxiliar Ab y los valores de la media poblacional (μ_x) obtenido con el ME por ser más preciso (Cuadro 4.2).

Las estimaciones totales con el MSA son poco confiables, ya que la precisión es menor a la recomendada (10 %), debido a la variación alta generada por la edad de las plantaciones. En cambio el ME por la edad presentó una mejoría en la precisión para todas la variables, siendo el más preciso y adecuado para estimar el inventario total. Los estimadores de razón y regresión solo se calcularon para la Bt e IAF, estos mostraron resultados adecuados para la Bt, pero no para el IAF cuya precisión fue baja en el caso de ERa. Valores similares se presentaron en el inventario de bosque templado en Hidalgo, México, donde el empleo de un muestreo estratificado mejoró las estimaciones en comparación con el muestreo simple al azar (Cruz-Leyva *et al.*, 2010; Muñoz-Ruiz *et al.*, 2014).

Cuadro 4.2. Estimaciones de los inventarios obtenidos por muestreo simple al azar (MSA), muestreo estratificado (ME), estimadores de razón (ERa) y regresión (ERe), para las plantaciones de *E. urophylla*, en Huimanguillo, Tabasco, México.

Método de estimación	Inicio de evaluación				Final de evaluación				
	Ab	Vt	Bt	IAF	Ab	Vt	Bt	IAF	
MSA	Media	16.24	161.18	90.73	2.59	18.00	168.30	95.00	2.90
	IC+	19.35	200.26	110.94	2.74	20.32	198.84	110.38	3.08
	IC-	13.12	122.10	70.53	2.44	15.68	137.77	79.62	2.72
	Precisión	19%	24%	22%	6%	13%	18%	16%	6%
ME	Media	16.15	163.83	93.47	2.31	17.56	175.97	99.78	2.46
	IC+	16.93	172.42	98.13	2.41	18.37	185.32	104.85	2.56
	IC-	15.37	155.24	88.80	2.21	16.75	166.61	94.70	2.35
	Precisión	5%	5%	5%	4%	5%	5%	5%	4%
ERa	Media			93.95	2.32			102.31	2.52
	Razón			5.79	2.86			5.68	2.80
	Precisión			4%	20%			5%	17%
ERe	Media			90.19	2.60			103.62	2.89
	Pendiente (b)			6.44	0.13			6.52	-0.31
	Precisión			3%	6%			3%	6%

Ab: área basal ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$); Vt: volumen total ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$); Bt: biomasa total (Mg ha^{-1}); IAF: índice de área foliar alométrico; IC+: intervalo de confianza superior; IC-: intervalo de confianza inferior.

4.5.1. Correlación entre los datos de campo y las variables espectrales

La correlación entre las bandas espectrales e índices de vegetación del satélite SPOT 7 fue significativamente mayor con la variable IAF calculado mediante hojarasca caída, seguido por

el IAF calibrado. En cambio para el satélite LANDSAT 8 las relaciones fueron bajas y significativas solo con los valores de IAF alométrico, calculado al inicio del estudio. La Bt inicial presentó relación baja con dos bandas espectrales de SPOT 7 y con LANDSAT 8, además la correlación fue no significativa, esto puede deberse a la variación generada en las estimaciones a diferentes edades de plantación (Cuadro 4.3).

Las bandas espectrales azul, verde y rojo tienen correlaciones negativas en el sensor SPOT 7 y una tendencia decreciente conforme el IAF aumenta. Este comportamiento es causado por los altos contenidos de clorofila en las hojas, que en conjunto controlan la absorción y reflectancia de la luz solar (Gonsamo, 2009), además los valores bajos de reflectancia en estas bandas son característicos de un dosel denso y de vegetación fotosintéticamente activa, indicando crecimiento en las plantaciones. El IRC tuvo un comportamiento inverso al espectro visible, con una correlación positiva con respecto al IAF de las plantaciones. Los IV presentaron una relación positiva con el IAF y la Bt, principalmente los calculados con información del satélite SPOT 7. La tendencia de los IV con las variables del rodal es directamente proporcional a la presencia de vegetación y a su vigorosidad (Cuadro 4.3).

Los coeficientes de correlación mayores lo presentaron las bandas R, V y los IV para el sensor SPOT 7, en general para todas las variables relacionadas. Para LANDSAT 8 fueron las bandas IROC, R y A con el IAF alométrico. Las variables espectrales antes mencionadas fueron seleccionadas para construir un modelo de predicción del IAF_H y la Bt inicial, variables del rodal con mayor correlación (Figura 4.2 y 4.3).

Cuadro 4.3. Coeficientes de correlación de Person entre las variables espectrales (VE) y el índice de área foliar (IAF), y biomasa total (Bt), para *E. urophylla*, en Huimanguillo, Tabasco, México.

	VE	IAF ₁	IAF ₀₁	IAF ₂	IAF ₀₂	IAF _C	IAF _H	Bt ₁	Bt ₂
SPOT 7	A	0.00	-0.46 **	-0.08	-0.37	-0.37 *	-0.56 ***	-0.46 *	-0.14
	V	-0.03	-0.38 **	-0.16	-0.51 ***	-0.51 ***	-0.70 ***	0.12	0.15
	R	-0.08	-0.49 ***	-0.20	-0.50 ***	-0.50 ***	-0.75 ***	-0.34 *	-0.06
	IRC	0.19	-0.22	0.35	0.36 *	0.36 *	0.38 **	0.13	0.23
	NDVI	0.19	0.04	0.36	0.47 **	0.47 **	0.58 ***	0.24	0.19
	RASI	0.18	0.04	0.33	0.47 **	0.47 **	0.58 ***	0.24	0.19
	TVI	0.19	0.04	0.37	0.47 **	0.47 **	0.58 ***	0.24	0.19
	NRVI	0.18	0.04	0.33	0.47 **	0.47 **	0.58 ***	0.24	0.19
LANDSAT 8	A	0.38 **	-0.16	0.40 *	0.01	0.02	-0.07	-0.04	0.05
	V	0.37 *	-0.10	0.38 *	0.03	0.03	-0.04	-0.02	0.03
	R	0.42 **	-0.07	0.43 *	0.09	0.09	0.03	-0.02	0.00
	IRC	0.08	0.27	0.04	0.09	0.09	0.30	0.08	0.16
	IROC	0.46 **	0.04	0.46 **	0.23	0.23	0.20	-0.06	-0.13
	NDVI	-0.28	0.36 *	-0.39 *	0.01	0.01	0.28	0.10	0.12
	NRVI	-0.32 *	0.31	-0.41 *	-0.05	-0.05	0.24	0.12	0.20
	RASI	-0.33 *	0.30	-0.42 *	-0.06	-0.06	0.22	0.12	0.23
TVI	-0.26	0.38 **	-0.38	0.04	0.04	0.30	0.08	0.08	

A: azul; V: verde; R: rojo; IRC: infrarrojo; IROC: infrarrojo de onda corta; NDVI: índice de vegetación de diferencia normalizada; NRVI: NDVI transformado; RASI: razón simple; TVI: razón simple transformado; IAF₁: alométrico inicial; IAF₀₁: óptico inicial; IAF₂: alométrico

final; IAF_{O2}: óptico final; IAF_C: calibrado; IAF_H: calculado mediante hojarasca; *, **, ***: significancia con $p = 0.1, 0.05$ y 0.001 , respectivamente.

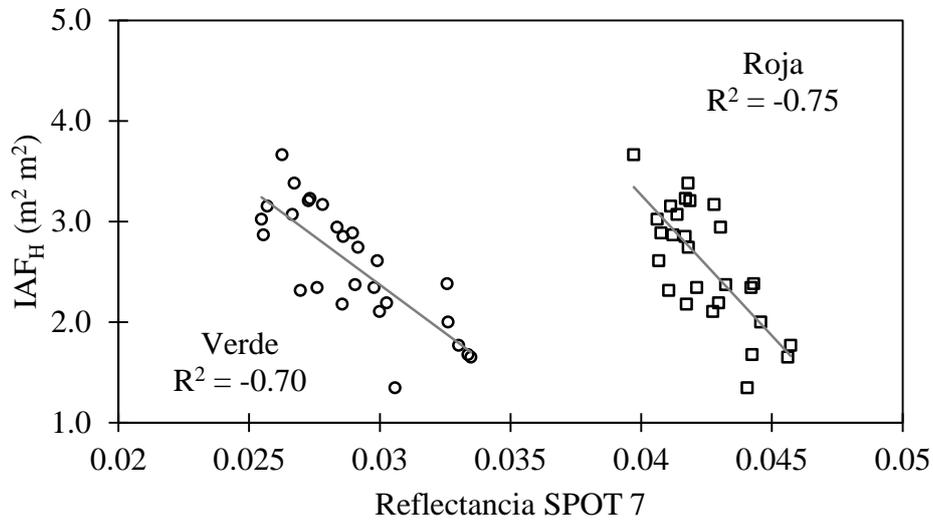


Figura 4.2. Correlación entre las bandas espectrales roja (R) y verde (V) del satélite SPOT 7 con el índice de área foliar calculado con la caída de hojarasca (IAF_H) de *E. urophylla*.

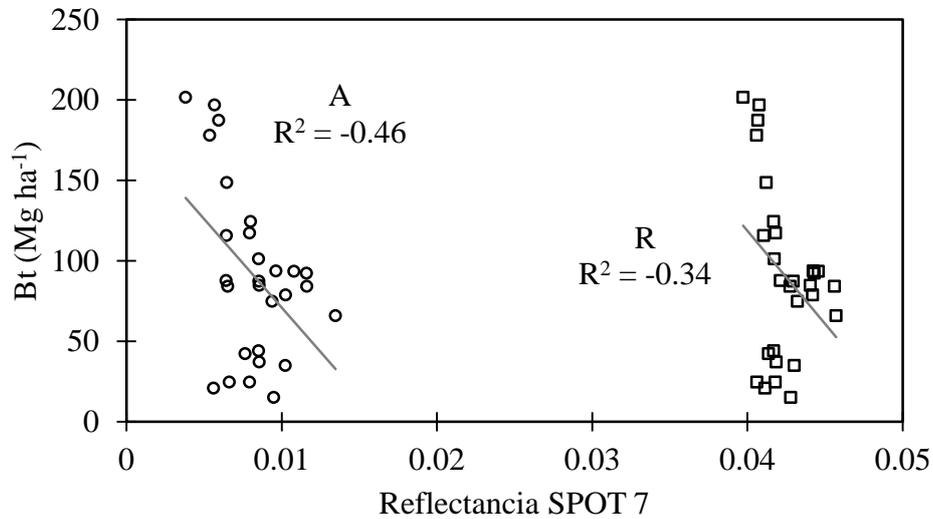


Figura 4.3. Correlación entre las bandas espectrales Azul (A) y Roja (R) del satélite SPOT 7 con la biomasa total (Bt) de *E. urophylla*.

Las relaciones entre el IAF, la Bt y las bandas del espectro visible y el IRC son similares a los observados en estudios anteriores, además estas relaciones se han descrito a fondo en

muchos otros estudios. Por ejemplo, Aguirre-Salado *et al.* (2009) encontraron relaciones altas con información espectral del SPOT 5, especialmente entre IROC, NDVI43 y el carbono arbóreo para bosques de *Pinus patula* en Hidalgo México. En la misma región del Estado de Hidalgo, Aguirre-Salado *et al.* (2011) descubrieron una relación alta en la banda R y los IV NDVI43 y NDVI del satélite SPOT 5 y las variables IAF y cobertura arbórea (COB); Muñoz-Ruiz *et al.* (2014) reportaron correlaciones altas entre el índice de estrés hídrico, el RASI de los satélites SPOT 4-5 y las variables del inventario nacional forestal y de suelos (INFyS) (Ab, Vt y COB). Soudani *et al.* (2006) en bosques templados de coníferas de Francia, presentaron correlaciones entre el IAF óptico y la banda R (-0.75) de SPOT 4 y LANDSAT ETM+, además del NDVI ETM+ (> 0.80). En plantaciones el NDVI del satélite LANDSAT TM presenta correlaciones alta en el mapeo del IAF en diferentes épocas de desarrollo (invierno y verano) (Peduzzi *et al.*, 2010).

4.5.2. Modelos de regresión para IAF y Bt

Los modelos mejores para estimar el IAF_H y la Bt fueron los compuestos con información espectral del satélite SPOT 7, debido a que la información de LANDSAT 8 no presentó correlaciones altas con las variables forestales. El modelo para estimar el IAF_H se obtuvo con el enfoque de STEPWISE, conformado con las bandas espectrales azul (A) y roja (R): $IAF_H = 24.15006 - 550.58366 * R + 217.55202 * A$, el cual presentó una $R^2_{Aju} = 0.6528$, un RECM = 0.34943 y un ajuste gráfico adecuado (Figura 4.4). Para la Bt el modelo con mejor ajuste esta compuesto de la banda verde (V), la del infrarrojo cercano (IRC) y el IV de razón simple (RASI): $Bt = -550.19249 + 29518 * V - 11280 * IRC + 436.72397 * RASI$, con una $R^2_{Aju} = 0.649$, un RECM = 31.74239 y sus parámetros significativos (Figura 4.4).

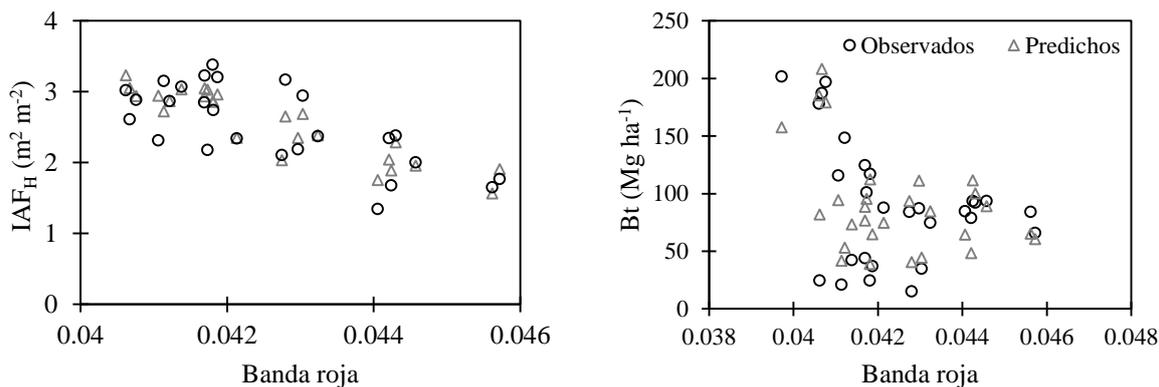


Figura 4.4. Diagrama de dispersión de observados y predichos del índice de área foliar (IAF_H) y biomasa total (Bt) contra la banda roja (R) del sensor SPOT 7.

La banda de mayor correlación indica una respuesta decreciente de la reflectancia en la banda R conforme aumentan los valores del IAF y la Bt, causado para la absorción en este rango del espectro por los pigmentos de clorofila (Figura 4.4.). La información de la banda R es útil para describir las características de la vegetación. Además de la banda R se han encontrado relaciones con la banda IRC de SPOT 5 en la predicción de la edad de plantación para *Eucalyptus* spp. en Argentina (Lencinas y Mohr-Bell, 2007) y de LANDSAT 5 para modelar el Ab de *Pinus patula* y *P. teocote* en rodales bajo manejo en Hidalgo, México (Cruz-Leyva *et al.*, 2010).

4.5.3. Comparación del inventario tradicional vs estimadores de razón y regresión

El inventario total del IAF y la Bt se realizó con un muestreo estratificado (ME), el cual fue empleado para realizar la comparación entre las estimaciones resultantes de los datos espectrales. Para los estimadores de razón (ERa) y regresión (ERe), se utilizó como variable auxiliar la banda R del satélite SPOT 7, por presentar la correlación mayor con las variables forestales IAF y Bt. Las estimaciones mediante los ERa fueron los más semejantes al ME en las dos variables, además fue el estimador más conservador para el IAF_H . Los ERe y regresión lineal múltiple obtuvieron valores similares entre ellos en cuanto al IAF_H . Para la Bt los

resultados conservadores lo presentó la regresión lineal múltiple, siendo menor un -2.9 %, y mayor 2.44 % los ERe con respecto al inventario tradicional (Cuadro 4.4).

Cuadro 4.4. Comparación del inventario tradicional y las estimaciones del índice de área foliar (IAF_H) y la biomasa total (Bt) empleando información espectral, para plantaciones de *E. urophylla*.

Método de estimación	IAF_H	IC-95	IC+95	RECM	Bt	IC-95	IC+95	RECM
Inventario tradicional								
Muestreo estratificado	2.31	2.21	2.41		93.47	88.80	98.13	
Percepción remota								
Estimador de razón	2.29	2.09	2.48	0.79	92.51	71.80	113.21	53.90
Estimador de regresión	2.58	2.43	2.73	0.62	95.81	76.47	115.16	49.42
Regresión lineal múltiple	2.57			0.35	90.72			29.39

IC-95: intervalo de confianza inferior y superior a un $\alpha = 0.05$; RECM: raíz del error cuadrático medio ($m^2 m^{-1}$, $Mg ha^{-1}$).

Los métodos empleados para estimar el IAF_H y la Bt presentan resultados satisfactorios y comparando con los intervalos de confianza del inventario tradicional, el mejor fue el ERA, seguido por el de ERe y por último la regresión lineal múltiple. Sin embargo, el mapeo de los primeros dos métodos no detalla la distribución de las variables por edad, ya que son muy sensibles a la variación y al tamaño de muestra, calculando únicamente el promedio del inventario total. Esto se observa al extraer los promedios por sitio de cada mapa generado (Figura 4.5 y 4.6) y compararlo con el valor observado, donde los valores altos de RECM los presentan los estimadores de razón (Bt = 58 e $IAF_H = 34\%$) y regresión (Bt = 54 e $IAF_H = 24\%$) (Cuadro 4.4), siendo mejor en este aspecto el método de regresión lineal múltiple con un

error 32 y 13 % para estimar y mapear el IAF_H y la Bt respectivamente en plantaciones de *E. urophylla* en Huimanguillo, Tabasco, México.

El método de regresión lineal múltiple presenta buenas predicciones del IAF_H y Bt, sin embargo, se debe considerar que la relación entre las variables utilizadas cambia drásticamente al aplicar esta técnica (Salas *et al.*, 2010), lo que puede generar correlaciones diferentes en predicciones futuras. También la baja relación entre variables podría ser causado por los desfases de la fecha de toma de la imagen y de elaboración del inventario.

Aguirre-Salado *et al.* (2011) mejoraron las estimaciones geoespaciales del IAF al complementar con información de campo y reportaron que el método mejor para el mapeo fue la regresión lineal con un error de 7.51 % para IAF_{Calibrado} con información espectral del satélite SPOT 5. Salas *et al.* (2010) obtuvieron errores inferiores al 5 % en la predicción de variables del rodal utilizando un modelo lineal de efectos mixtos y lineal múltiple, siendo superiores a las estimaciones de mínimos cuadrados, *K*-ésimo vecino más cercano y más similar, empleando información del satélite LANDSAT ETM+.

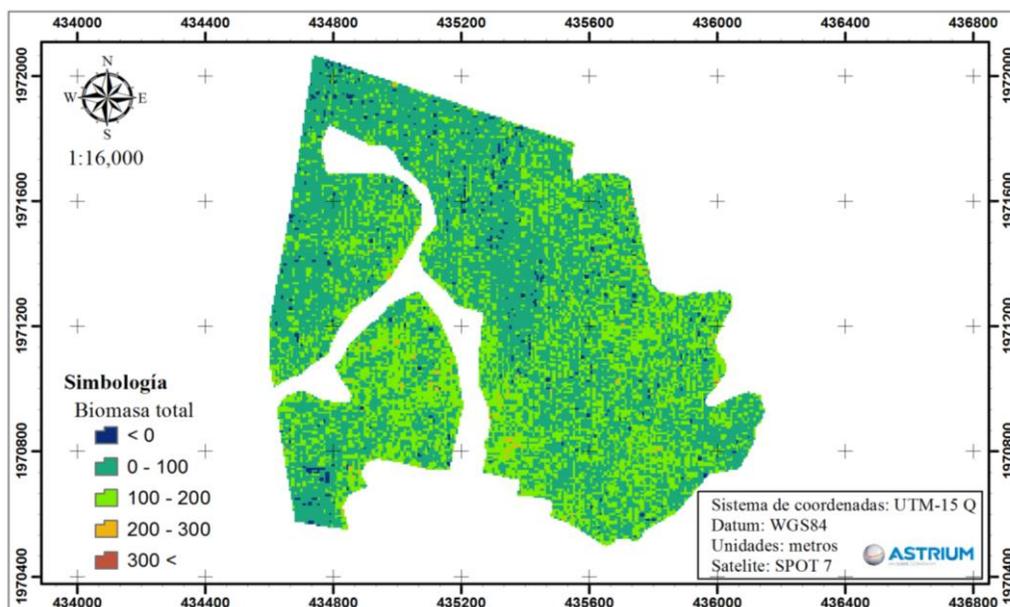


Figura 4.5. Biomasa total (Mg ha⁻¹) mediante regresión lineal múltiple, para plantaciones de *E. urophylla* en Huimanguillo, Tabasco, México.

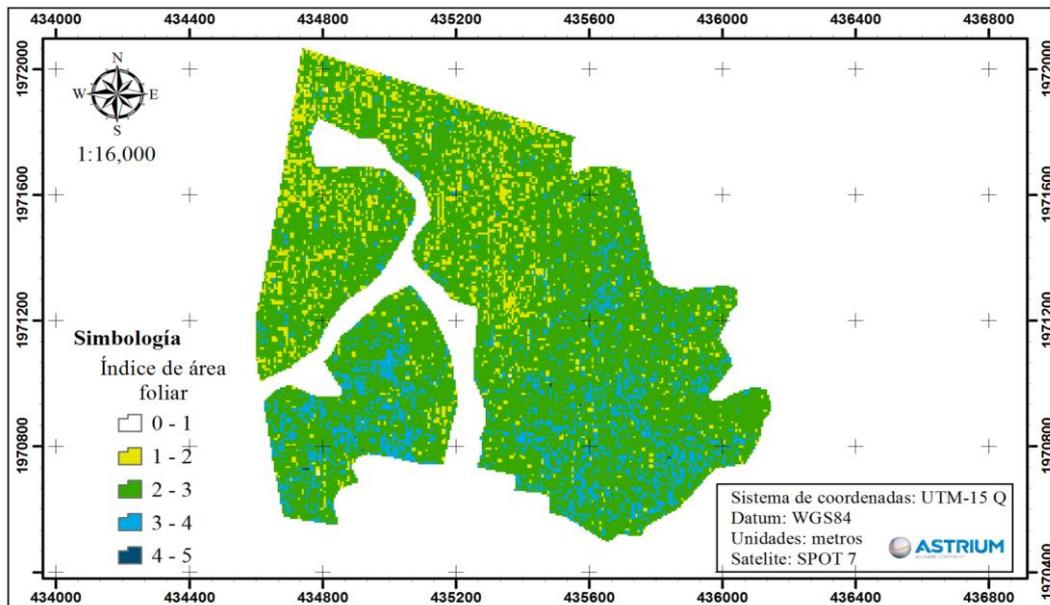


Figura 4.6. Índice de área foliar ($m^2 m^2$) mediante regresión lineal múltiple, para plantaciones de *E. urophylla* en Huimanguillo, Tabasco, México.

El mapeo de las variables Bt y IAF_H se realizó tomando como ejemplo la plantación de *E. urophylla* con cuatro años de edad al final de la medición. Los datos promedios estimados mediante inventario tradicional fueron 88.44 Mg ha^{-1} de BT y $2.31 \text{ m}^2 m^2$ de IAF calculado mediante caída de hojarasca. En los mapas generados se observan para Bt valores negativos, problema que se presenta con la regresión lineal, esto se debe a la poca correlación que presentó con las variables espectrales e IV de los satélites SPOT 7 y LANDSAT 8. Contrariamente el IAF_H presenta una distribución espacial de los valores adecuada a la variación de la edad de plantación.

Emplear variables espectrales para evaluar la Bt e IAF de las plantaciones de *E. urophylla* reduciría el tiempo de elaboración del inventario forestal, además sería una forma sencilla para evaluar el estado de desarrollo de las plantaciones, al poder monitorear periódicamente con imágenes de satélite y el modelo generado en este estudio. Sin embargo, los mejores resultados se obtuvieron con el sensor SPOT 7, el cual es un satélite de alta resolución y la adquisición de las imágenes generaría un costo de compra, siendo una desventaja para este método.

4.6. CONCLUSIONES

El empleo de información espectral en la predicción de las variables del rodal Bt e IAF fue confiable, al presentar valores similares al inventario tradicional y RECM bajos con la técnica de regresión lineal múltiple, siendo esta mejor que los estimadores de razón y regresión. Además, la información del sensor SPOT 7 fue la que mayor correlación presentó con las variables del rodal. Contrariamente, las variables espectrales del sensor LANDSAT 8 no se correlacionaron con ninguna variable.

Los mejores resultados en la modelación de la Bt e IAF se presentaron al incluir información espectral de alta resolución (6 m) como lo es SPOT 7, lo que es una ventaja sobre LANDSAT 8, el cual tiene un menor detalle de la superficie por ser de baja resolución (30 m).

4.7. LITERATURA CITADA

- Aguirre-Salado, C. A., J. R. Valdez-Lazalde, G. Ángeles-Pérez, H. M. de los Santos-Posadas, y A. I. Aguirre-Salado. 2011. Mapeo del índice de área foliar y cobertura arbórea mediante fotografía hemisférica y datos Spot 5 HRG: Regresión y K-nn. *Agrociencia* 45: 105-119.
- Aguirre-Salado, C. A., J. R. Valdez-Lazalde, G. Ángeles-Pérez, H. M. de los Santos-Posadas, R. Haapanen, y A. I. Aguirre-Salado. 2009. Mapeo de carbono arbóreo aéreo en bosques manejados de pino *Patula* en Hidalgo, México. *Agrociencia* 43: 209-220.
- Alice, F., F. Montagnini, y M. Montero. 2004. Productividad de plantaciones puras y mixtas de especies nativas en la estación biológica La Selva, Sarapiquí, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 28: 61-71.
- Ariza, A. 2013. Descripción y corrección de productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission). Instituto Geográfico, Bogotá, Colombia. 45 p.
- ASTRIUM. 2013. SPOT 6 & SPOT 7 Imagery User Guide. Toulouse, Cedex, France. 118 p.

- CONAFOR. 2012. Situación actual y perspectivas de las plantaciones forestales comerciales en México. A. Velázquez M. (ed). 448 p.
- Cruz-Leyva, I. A., J. R. Valdez-Lazalde, G. Ángeles-Pérez, y H. M. de los Santos-Posadas. 2010. Modelación espacial de área basal y volumen de madera en bosques manejados de *Pinus patula* y *P. teocote* en el ejido Atopixco, Hidalgo. *Madera y Bosques* 16: 75-97.
- FAO. 2006. Tendencias y perspectivas del sector forestal en América Latina y el Caribe. FAO: Dirección de productos y economía forestales, Departamento Forestal. FAO, Roma, Italia. 178 p.
- FAO. 2015. Evaluación de los recursos forestales mundiales 2015: ¿cómo están cambiando los bosques del mundo? FAO, Roma, Italia. 49 p.
- Gilabert, M. A., J. González-Piqueras, y J. García-Haro. 1997. Acerca de los índices de vegetación. *Revista de Teledetección*. 10 p.
- Gonsamo G., A. 2009. Remote sensing of leaf area index: enhanced retrieval from close-range and remotely sensed optical observations. Department of Geography, University of Helsinki, Finland. 66 p.
- Hall, R. J., R. S. Skakun, E. J. Arsenault, and B. S. Case. 2006. Modeling forest stand structure attributes using Landsat ETM+ data, Application to mapping of aboveground biomass and stand volume. *Forest Ecology Management* 225: 378-390.
- Hernández-Ramos, J., H. M. Santos-Posadas, J. R. Valdez-Lazalde, J. C. Tamarit-Urias, G. Ángeles-Pérez, A. Hernández-Ramos, y A. Peduzzi. 2016. Biomasa aérea y factores de expansión de biomasa en plantaciones forestales comerciales de *Eucalyptus urophylla*. Enviado para publicación.

- INEGI. 2005. Marco Geoestadístico Municipal 2005, versión 3.1. Disponible en <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/datos-geograficos/27/27008.pdf> (Consulta: agosto 2015).
- Lencinas, J. D., y D. Mohr-Bell. 2007. Estimación de clases de edad de las plantaciones de la provincia de Corrientes, Argentina, con base en datos satelitales Landsat. *Bosque* 28: 106-118.
- Martínez F., J., J. Martínez F., M. A. Romero D., F. López B., y F. Belmonte S. 1996. Biomasa e índice de área foliar de *Rosmarinus officinalis* L. en matorral semiárido (Cuenca de Mula, Murcia). *Análisis de Biología Ambiental* 21: 83-92.
- Muñoz-Ruiz, M. A., J. R. Valdez-Lazalde, H. M. de los Santos-Posadas, G. Ángeles-Pérez, y A. I. Monterroso-Rivas. 2014. Inventario y mapeo del bosque templado de Hidalgo, México mediante datos del satélite SPOT y de campo. *Agrociencia* 48: 847-862.
- Peduzzi, A., H. Lee A., and R. H. Wynne. 2010. Leaf area of overstory and understory in pine plantations in the flatwoods. *Southern Journal of Applied Forestry* 34: 154-160.
- Salas, C., L. Ene, N. Ojeda, y H. Soto. 2010. Métodos estadísticos paramétricos y no paramétricos para predecir variables de rodal basados en Landsat ETM+: una comparación en un bosque de *Araucaria araucana* en Chile. *Bosque* 31: 179-194.
- Soudani, K., C. Francois, G. Le-Maire, V. Le-Dantec, and E. Dufrene. 2006. Comparative analysis of IKONOS, SPOT, and ETM+ data for leaf area index estimation in temperate coniferous and deciduous forest stands. *Remote Sensing of Environment* 102: 161-175.
- Rouse, J. W., R. H. Hass, D. W. Deering, and J. A. Schell. 1973. Monitoring the vernal advancement and retro gradation (green wave effect) of natural vegetation. NASA/OSFC. Type III. Final report. Oreenbello MD. 69 p.

- Valdez-Lazalde, J. R., M. J. González-Guillén, y H. M. de los Santos-Posadas. 2006. Estimación de cobertura arbórea mediante imágenes satelitales multiespectrales de alta resolución. *Agrociencia* 40: 383-394.
- Velasco L., S., O. Champo J., M. L. España B., y F. Baret. 2010. Estimación del índice de área foliar en la reserva de la biósfera mariposa monarca. *Revista Fitotecnia Mexicana* 33: 169-174.
- Yépez R., F. D., y D. F. Lozano G. 2014. Mapeo del arbolado urbano con LiDAR aéreo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 5: 58-75.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES GENERALES

La productividad primaria neta aérea de las plantaciones forestales comerciales de *E. urophylla* está influenciada por la edad de crecimiento, presentando una tendencia decreciente conforme los árboles son más viejos. Esta especie en condiciones favorables de crecimiento presenta su máxima productividad a temprana edad, condición a tomar en cuenta para el establecimiento de plantaciones comerciales en la región.

El índice de área foliar es un parámetro que puede ser empleado para evaluar la respuesta de las plantaciones forestales comerciales de *E. urophylla* al manejo e implementación de prácticas complementarias, considerándolo como un indicador confiable de la productividad y desarrollo de las mismas.

El método de hojarasca caída representa un opción muy útil para estimar el índice de área foliar, presentando resultados confiables. Además combinarlo con mediciones ópticas, lo hace una metodología eficiente para reducir inversión de inventario y poder evaluar mensualmente el desarrollo de las plantaciones.

La combinación de datos de campos y espectrales son herramientas confiables para la estimación de variables forestales en plantaciones de *E. urophylla* en la región de Huimanguillo, Tabasco, México. Además las técnicas de estimadores de razón y regresión son útiles para estimar el inventario del índice de área foliar y biomasa total utilizando los datos espectrales como variables auxiliares, pero presentan el inconveniente de no caracterizar la variabilidad de las variables en el rodal o plantación.

La regresión lineal múltiple es una opción para modelar la distribución espacial del índice de área foliar y la biomasa total en una escala mayor, ya que obtuvo resultados precisos en comparación al resto de las técnicas empleadas.

A mayor resolución espacial se obtiene una mayor caracterización de las variables forestales, principalmente con el rango del espectro visible sin transformar. Esto se debe a que el sensor SPOT 7 mostró mejores resultados en la estimación del índice de área foliar y biomasa total, con respecto a los datos de la plataforma LANDSAT 8.

El empleo de datos provenientes de imágenes satelitales de alta resolución son confiables para estimar las variables forestales con una precisión alta, además de la facilidad de modelar a una escala mayor y considerando la variabilidad de las plantaciones.